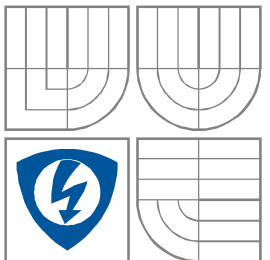




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# NOSITELNÉ ANTÉNY PRACUJÍCÍ V ISM PÁSMU

WEARABLE ANTENNAS OPERATING IN ISM BAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Ondřej Zapletal

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Petr Vašina

## **VLOŽIT ORIGINÁL ZADÁNÍ**

Zadání závěrečné práce si vyzvedněte na sekretariátě UREL. Při odevzdávání více kusů závěrečné práce obsahuje originál zadání jen jeden z nich, ostatní obsahují pouze jeho kopii.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá problematikou nositelných antén. Hlavním cílem práce je seznámit čtenáře se základními vlastnostmi, měřením elektrických vlastností textilií a metodami výroby. Dále je zde uveden návrh antény pro kmitočtové pásmo ISM 5,8 GHz, který je pak pomocí numerického modelu v CST Microwave Studio® zkoumán. Je vyhodnocen vliv flexibility a působení přítomnosti lidské tkáně na vlastnosti navrženého zařízení. Dle optimalizovaného návrhu bylo pomocí možných technologií vyrobeno několik vzorků navrženého zařízení, na kterých bylo provedeno ověřovací měření. Zjištěné poznatky jsou porovnány se současným výzkumem dané problematiky prezentované v literatuře.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

nositelná anténa, elektrotextil, relativní permitivita, blízkost lidského těla, flexibilita

## **ABSTRACT**

Presented thesis is oriented on wearable antennas. The main aim of this thesis is to introduce the basic properties, measurement of textile's electric properties and several manufacturing methods. The antenna design for the ISM 5.8 GHz bandwidth is also included and further observed by numerical model in CST Microwave Studio. The impact of flexibility and the influence of human tissue are evaluated in the case of designed equipment. According to the optimized design was made several samples by various technologies and samples were measured. Achieved results are further compared to equivalent results listed in actual available references.

## **KEYWORDS**

wearable antenna, electrotexil, relative permitivity, human body proximity, flexibility

ZAPLETAL, O. *Nositelné antény pracující v ISM pásmu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 75 s., 6 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Vašina.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Nositelné antény pracující v ISM pásmu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 19. 5. 2016

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vašinovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 19. 5. 2016

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod	1
<b>1 Komunikace v blízkosti lidského těla</b>	<b>2</b>
<b>2 ISM pásma</b>	<b>3</b>
<b>3 Nositelné antény</b>	<b>4</b>
3.1 Základní požadavky .....	4
3.2 Používané materiály .....	5
3.2.1 Vodivé materiály .....	5
3.2.2 Nevodivé materiály .....	6
3.3 Měření základních parametrů textilu .....	7
<b>4 Mikropáskové antény</b>	<b>9</b>
4.1 Napájení mikropáskových antény .....	10
4.1.1 Napájení na okraji flíčku .....	10
4.1.2 Napájení koaxiální sondou .....	10
4.1.3 Napájení pomocí vazební štěrbin .....	11
4.2 Základní parametry mikropáskových antén .....	12
4.3 Generování kruhově polarizované vlny .....	13
4.3.1 Dvoubodové napájení .....	13
4.3.2 Napájení v jednom bodě .....	14
4.4 Návrhové vzorce mikropáskových antén .....	15
<b>5 Technologie výroby</b>	<b>18</b>
5.1 Technologie výroby s použitím vodivých vláken .....	18
5.1.1 Pletení .....	18
5.1.2 Tkaní .....	19
5.1.3 Vyšívání .....	20
5.2 Technologie výroby souvislé vrstvy vodivého materiálu .....	21
5.2.1 Inkoustový tisk .....	21
5.2.2 Sítotisk .....	22

5.2.3	Plátování .....	23
<b>6</b>	<b>Numerické modelování</b>	<b>25</b>
6.1	Zvolený textil.....	25
6.2	Návrh antény.....	26
6.3	Simulace anténního motivu .....	27
6.4	Vliv blízkosti lidské tkáně .....	31
6.5	Vliv ohybu struktury.....	35
6.5.1	Konkávní ohyb.....	35
6.5.2	Konvexní ohyb.....	41
6.5.3	Ohyb po povrchu koule.....	47
6.5.4	Shrnutí simulovaných závislostí .....	50
<b>7</b>	<b>Měření na realizovaných anténách</b>	<b>51</b>
7.1	Měření činitele odrazu na vstupu antény .....	53
7.1.1	Měření činitele odrazu vyrobených vzorků .....	53
7.1.2	Měření činitele odrazu v ohybech.....	54
7.1.3	Měření činitele odrazu na fantomu .....	58
7.1.4	Shrnutí měření činitel odrazu.....	58
7.2	Měření směrových charakteristik.....	59
7.2.1	Měření směrových charakteristik vyrobených vzorků.....	59
7.2.2	Měření směrových charakteristik na fantomu .....	61
7.2.3	Měření směrových charakteristik v ohybu.....	64
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>70</b>
	<b>Literatura</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>74</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>76</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.	Model Body-Area Networks [1]; upraveno. ....	2
Obr. 2.	Základní typy vodivých vláken [4]; upraveno. ....	6
Obr. 3.	Vývojový diagram metody reverzního postupu [3]; upraveno. ....	9
Obr. 4.	Příklad mikropáskové antény [8]; upraveno. ....	9
Obr. 5.	Napájení na okraji flíčku, (a) nezapuštěné a (b) zapuštěné vedení [8]; upraveno. ....	10
Obr. 6.	Napájení pomocí koaxiální sondy [8]; upraveno. ....	11
Obr. 7.	Napájení pomocí vazební šterbiny [8]; upraveno. ....	11
Obr. 8.	Obrázek principu vybuzení kruhové polarizace pomocí dvoubodového napájení. ....	14
Obr. 9.	Amplituda a fáze ortogonálních módů u jednobodově napájené kruhově polarizované antény [8]. ....	14
Obr. 10.	Obrázek anténního flíčku s poruchovými segmenty pro vybuzení kruhové polarizace [8]; upraveno. ....	15
Obr. 11.	Schéma pletací vazby. ....	18
Obr. 12.	Struktura elektrotextilie <i>Satin 5</i> [4]; upraveno. ....	19
Obr. 13.	Řez strukturou tkané planární antény [3]; upraveno. ....	20
Obr. 14.	Příklad anténního motivu vytvořeného ručním vyšíváním. ....	21
Obr. 15.	Princip popsaného postupu sítotisku [3]; upraveno. ....	22
Obr. 16.	Princip vyleptání anténního vzoru [3]. ....	24
Obr. 17.	Grafické zobrazení mikropáskové antény. ....	26
Obr. 18.	Graf činitele odrazu na vstupu navržené antény. ....	27
Obr. 19.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při buzení portem. ....	28
Obr. 20.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při buzení koaxiálním vedením. ....	28
Obr. 21.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při buzení portem. ....	29
Obr. 22.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při buzení koaxiálním vedením. ....	29
Obr. 23.	Graf průběhu axiálního poměru v uvažovaném ISM pásmu obou typů buzení. ....	30
Obr. 24.	Principiální zobrazení řezu simulovanou strukturou. ....	31
Obr. 25.	Graf činitele odrazu na vstupu na antény v blízkosti lidské tkáně. ....	32

Obr. 26.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při zkoumání vlivu lidské tkáně.....	33
Obr. 27.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ při zkoumání vlivu lidské tkáně.....	33
Obr. 28.	Graf průběhu axiálního poměru v přítomnosti modelu lidské tkáně. ....	34
Obr. 29.	Obrázky simulovaných struktur konkávního ohybu v ose $x$ a $y$ . ....	35
Obr. 30.	Graf činitele odrazu na vstupu v závislosti na konkávním ohybu struktury. ....	36
Obr. 31.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konkávní ohyb po ose $x$ . ....	37
Obr. 32.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konkávní ohyb po ose $x$ . ....	37
Obr. 33.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konkávní ohyb po ose $y$ . ....	38
Obr. 34.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konkávní ohyb po ose $y$ . ....	38
Obr. 35.	Grafy průběhu axiálního poměru pro jednotlivé konkávní ohyby struktury. ....	39
Obr. 36.	Obrázky simulovaných struktur konvexního ohybu v ose $x$ a $y$ . ....	41
Obr. 37.	Graf činitele odrazu na vstupu v závislosti na konvexním ohybu struktury. ....	42
Obr. 38.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konvexní ohyby v ose $x$ . ....	43
Obr. 39.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konvexní ohyby v ose $x$ . ....	43
Obr. 40.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konvexní ohyb v ose $y$ . ....	44
Obr. 41.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konvexní ohyb v ose $y$ . ....	44
Obr. 42.	Grafy průběhu axiálního poměru pro jednotlivé konvexní ohyby struktury. ....	45
Obr. 43.	Obrázek simulované struktury ohybu po povrchu koule. ....	47
Obr. 44.	Graf činitele odrazu na vstupu v závislosti na ohybu po povrchu koule. ....	48
Obr. 45.	Graf vyzařovací charakteristik roviny YZ pro ohyby po povrchu koule. ....	48
Obr. 46.	Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro ohyby po povrchu koule. ....	49
Obr. 47.	Graf průběhu axiálního poměru pro simulované ohyby pro povrchu koule.....	49
Obr. 48.	Plátovaná anténa. ....	51

Obr. 49.	Anténa vyrobená pomocí elektrovodivé textilie. ....	52
Obr. 50.	Anténa vyrobená pomocí sítotisku. ....	52
Obr. 51.	Porovnávací graf činitele odrazu na vstupu pro jednotlivé technologie výroby. ....	53
Obr. 52.	Graf simulovaných $S_{11}$ konkávních ohybů. ....	54
Obr. 53.	Graf měřených $S_{11}$ konkávních ohybů plátované antény. ....	55
Obr. 54.	Graf měřených $S_{11}$ konkávních ohybů sítotiskové antény. ....	55
Obr. 55.	Graf simulovaných $S_{11}$ konvexních ohybů. ....	56
Obr. 56.	Graf měřených $S_{11}$ konvexních ohybů plátované antény. ....	56
Obr. 57.	Graf měřených $S_{11}$ konvexních ohybů sítotiskové antény. ....	57
Obr. 58.	Graf simulovaného a změřeného $S_{11}$ pro ohyb po povrchu koule. ....	57
Obr. 59.	Graf směrových charakteristik vyrobených antén v rovině YZ. ....	59
Obr. 60.	Graf směrových charakteristik vyrobených antén v rovině XZ. ....	60
Obr. 61.	Graf axiálních poměrů vyrobených antén. ....	60
Obr. 62.	Graf směrových charakteristik měřeného vlivu blízkosti fantomu v rovině YZ. ....	62
Obr. 63.	Graf směrových charakteristik měřeného vlivu blízkosti fantomu v rovině XZ. ....	62
Obr. 64.	Graf axiálního poměru měřeného vlivu blízkosti lidské tkáně. ....	63
Obr. 65.	Grafy měření konkávního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině YZ. ....	64
Obr. 66.	Grafy simulace konkávního ohybu antény u modelu tkáně v rovině YZ. ....	65
Obr. 67.	Graf měření konkávního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině XZ. ....	65
Obr. 68.	Graf měření konkávního ohybu antény u modelu tkáně v rovině XZ. ...	66
Obr. 69.	Graf axiálního poměru měřených konkávních ohybů antény na fantomu. ....	66
Obr. 70.	Graf měření konvexního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině YZ. ....	67
Obr. 71.	Graf simulace konvexního ohybu antény u modelu tkáně v rovině YZ. ....	67
Obr. 72.	Graf měření konvexního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině XZ. ....	68
Obr. 73.	Graf simulace konvexního ohybu antény u modelu tkáně v rovině XZ. ....	68
Obr. 74.	Graf axiálního poměru měřených konvexních ohybů antény na fantomu. ....	69

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.	Tabulka ISM pásem [2]; upraveno. ....	3
Tab. 2.	Tabulka vlastností vybraných textilních vzorků. ....	25
Tab. 3.	Tabulka konečných rozměrů navržené antény. ....	26
Tab. 4.	Tabulka pásma pro potlačení vstupu o 10dB. ....	27
Tab. 5.	Přehledná tabulka hodnot zjištěných simulací. ....	30
Tab. 6.	Tabulka pásma pro potlačení vstupu o 10dB. ....	32
Tab. 7.	Přehledná tabulka hodnot zjištěných simulací pro zkoumání vlivu lidské tkáně. ....	34
Tab. 8.	Tabulka pásma poklesu o 10 dB pro konkávní ohyby. ....	36
Tab. 9.	Přehledná tabulka zjištěných hodnot pro zkoumání vlivu konkávního ohybu. ....	40
Tab. 10.	Tabulka pásma poklesu o 10 dB pro konvexní ohyby. ....	41
Tab. 11.	Přehledná tabulka zjištěných hodnot pro zkoumání vlivu konvexního ohybu. ....	46
Tab. 12.	Tabulka pásma poklesu o 10 dB pro ohyb po povrchu koule. ....	47
Tab. 13.	Přehledná tabulka zjištěných hodnot pro zkoumání vlivu ohybu po kouli. ....	50
Tab. 14.	Přehledná tabulka k porovnání hodnot vyrobených antén. ....	61
Tab. 15.	Přehledná tabulka k porovnání hodnot při umístění antény k fantomu. .	63

# ÚVOD

Dnešní technologicky osvětlená doba nabízí nezměrné množství výzkumných možností. Především v elektrotechnických oborech, kde například minimalizace, výkon a schopnosti jednotlivých technologií neznají své hranice. Při nárůstu požadavku úplné konektivity mezi všemi zařízeními a různými aplikacemi v blízkosti lidského těla, jako například mobilní telefony, chytré hodinky, monitory tělesných funkcí, docházkové čipy a další, musí být jejich komunikační rozhraní, anténa, dostatečně flexibilní pro splnění všech náročných požadavků. Proto je v posledních několika letech kladen důraz na výzkum nositelných antén integrovaných do oděvu nebo přímo na lidské tělo. Jejich zaměření je ideální především pro účely monitorování zdravotního stavu uživatele anebo zajištění kompaktní konektivity všech zařízení umístěných v blízkosti lidského těla.

Cílem této práce je porovnat jednotlivé možnosti výroby antén integrovaných do oděvu. Následně pak vybrat jednu z technologií a ověřit její vlastnosti pomocí matematického modelu a měření. Dále pak prozkoumat vliv lidského těla na vlastnosti navržené struktury a vliv deformací způsobených možným ohybem kolem částí lidského těla. Vzhledem k výše zmíněné použitelnosti je nositelná anténa uvažovaná pro bezlicenční pásmo ISM 5,725 - 5,875 GHz.

První dvě kapitoly popisují komunikaci v blízkosti lidského těla a uvažované frekvenční pásmo. Dále je čtenář seznámen s problematikou nositelných antén, kde jsou shrnuty jednotlivé užívané materiály, požadavky na antény a jejich vlastnosti. Je uvedena také jedna podkapitola zaměřená na elektrické vlastnosti textilií. Čtvrtá kapitola představuje problematiku mikropáskových antén, které jsou pro nositelné antény nejvhodnější. V páté kapitole jsou popsány nejznámější technologické postupy výroby. Šestá kapitola práce se zabývá návrhem a simulací numerických modelů nositelné antény, kdy je zkoumán vliv lidské tkáně a vliv mechanických ohybů na navrženou anténu. V poslední kapitole jsou uvedeny získané výsledky provedených měření na několika typech realizovaného zařízení.

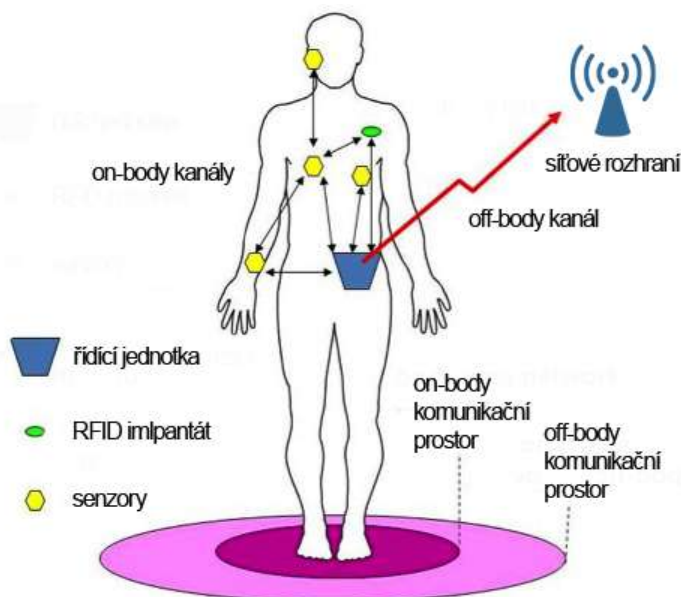
# 1 KOMUNIKACE V BLÍZKOSTI LIDSKÉHO TĚLA

Vlivem vývoje osobní nositelné techniky dochází v posledních letech k rozvoji takzvaných Body-Area Networks (BAN), což se do češtiny volně překládá jako “sítě v oblasti lidského těla“. Tyto sítě zprostředkovávají bezdrátové spojení mezi komunikujícími zařízeními v blízkosti lidského těla. Jejich nejčastější uplatnění je spojeno především se zdravotnickými a medicínskými aplikacemi určených pro sběr tělesných dat. Dále také ve vojenství, sportu a konkrétním příkladem jsou například docházkové systémy.

Základní rozdělení BAN sítí je na principu umístění komunikačních kanálů v blízkosti lidského těla:

- Off-Body: Zařízení jsou navržena tak aby mohli komunikovat od těla do volného prostoru k nadřazené sběrné jednotce. Vliv lidského těla a šíření k němu jsou často potlačovány pomocí zemnicí plochy. Zařízení jsou nejčastěji integrovány do oděvu.
- On-Body: Zařízení komunikují v těsné blízkosti těla, nejsou tedy koncipována pro záření do volného prostoru. Vhodné použití pro vertikálně polarizované antény. Jsou umísťována na lidské tělo, kdy nadřazená jednotka musí být umístěna také na těle.
- In-Body: Zařízení je implantované v lidském těle. Vlivem vysokého útlumu lidských tkání je nutno využívat nízké frekvence a komunikace je omezena jen do blízkosti lidského těla.

Pro bližší představu o rozdělení BAN sítí je přiložen jednoduchý model na obr. 1.



Obr. 1. Model Body-Area Networks [1]; upraveno.

## 2 ISM PÁSMA

Jedná se o rádiová frekvenční pásma, která se nevyužívají v telekomunikacích. ISM je anglická zkratka pro Industrial, scientific and medical radio bands. Což v českém překladu znamená “Průmyslová, vědecká a medicínská rádiová pásma“. Tyto pásma jsou bezlicenční a tedy vhodná pro nekomerční účely z oblastí, které popisuje jejich název.

ISM pásma jsou definována pomocí doporučení ITU-R Mezinárodní telekomunikační unie a jejich přidělováním a plánováním se v České republice zabývá Český telekomunikační úřad (ČTU). Tyto volná pásma mohou svými elektromagnetickými interferencemi rušit licenční pásma na stejných nebo blízkých nosných frekvencích a proto mají dle doporučení omezené svoje frekvenční pásmo a velikost vyzářeného výkonu.

Zvláštním případem ISM pásmových technologií jsou Bluetooth a Wi-Fi. Jedná se o komerční komunikační systémy, které zabývají přenosem dat vysokými rychlostmi v krátkém dosahu [2].

V tab. 1 jsou uvedena nejpoužívanější bezlicenční pásma s několika specifikačními vlastnostmi a obvyklým použitím těchto pásem. Celou přehlednou tabulku je možno si prohlédnout v příloze A.

Ozn.	Frekvenční pásmo	Vyzářený výkon / Int. mag. pole	Použití
<i>a</i>	6,765 - 6,795 MHz	42 dB $\mu$ A/10m	pevné a mobilní služby
<i>b</i>	13,553 - 13,567 MHz	42 dB $\mu$ A/10m	pevné a mobilní služby
<i>c</i>	26,957 - 27,283 MHz	42 dB $\mu$ A/10m	občanské radiostanice
<i>d</i>	40,660 - 40,700 MHz	10mW ERP	pevné a mobilní služby
<i>e</i>	138,200 - 138,450 MHz	10mW ERP	radioamatérství
<i>f</i>	433,050 - 434,790 MHz	10mW ERP	radioamatérství a radary
<i>g</i>	863,000 - 870,000 MHz	25mW ERP	radioamatérství a RFID
<i>h</i>	2,400 - 2,500 GHz	25mW EIRP	Wi-Fi, rádioamat. a mikrovlnné spoje
<i>i</i>	5,725 - 5,875 GHz	25mW EIRP	Wi-Fi, rádioamat. a mikrovlnné spoje
<i>j</i>	24,000 - 24,250 GHz	100mW EIRP	radioamatérství a radary
<i>k</i>	61,000 - 61,500 GHz	100mW EIRP	mikrovlnné spoje a radary
<i>l</i>	122,000 - 123,000 GHz	100mW EIRP	radioamatérství a mikrovlnné spoje
<i>m</i>	244,000 - 246,000 GHz	100mW EIRP	radioamatérství a radioastronomie

Tab. 1. Tabulka ISM pásem [2]; upraveno.

Ze zadání práce jasně vyplývá požadavek na ISM frekvenční pásmo *i*. Výhodou tohoto zvoleného pásmo je bezlicenční přístup vzhledem k práci na akademické půdě. Ale také možnost provázání s technologií Wi-Fi a úměrné rozměry zkoumaných zařízení vzhledem k délce vlny na této frekvenci.

## 3 NOSITELNÉ ANTÉNY

Jak už sám název napovídá, nositelné antény by měli být nedílnou součástí lidského dne. Takovéto zařízení by měli fungovat zcela nezištně ve všech situacích, do kterých člověk přichází dnes a denně. Což zahrnuje veškerý pohyb, meteorologické podmínky i rušení jinými elektromagnetickými zařízeními.

### 3.1 Základní požadavky

Návrh antény je především spojen s požadavky na pracovní frekvenci a šířku pásma, z čehož je odvozen typ a tvar anténního motivu. U nositelných antén se předpokládá větší šířka pásma vzhledem k použité aplikaci. Při vyšší míře úzkopásmovosti, by vlivem běžného používání a pohybu mohlo docházet k deformacím negativně ovlivňujícím vyzařovací charakteristiky. Proto je vhodné při návrhu vždy vycházet z jasněho určení aplikace antény, zdali bude určena pro Off-Body či On-Body komunikaci (viz kap. 1). V úvahu musí být bráno také samotné lidské tělo a oděv. Lidské tkáně a oděvní textilie mají různé elektrické vlastnosti (permitivita, ztrátový činitel atd.), které ovlivňují výsledné vlastnosti navrženého zařízení.

Správná volba materiálu a technologie výroby je nejdůležitější krok při návrhu nositelných antén. Požadavek na ohebnost, malou velikost a určitou diskretnost, při zachování stálých elektrických vlastností, je velice problematický. Dlouhodobým opakováním určitého pohybu nebo okamžitým ohnutím podél lidské končetiny může dojít k poškození či deformaci, která má téměř vždy negativní vliv na elektrické vlastnosti. Především se to týká vyzařovacích charakteristik, rozladění rezonanční frekvence a impedančního přizpůsobení zařízení. Na zařízení jsou tedy kladeny nároky nízké hmotnosti, ohýbací poddajnosti, deformační odolnosti, dostatečné pevnosti a nízké výšky, tak aby nositel nebyl nijak omezen a byly zachovány veškeré výše zmíněné nároky i elektrické vlastnosti. Bohužel některé vlastnosti přispívající ke stabilizaci elektrických parametrů jsou pro udržení komfortu uživatele nepraktické a to platí i naopak.

Důležitou konstantou při návrhu nositelných antén je určení polarizace antény. Pro On-Body antény v těsné blízkosti lidského těla je vhodnější použití antén s lineární polarizací. Tato komunikace probíhá do vzdálenosti maximálně 2 metrů a je zde potřeba uvážit určitou směrovost ke hlavní rádiové jednotce. Jak je uvedeno v kapitole 1, pro tuto aplikaci se spíše hodí antény navržené pro vertikální polarizaci. Při Off-Body komunikaci bude anténa vzhledem k pohybu nositele pokaždé natočena v jiné poloze směrem k pevné sběrné jednotce a v reálném prostředí dochází k depolarizaci vlny. Je tedy žádoucí, aby tyto aplikace ideálně měly vyzařovací úhel  $180^\circ$  ve směru od lidského těla. V tomto případě je vhodnější použití antén s kruhovou polarizací.

Posledním návrhovým krokem je vyšetření vlivu lidské tkáně a oděvu na vlastnosti navrženého zařízení. Lidská tkáň se skládá z několika vrstev (kůže, tuk atd.), kdy každá má své specifické vlastnosti a velikost. Tato různorodost vlastností ovlivňuje vyzařovací charakteristiky navrženého zařízení. Vliv oděvu je ještě podstatnější. Textil je nevodivý materiál a tudíž působí jako dielektrikum, čehož je v některých technologických postupech využíváno [1],[3].



## 3.2 Používané materiály

V této kapitole jsou uvedeny typy materiálů vhodné pro nositelné antény. Jsou zde uvedeny jejich vlastnosti a možnosti jejich použití. První zmíněné jsou vodivé materiály používané pro vyzáření elektromagnetické vlny a zajištění všech elektrických vlastností. Další skupinou jsou oděvní textilie či jiný vhodný nevodivý materiál používaný jako dielektrická vrstva a zároveň nosič antény. Vlastnosti a parametry obou materiálových skupin pak zásadně určují elektrické vlastnosti nositelné antény.

### 3.2.1 Vodivé materiály

Vlastnosti vodivých materiálů jsou určeny podle toho, zdali se jedná o samostatné vodivé vlákno určené nebo již utkanou vodivou elektrotextilií. Pro vlákno je vždy definována měrná vodivost  $\sigma$  a pro textil povrchová rezistivita  $\rho_R$ . Vodivý materiál pro nositelnou anténu může být tvořen třemi způsoby:

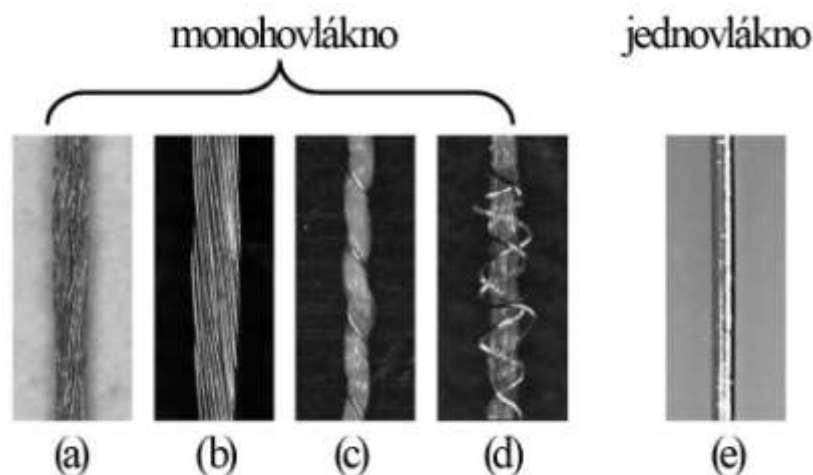
- elektrotextilem,
- elektricky vodivou barvou,
- elektricky vodivou fólií.

Elektrotextil je vodivá tkanina vyrobená kombinováním kovopolymerových vláken s vlákny běžných tkanin anebo vetkáním kovopolymerových vláken do již utkaného plátna. Takovéto tkaniny jsou pak považovány za jednoho z vhodných kandidátů určených k vytvoření nositelné antény. Měli by být dostatečně mechanicky odolné a flexibilní pro toto použití. Jejich nevýhodou může být změna elektrických vlastností vlivem opakovaného praní a čištění oděvu [4].

Vodivá vlákna jsou vyráběny třemi způsoby [4]:

- plnění vláken kovem,
- nanesení vrstvy vodivých látek na vlákno,
- vlákno z vodivého materiálu.

Vodivé vlákno je vytvořeno z jednoho vodivého vlákna anebo více vodivých vláken společně s jedním nevodivým vláknem. Na obr. 2 jsou uvedeny dva základní typy vodivých vláken. Vzorky (a)-(d) znázorňují vícevláknová řešení a vzorek (e) znázorňuje vzorek jednoho celokovového vlákna. Každý ze vzorků z obr. 2 má různé elektrické vlastnosti, jinou vhodnost užití a spolehlivost. Například celokovové vlákno (e) bude mít nejlepší elektrickou vodivost, ale z pohledu flexibility ohebnosti a poddajnosti může dojít k jeho poškození a ztrátě funkčnosti. Více vláknová řešení mají oproti jednovláknovému řešení horší elektrickou vodivost ale naopak vyšší mechanickou odolnost. Tenká vodivá vlákna jsou chráněna ovinutím kolem silného středového vlákna, což zaručuje zmíněnou vyšší mechanickou odolnost a zachovává jejich elektrické vlastnosti. Pokud je navíc středové vlákno tvořeno rozpínavějším materiálem (např. nylon), stává se celý vzorek rozpínavějším. Tato vlastnost je výhodou, protože oděvní materiály pro obvyklé nošení by měli být dostatečně pružné. Materiálem pro vodivá vlákna je nejčastěji měď a stříbro [4]. Více informací k vlastnostem vzorků z obr. 2 je možné dohledat v [4].



Obr. 2. Základní typy vodivých vláken [4]; upraveno.

Výhodou elektrotextilu je, že se jedná o hotovou látku, kterou lze použít ke standardní výrobě oděvu. Výhody jsou malá hmotnost, nízký profil, dobrá flexibilita a poddajnost. Hlavní nevýhodou je nákladnost a složitost procesu výroby elektrotextilie a nemožnost použití pro realizaci složitějších motivů.

Další možností výroby je nanesení elektricky vodivé barvy na oděv. Kromě vhodné elektrické vodivosti musí barva mít i vhodnou viskozitu, odpovídající textilu, na který bude nanášena. Pokud by vodivá barva měla viskozitu nevhodnou pro uvažovaný textil, mohlo by dojít k jejímu zatečení a prosáknutí do textilu. Což by mělo za následek narušení požadované vodivé struktury. Pro správnou funkci zařízení musí být struktura z vodivé barvy dostatečně ohybově flexibilní a nelámavá. Hlavní nevýhodou této metody je možnost zlomení při zatuhnutí vodivé barvy, které způsobí narušení elektrických vlastností vrstvy. Další nevýhodou je neurčitost hloubky prosáknutí barvy do textilu, což závisí na viskozitě. V některých místech může barva vniknout do textilu více nebo méně a způsobit nežádoucí nesymetričnost. Vodivá barva může také nevhodný textil naleptat a změnit tím jeho vlastnosti [3].

Poslední možností je použití elektricky vodivých fólií. Jedná se o nejsnazší přístup výroby vodivé části antény. Fólie je tvořena přímo z vodivého materiálu (nejčastěji měď) bez dalších příměsí. Fólie se na textil nanášejí pomocí speciálních vodivých lepidel anebo se nažehlují. Výhodou tohoto materiálu jsou vynikající elektrické vlastnosti. Nevýhodami naopak nízká odolnost vůči ohybu, stříhu a mechanickému působení na povrch [3].

### 3.2.2 Nevodivé materiály

V tomto případě je za nevodivý materiál považován textil, na který se nanáší vodivá vrstva. Je zde požadavek na stálost elektrických vlastností při mechanické deformaci, změně teploty i vlhkosti okolí. Textil je obecně požadován za nevhodný materiál pro dielektrikum. Vyznačuje se nehomogenními a neizotropními vlastnostmi, které anténním aplikacím nevyhovují. Textil se vyznačuje proměnou výškou, nasákavostí a rozpínavostí, což způsobí nestabilitu elektrických vlastností. Volbou vhodného textilu a prozkoumáním jeho chování v určitých situacích lze textil jako dielektrikum použít.

Nejčastěji používaným materiálem v oděvnictví je bavlna. Do ní jsou pro různé druhy látek přidávány příměsi syntetických materiálů, jako například polyester, elastan, hedvábní, viskóza atd. Pro průmyslové a pracovní oděvy především polyesterová a polyamidová vlákna, která zaručují dostatečnou pevnost, pružnost a odolnost látky. Hodnota relativní permitivity  $\epsilon_r$  textilních látek se pohybuje mezi 1 až 2,5. Hodnota ztrátového činitele  $\tan \delta$  pro syntetické látky je v rozmezí 0,002 až 0,008, pro čistou bavlnu je ale výrazně vyšší ( $< 0,03$ ). Takto velký ztrátový činitel může být pro anténní aplikace nevhodný, ale kombinováním se syntetickými příměsemi lze ztrátový činitel snížit na akceptovatelné hodnoty. Textil má tu nevýhodu, že je u něj obtížné zajistit stabilní elektrické vlastnosti. Vlivem mechanického působení se látka roztahuje či smršťuje, což způsobuje změnu výšky a změnu vzduchových mezer v látce, které výrazně ovlivňují relativní permitivitu tkaniny [3], [5].

### 3.3 Měření základních parametrů textilu

Pro správný návrh a simulaci anténního zařízení je třeba stanovit vlastnosti vybraného textilu, na kterém bude zařízení umístěno. Nejdůležitější pro správný návrh je stanovení relativní permitivity  $\epsilon_r$  zvoleného textilu. Pro důvěryhodnější výsledky simulace navrženého zařízení je vhodné určit i hodnotu ztrátového činitele  $\tan \delta$ . Hodnota relativní permitivity a tloušťky textilu má výrazný vliv posun rezonanční frekvence navrhovaného zařízení. Vlastnosti a parametry textilních látek se výrazně liší dle výrobce, výrobní technologie a kombinací použitých materiálů vláken. Jelikož výrobci zpravidla neuvádějí výše zmíněné vlastnosti je nutné jejich určení.

V této kapitole jsou pro přehled uvedeny doporučené metody pro měření elektrických vlastností textilních materiálů [5]:

- metoda paralelních desek,
- metoda přenosového vedení,
- měření v dutinovém rezonátoru,
- sonda s otevřeným koncem,
- měření ve volném prostoru,
- metoda reverzního určení.

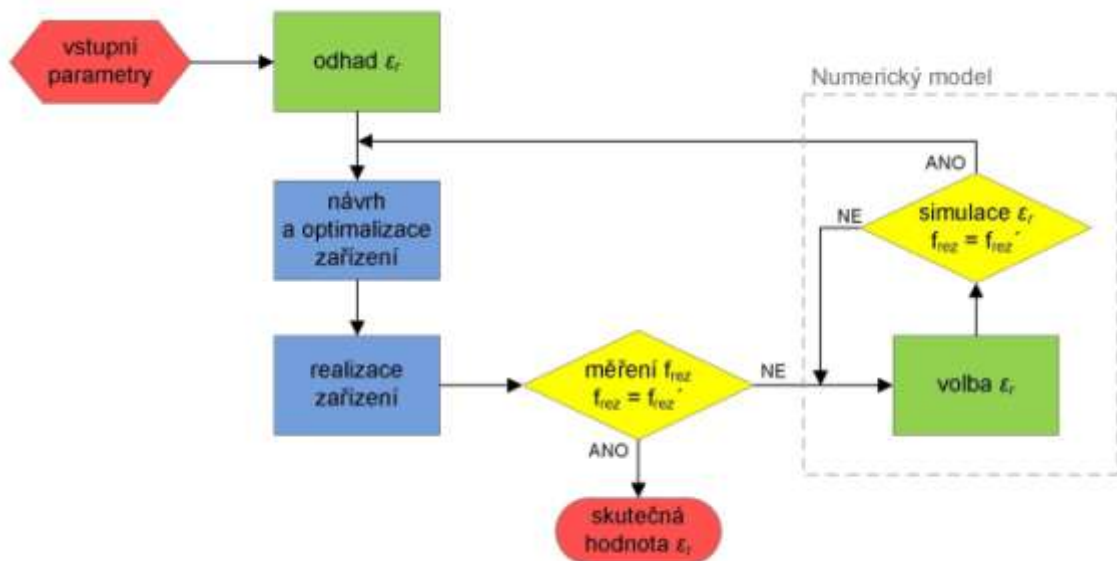
Při měření pomocí sondy otevřeným koncem je sonda přiložena na měřený textil. Relativní permitivita se pak stanoví ze změřeného činitele odrazu na vstupu pomocí vektorového síťového analyzátoru (VNA). V této metodě je požadavkem nutnost přesné kalibrace měřící sondy. Nepřesnost měření může být způsobena nevhodným kontaktem s měřeným materiálem. Pokud je kontakt nedokonalý, dochází k nepřesnému měření vznikem vzduchových mezer. Vykompenzovat to lze mírným přitlačením sondy na měřený materiál, přičemž u textilních materiálů dojde k jejich stlačení a opět dojde k nepřesnému změřenému požadovanému parametru. Sondou může být koaxiální vedení nebo vlnovod. Chybovost této metody je okolo 3% a stoupá se zvyšujícím se kmitočtem a snižujícím s průměrem koaxiálního kabelu [5], [6].

Princip metody měření ve volném prostoru je založen na měření S-parametrů vzorku umístěného kolmo mezi dvě identické referenční antény, které jej ozařují. Nejpoužívanějším typem zářičů pro tuto metodu jsou trychtýřové antény připojené na VNA. Velikost měřeného vzorku musí být větší než šířka vyzářeného svazku elektromagnetické energie z důvodu potlačení vlivu difrakce na hranách měřeného vzorku. Difrakce se také projevuje na hranách referenčních antén. K eliminaci difrakcí se používají fokusované ozařující svazky, které se vytvářejí pomocí čoček nebo konkávních zrcadel. Výhod této metody je několik. První výhodou je možnost měření velice širokých vzorků. Další výhodou je pozorování měřených vlastností v závislosti na změně parametrů prostředí (vlhkost, teplota atd.). Poslední výhodou je skutečnost, že měřený vzorek nepřichází po celou dobu měření do kontaktu s žádným měřicím nástrojem, tudíž nedochází k žádnému mechanickému působení nebo deformaci. Tato vlastnost je pro měření na textilních materiálech velice důležitá. Přesnost této metody je menší než u metody dutinového rezonátoru, její chybovost je do 1,5%. Dle výše zmíněných vlastností je toto měření uváděno jako nejvhodnější metoda pro určování relativní permitivity u textilních materiálů [5], [6], [7].

Poslední zmíněnou metodou je zjištění relativní permitivity pomocí reverzního určení z již vyrobeného anténního vzorku. Tento postup je velice platný pro úzkopásmová zařízení, kde je relativní permitivita jedinou neznámou konstantou zamýšlené struktury. U materiálů neobsahujících bavlnu, kde se neočekává vysoká hodnota  $\tan \delta$  (viz kap. 3.2.2), lze zanedbat i tuto neznámou vlastnost. Nevýhodou je nutnost výroby minimálně jednoho výchozího referenčního vzorku. Výraznou výhodou této metody je její jednoduchost a snadné měření [3].

Postup určení relativní permitivity pomocí reverzního určení:

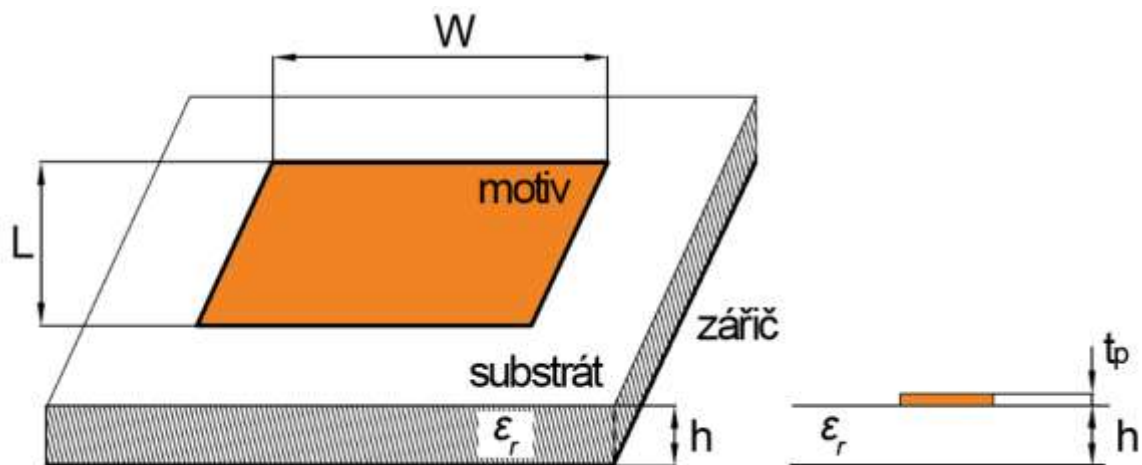
1. Pro návrh zařízení je za relativní permitivitu  $\epsilon_r$  dosazena předpokládaná hodnota.
2. Je proveden návrh uvažovaného zařízení pro požadované výstupní parametry (rezonanční frekvence, šířka pásma atd.) a jeho optimalizace pomocí vhodného počítačového software.
3. Navržený vzorek zařízení je vyroben a pomocí VNA je změřen parametr činitele odrazu  $S_{11}$ , ze kterého je zjištěna skutečná rezonanční frekvence  $f_{rez}$  vyrobeného zařízení.
4. Pokud je  $f_{rez}'$  vyrobeného zařízení jiná než požadovaná  $f_{rez}$  z návrhu zařízení, platí: pokud  $f_{rez}' > f_{rez}$  potom skutečná hodnota  $\epsilon_r' < \epsilon_r$  a naopak.
5. Simulací numerického modelu je následně rozmítána hodnota relativní permitivity tak, aby  $f_{rez} = f_{rez}'$ . Za předpokladu ideálních podmínek odpovídá vyšetřená hodnota skutečné relativní permitivitě materiálu.
6. S vyšetřenou hodnotou je proveden opakovaný návrh zařízení, první iterace. Zařízení je následně vyrobeno podle nového návrhu.
7. Je zjištěna rezonanční frekvence nového zařízení pomocí VNA. Pokud neplatí  $f_{rez}' = f_{rez}$ , je nutno provést opětovné určení relativní permitivity podle postupu od bodu 4.



Obr. 3. Vývojový diagram metody reverzního postupu [3]; upraveno.

## 4 MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY

Nejčastěji používaným typem antén pro nositelná zařízení jsou mikropáskové flíčkové antény. V této kapitole je uveden stručný přehled o způsobu jejich napájení a vybraných vlastnostech. Mikropáskové antény se tvoří pomocí nanesení vodivého materiálu na vhodný dielektrický substrát. Nejčastějším motivem flíčku jsou rovinné obrazce jako čtverec nebo obdélník, méně užívané motivy jsou kruh, elipsa, trojúhelník apod. Spodní stranu nosného substrátu tvoří zemní plocha, která funguje jako reflektor. Tato plocha má nulový potenciál a omezuje vyzařovací diagram pouze do směru k anténě. Příklad mikropáskové antény buzené mikropáskovým napájecím vedením je zobrazen na obr. 4.



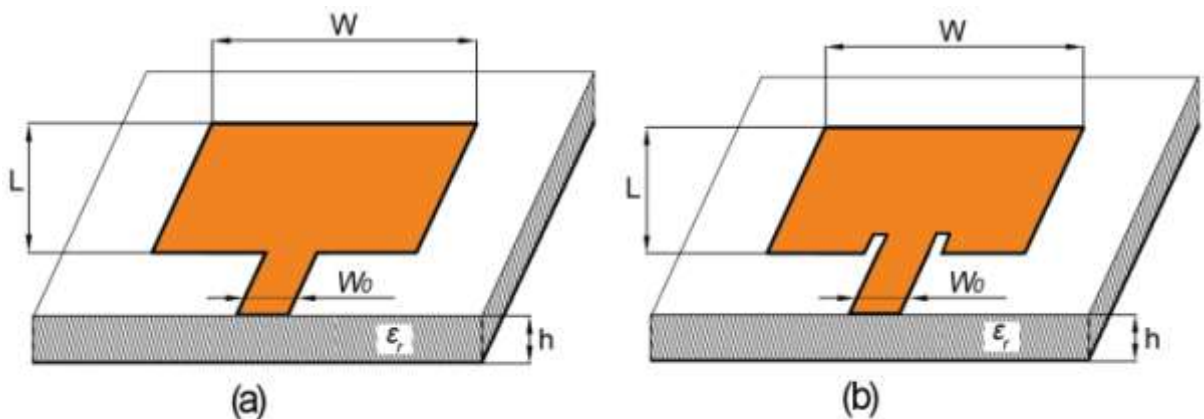
Obr. 4. Příklad mikropáskové antény [8]; upraveno.

## 4.1 Napájení mikropáskových antény

Napájení mikropáskových antén se dělí na dvě základní kategorie a to podle způsobu buzení na přímé (galvanické) a nepřímé (zprostředkované elektromagnetickou vazbou). Přímým napájením se uvažuje vodivé spojení mikropáskového vedení na okraj navrženého anténního flíčku nebo buzení pomocí koaxiální sondy. Napájení pomocí elektromagnetické vazby jsou různorodá. Nejčastější je buzení pomocí vazební štěrbinu mikropáskového vedení nebo buzení flíčku blízkým elektromagnetickým polem. Zmíněné způsoby napájení lze mezi sebou kombinovat. Příkladem budiž napájení jednoho flíčku pomocí koaxiální sondy a další flíček nad ním je buzen elektromagnetickou vazbou. Napájení je nedílnou součástí antény, a proto se musí jeho vhodný výběr provést již při samotném počátku návrhu vzhledem k aplikaci a použití antény.

### 4.1.1 Napájení na okraji flíčku

Napájení na okraji flíčku je základní napájecí metoda. K okraji flíčku je galvanicky připojeno mikropáskové vedení, které je vyrobeno již přímo se samotným motivem flíčkové antény. Jedná se o nejjednodušší konstrukční řešení napájení. Velikost vstupní impedance lze měnit pomocí šířky napájecího vedení a polohou připojení vedení podél jedné ze strany flíčku. Na okraji flíčku je však impedance vysoká a proto je nejčastěji vedení umístěno uprostřed strany. Nejvhodnější impedance přizpůsobení je pomocí vnořené vedení do mikropáskové antény, přiblížením ke středu antény obvykle impedance klesá. Nevýhodou mikropáskového napájení je nežádoucí vyzařování napájecího vedení, které může ovlivnit výslednou charakteristiku směrového diagramu [8], [9], [10]. Názorná ukázka napájení na okraji flíčku je uvedena na obr. 5.

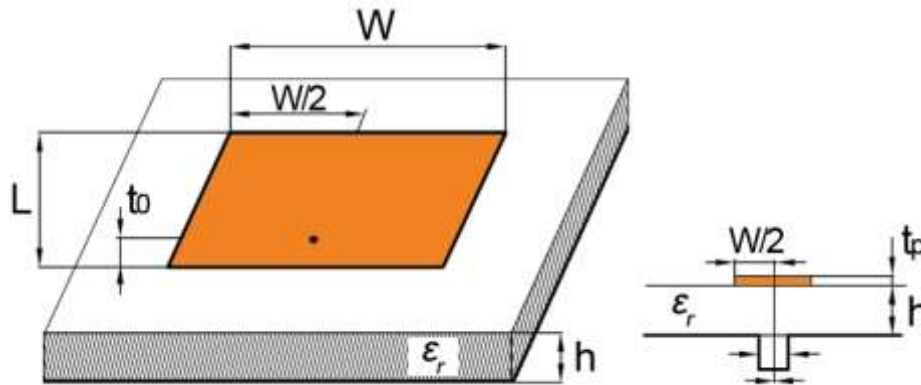


Obr. 5. Napájení na okraji flíčku, (a) nezapuštěné a (b) zapuštěné vedení [8]; upraveno.

### 4.1.2 Napájení koaxiální sondou

Napájení koaxiální sondou je druhý nejpoužívanější způsob napájení mikropáskových antén. Střední vodič koaxiálního vedení prochází zespod skrz zemnicí plochu a je galvanicky připojen k motivu mikropáskové antény. Stínící plášť koaxiálního vedení je spojen se zemnicí plochou. Umístění připojení středního vodiče

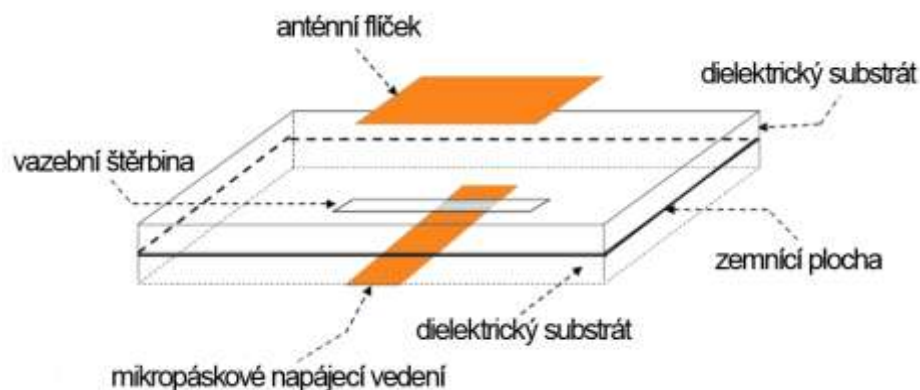
uvnitř flíčku určuje vstupní impedanci antény podobně jako u napájení mikropáskovým vedením. Výhodou použití tohoto napájení je minimalizace nežádoucího vyzařování napájecího vedení. Je zde nutnost uvážení vzniku vazby mezi napájecím vedením a elektrickým polem mezi flíčkem a zemnicí plochou, kdy takto vzniklá vazba ovlivní imaginární složku impedance antény [8], [9], [10]. Na obr. 6 je uvedena názorná ukázka napájení pomocí koaxiální sondy.



Obr. 6. Napájení pomocí koaxiální sondy [8]; upraveno.

#### 4.1.3 Napájení pomocí vazební štěrbin

Napájení pomocí vazební štěrbin je příklad bezkontaktního napájení mikropáskové antény. Na obr. 7 je uvedena jednoduchá třívrstvá struktura takového napájení. Desky dielektrického substrátu jsou odděleny pomocí zemnicí plochy. Anténa je napájena pomocí vzájemné vazby s mikropáskovým vedením na spodní straně dolního substrátu skrz vazební štěrbinu na zemnicí ploše. Takto použité napájení umožňuje samostatný návrh napájecího vedení i samotné antény, což usnadňuje optimalizaci. Maximální vazba nastane pouze v případě, kdy na sebe budou mikropásek a anténa kolmé. Účinnost vazby je dána polohou napájecího vedení a vazební štěrbinou vzhledem k flíčku. Nevýhodou tohoto typu napájení je vyzařování zpětného laloku a nárůst výšky zařízení zdvojením vrstvy substrátu. Tento typ napájení je velmi rozšířen především pro snadnější integraci s aktivními zařízeními [8], [9], [10].



Obr. 7. Napájení pomocí vazební štěrbin [8]; upraveno.

## 4.2 Základní parametry mikropáskových antén

Každé zařízení lze popsat pomocí výstupních parametrů udávající jejich vlastnosti. Tato kapitola přibližuje nejdůležitější parametry mikropáskových antén.

Vstupní impedanci lze naměřit na vstupním portu antény. Skládá se z odporu záření  $R_{\Sigma}$ , ztrátového odporu  $R_{ztr}$  a reaktance záření  $X_{\Sigma}$ . Celkový odpor záření společně s reaktancí záření tvoří vstupní impedanci. Vzhledem k tomu, že tato impedance je proměnná, transformuje se pomocí vhodné tloušťky mikropáskového napájení nebo vhodně umístěnou koaxiální sondou na obecně užívané hodnoty impedance 50  $\Omega$ , 70  $\Omega$  nebo 120  $\Omega$  [9].

Impedanční šířka pásma je definována jako kmitočtový interval, ve kterém do antény vstupuje 90% přiváděné energie. Takovéto situaci odpovídá poměr stojatých vln přibližně rovný dvěma, což odpovídá velikosti činitele odrazu -10 dB [9].

Činitel směrovosti  $D$  popisuje, do kterých směrů anténa vyzařuje. Činitel je větší než jedna ve směrech, do nichž je soustředěno záření, a menší než jedna ve směrech, v nichž je chtěné záření potlačit. Všesměrové zářiče mají ve všech směrech činitel směrovosti roven jedné. Pro anténu s výrazným hlavním lalokem a potlačenými bočními laloky se používá vztah [10]

$$D_{MAX} = \frac{35000}{2\theta_E \cdot 2\theta_H}, \quad (1)$$

kde  $\theta_E$  je vyzařovací úhel v rovině  $E$  a  $\theta_H$  je šířka vyzařovací úhel v rovině  $H$ .

Směrová charakteristika je grafické vyjádření směrových vlastností antény. Směrové vlastnosti se určují ve formě absolutní hodnoty podílu elektrické intenzity vyzařovaného vlnění v daném směru a nejvyšší hodnoty intenzity vyzařovaného vlnění ve vzdáleném poli antény. Směrové charakteristiky se vykreslují pro danou rovinu uvažovanou k poloze antény [10].

Účinnost antény je definována jako poměr vyzářeného výkonu k příkonu. Dobrá účinnost antény je podmíněna malým ztrátovým odporem vztaheným k vstupnímu proudu  $R_{\Sigma vst}$  nebo velkým odporem záření  $R_{ztr}$ . Účinnost je u antén definována jednoduchým vztahem [10]:

$$\eta = \frac{R_{\Sigma vst}}{R_{\Sigma vst} + R_{ztr}}. \quad (2)$$

Zisk antény je kombinovaným parametrem vyjadřujícím směrovost a účinnost antény k porovnání s vhodnou referenční anténou. Zisk se používá pro směr s maximálním vyzařovacím lalokem. Nejčastěji je udáván v decibelové míře. Pro mikropáskovou anténu je zisk definován vztahem [10]:

$$G_{ABS} = \eta D_{MAX}. \quad (3)$$



Polarizace antény specifikuje orientaci vyzařovaného vektoru intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  ve směru šíření vzhledem k definované rovině. Obecně se uvažují dva typy polarizace vlny, lineární nebo kruhová.

Lineární polarizaci má vlna, která má během celé svojí periody stále stejný směr vektoru  $\vec{E}$ . Je-li vektor okamžité hodnoty intenzity znázorněn šipkou, pak se její délka mění během půlperiody od nuly do maxima a zpět. Během druhé půlperiody se opakuje totéž pouze s opačným směrem orientace. Uvažuje-li se vztahovou rovinou zemský povrch, pak je pro vlnění v kolmém směru používán termín horizontálně polarizovaná vlna a pro rovnoběžné vlnění užíván termín vertikálně polarizovaná vlna [9].

Vektor intenzity elektrického pole kruhově polarizované vlny mění během celého průběhu periody svůj směr. Šipka znázorňující okamžitou hodnotu intenzity pole se během periody otáčí a současně mění svou délku tak, že se koncový bod pohybuje po kružnici. Celý obvod kružnice oběhne právě za jednu periodu. Kruhová polarizace může být pravotočivá nebo levotočivá, smysl otáčení se určí podle pohledu ve směru šíření. Pro kruhovou polarizaci je definován parametr osový poměr  $AR$  (z anglického Axial Ratio), který vyjadřuje vztah mezi maximálním a minimálním vektorem intenzity elektrického pole  $E$  během jedné periody. Často se uvádí v decibelové míře [9]. Osový poměr je dán vztahem [10]:

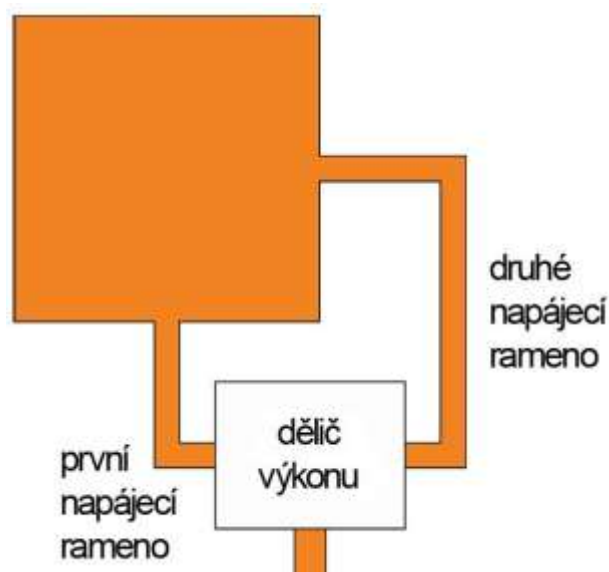
$$AR = \frac{E_{MAX}}{E_{MIN}}. \quad (4)$$

### 4.3 Generování kruhově polarizované vlny

Pro vybudění kruhově polarizované vlny na mikropáskové anténě musí být současně vybuděny dva ortogonální módy se stejnou amplitudou a se vzájemným fázovým rozdílem  $\pm 90^\circ$ . Znaménko určuje smysl otáčení. Těchto požadavků lze docílit pomocí dvou způsobů. Prvním je buzení ve dvou místech naráz a druhým způsobem je konstrukční narušení flíčku.

#### 4.3.1 Dvoubodové napájení

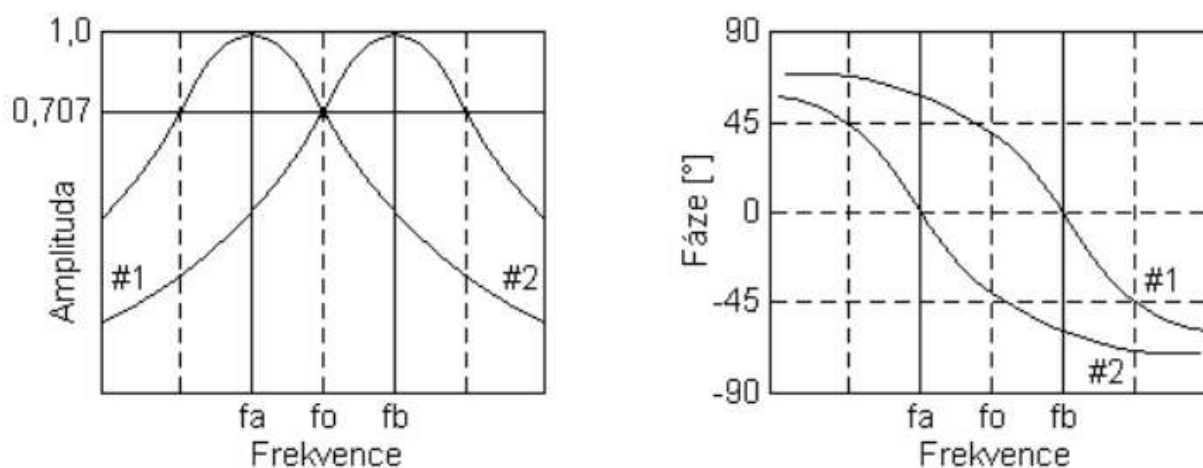
Ortogonálního buzení se dosáhne využitím výkonového děliče a neshodně dlouhého napájecího vedení, pomocí kterých se dosáhne  $90^\circ$  posunu fáze v jednotlivých napájecích ramenech. Flíček je buzen ve středu dvou na sebe kolmých stěnách. Nejčastějším zařízením pro buzení kruhové polarizace je Wilkinsonův výkonový dělič, který má 3 dB pokles v obou ramenech [9]. Na obr. 8 je uvedeno principiální zobrazení dvoubodového napájení.



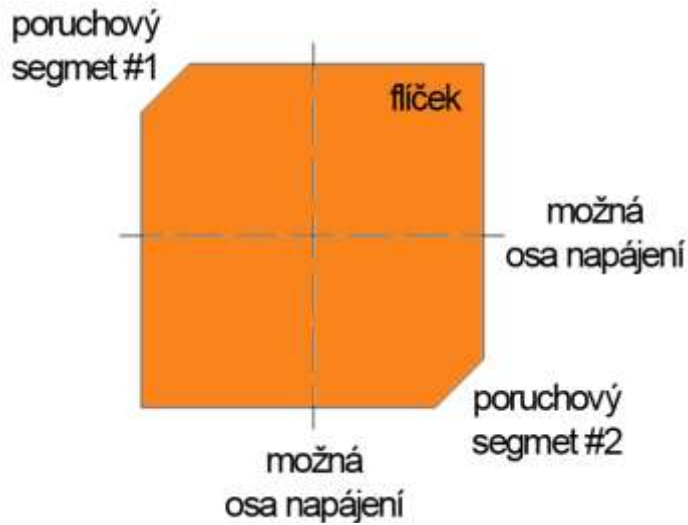
Obr. 8. Obrázek principu vybuzení kruhové polarizace pomocí dvoubodového napájení.

### 4.3.2 Napájení v jednom bodě

Tento způsob je vhodnější pro ušetření prostoru v okolí anténního flíčku. Pro generování kruhové polarizace musí být opět splněny podmínky uvedené v úvodní části této kapitoly. Pro splnění těchto podmínek se do výchozího tvaru zářiče zavádějí tzv. poruchové segmenty, vhodně umístěné vůči napájecímu bodu. Tento princip degeneruje základní rezonanční mód a degraduje ho na dva ortogonální módy (obr. 9). Na rezonančním kmitočtu vznikne stejně velká amplituda fázově posunutých módů (kruhová polarizace) [9]. Zavedení poruchových segmentů do zářiče je zobrazeno na obr. 10.



Obr. 9. Amplituda a fáze ortogonálních módů u jednobodově napájené kruhově polarizované antény [8].



Obr. 10. Obrázek anténního flíčku s poruchovými segmenty pro vybuzení kruhové polarizace [8]; upraveno.

#### 4.4 Návrhové vzorce mikropáskových antén

Níže v této části kapitoly 4 jsou uvedeny výpočtové vzorce pro základní návrh mikropáskové antény s kruhovou polarizací. Souhrn těchto vzorců vychází z uvedených postupů v [3], [9] a [10].

Rozměry flíčkové antény se určí pomocí následujících vztahů, pro šířku flíčku  $w$  platí:

$$w = \frac{c_0}{2 \cdot f_{rez} \cdot \sqrt{\varepsilon_r + 1}} \quad [\text{m}], \quad (5)$$

kde  $c_0$  je rychlost světla ve vakuu,  $f_{rez}$  je požadovaná rezonanční frekvence a  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita substrátu. Rozměr délky flíčku  $l$  se získá následovně:

$$l = \frac{c_0}{2 \cdot f_{rez} \cdot \sqrt{\varepsilon_{reff}}} - 2\Delta l \quad [\text{m}], \quad (6)$$

kde  $\varepsilon_{reff}$  je efektivní relativní permitivita a  $\Delta l$  představuje zkrácení rezonanční délky flíčku. Zkrácení se používá pro potlačení malé rozptylové kapacity vznikající na otevřených koncích flíčku. Zkrácení  $\Delta l$  je definováno jako:

$$\Delta l = h \cdot 0,412 \cdot \frac{(\varepsilon_{reff} + 0,300) \cdot \left(\frac{w}{h} + 0,264\right)}{(\varepsilon_{reff} - 0,258) \cdot \left(\frac{w}{h} + 0,813\right)} \quad [\text{m}], \quad (7)$$

kde  $h$  je výška dielektrického substrátu a  $\varepsilon_{reff}$  je efektivní relativní permitivita.

Efektivní relativní permitivita  $\varepsilon_{eff}$  je dána vztahem:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r}{2} + \frac{\varepsilon_r}{2} \cdot \sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{w}} \quad [-]. \quad (8)$$

Dále je potřebné určit celkovou plochu poruchových segmentů. Výpočet plochy poruchových segmentů je dán vztahem:

$$\Delta S = \frac{S}{2 \cdot Q} \quad [\text{m}^2], \quad (9)$$

kde  $\Delta S$  je celková plocha poruchových segmentů,  $S$  je celková plocha anténního flíčku a  $Q$  je činitel jakosti.

Vzorec pro výpočet činitele jakosti  $Q$  je:

$$Q = \frac{PSV - 1}{BW_{rez} \cdot \sqrt{PSV}} \quad [-], \quad (10)$$

kde  $PSV$  je poměr stojatých vln a  $BW_{rez}$  je rezonanční šířka pásma. Pro určení rezonanční šířky pásma  $BW_{rez}$  je nutné znát požadovanou pracovní šířku pásma  $BW$  a její krajní kmitočty  $f_l$  a  $f_h$ . Vzorec výpočtu je uveden níže:

$$BW_{rez} = \frac{f_h - f_l}{\sqrt{f_h \cdot f_l}} \quad [\text{Hz}]. \quad (11)$$

Pro určení poměru stojatých vln  $PSV$  je nutná znalost požadované hodnoty činitele odrazu na vstupu  $S_{11}$  navrhovaného zařízení. Při znalosti této hodnoty platí:

$$PSV = \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad [-]. \quad (12)$$

Nakonec je nutno určit velikost napájecího pásku pro čtvrtvlnný transformátor, který vybudí anténu ve fázi  $45^\circ$  tak, aby poruchové segmenty správně vybudili kruhovou polarizaci. Nejprve je nutno určit hranový odpor  $R_{edge}$  antény pomocí vzorce:

$$R_{edge} = \frac{1}{G} \quad [\Omega], \quad (13)$$

kde  $G$  je vodivost antény.

Elektrická vodivost antény  $G$  je dána vztahem:

$$G = \frac{w}{120 \cdot \lambda_0} \cdot \left(1 - \frac{(k \cdot h)^2}{24}\right) \quad [S], \quad (14)$$

kde  $\lambda_0$  je vlnová délka a  $k$  je pomocná konstanta. Vlnová délka  $\lambda_0$  se určí ze známého vzorce:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_{rez}} \quad [m]. \quad (15)$$

Pomocná konstanta pak pomocí vztahu:

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \quad [-]. \quad (16)$$

Délka pásku čtvrtvlnného transformátoru  $l_{\lambda/4}$  je dána délkou vlny v substrátu  $\lambda$ . Délka přizpůsobovacího pásku je určena pomocí vzorců:

$$\lambda = \frac{c_0}{f_{rez} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} \quad [m], \quad (17)$$

$$l_{\lambda/4} = \frac{\lambda}{4} \quad [m]. \quad (18)$$

Odpor čtvrtvlnného transformátoru  $R_{\lambda/4}$  se pak určí pomocí hranové odpor  $R_{edge}$  a požadované vstupní odpor  $R_{in}$ . Vzorec pro určení tohoto odporu je:

$$R_{\lambda/4} = \sqrt{R_{in} \cdot R_{edge}} \quad [\Omega]. \quad (19)$$

## 5 TECHNOLOGIE VÝROBY

Mikropáskové antény jsou nejvhodnější volbou pro výrobu nositelných antén. Jsou rozměrově malé, nízkoprofilové, návrhově nenáročné, textil lze použít jako dielektrický substrát a svými vlastnostmi je vhodný pro BAN aplikace (viz kap. 1). Tato kapitola pojednává o několika základních způsobech výroby mikropáskových nositelných antén. Základní rozdělení je na technologie výroby pomocí vodivých vláken a technologie výroby pomocí souvislé vrstvy vodivého materiálu.

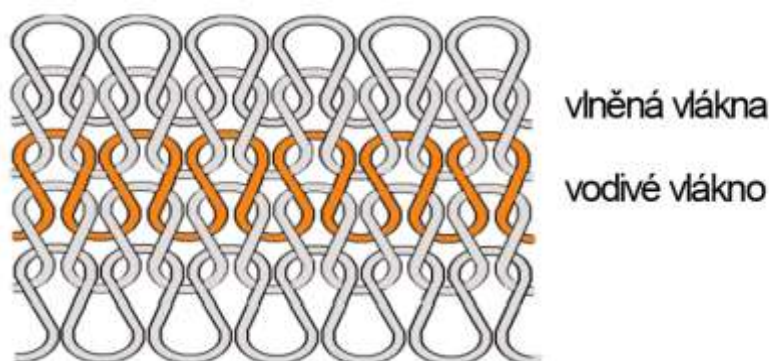
### 5.1 Technologie výroby s použitím vodivých vláken

V této kapitole jsou popsány metody výroby elektricky vodivého textilu, který se používá pro výrobu nositelných antén. Elektrotextilové antény mají výhodu v úplné integraci do oděvu, který z nich může být přímo vyroben. Nevýhodou je naopak určitá složitost jejich buzení. Neexistuje totiž celistvá vodivá plocha, ke které může být jednoduše připojen napájecí vstup.

#### 5.1.1 Pletení

Pletení je způsob, jak z vlnové příze pomocí dlouhých jehlic upléci textilní vzor. Takto vytvořené textilní látky jsou mechanicky velmi flexibilní, což je způsobeno velice nízkou hustotou vzoru pletení. Základní strukturou pletení je proplétání jednotlivých vláken do kliček, vlákna se navzájem kříží, čímž vzniká tzv. očko. Vytvořením většího počtu řad těchto oček vznikne pletenina. Pletenina může být vytvářena jak ručně tak i strojově. Na obr. 11 je uveden pletací vzor.

Pletené motivy mají velké ztráty způsobené nehomogenním povrchem, což je především způsobeno meandrovým ohybem vlákna. Vodivé cesty v této struktuře sice existují ve všech směrech přes vodivá vlákna společně s kontaktními spoji přes vlákna. Vodivost těchto proudových cest není ve všech směrech uniformní. Elektrická spojení vzájemným kontaktem vodivých vláken mají větší ztráty než elektrická spojení přímo přes vodivé vlákno [4].



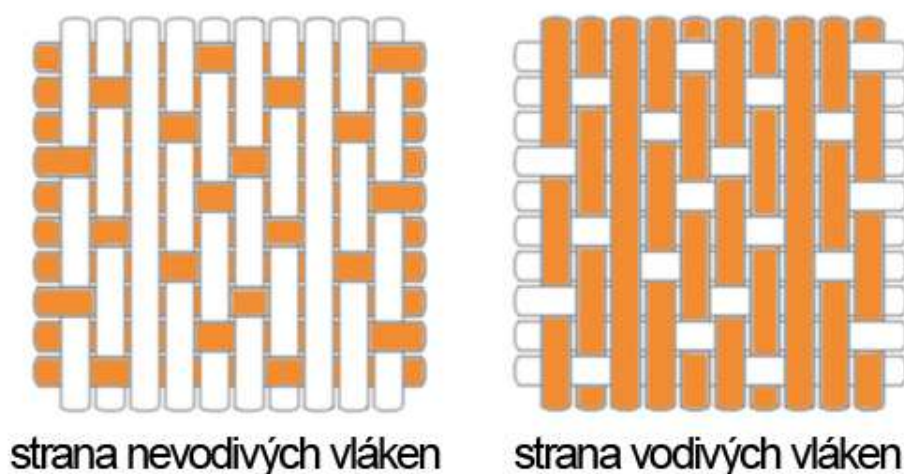
Obr. 11. Schéma pletací vazby.

## 5.1.2 Tkaní

Jedná se o proces výroby látek, kde se přes sebe opakovaně kříží podélná a příčná vlákna. Nejjednodušší provedení je křížení příčných a podélných vláken v poměru 1:1. Princip tkaní je následující, v první fázi jsou zdvižena lichá podélná vlákna tak, aby vznikl prostor, kterým se následně provleče příčné vlákno. V následujícím kroku jsou zdvižena sudá podélná vlákna a příčné vlákno je mezerou provlečeno zpět. Takto vzniká křížový tkací vzor. U jiného tkacího poměru se vždy pozvedá větší skupina nití. Tato technologie výroby je spíše vhodná pro velká plátna neboť se jedná o čistě strojovou techniku výroby tkanin.

Vzhledem k rozdílným technologickým postupům tkaní, které nejsou primárně určeny k vytváření elektrotextilu, mohou mít takto vytvořené elektrotkaniny různé elektrické parametry. Elektrotextil může být utkaný buď pouze z vodivých vláken, nebo z vodivých vláken v podélném nebo příčném směru. Pro účely planárních antén se vždy používá definovaný poměrový vzor podélných a vodivých vláken. Tento poměr je definován tak, aby jedna strana textilie byla s větším počtem nevodivých nití a druhá strana, označována jako vodivá, s vyšším počtem vodivých nití na povrchu [4].

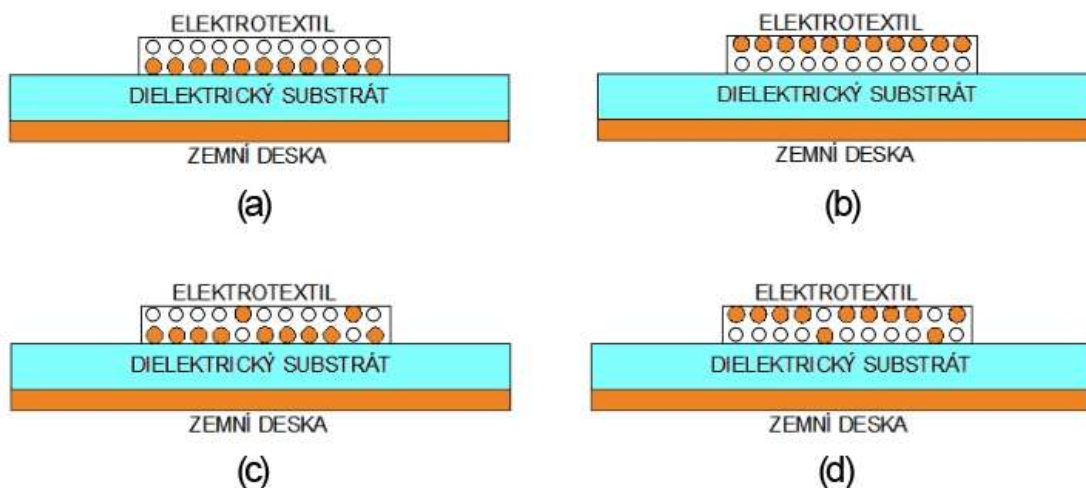
Elektrotextilie jsou nečastěji definovány právě poměrem vodivých a nevodivých vláken tkaného výpletu a hustotou vodivých vláken na uvažovanou jednotku plochy. Obr. 12 znázorňuje vzor tkaní elektrotextilie *Satin 5* s poměrem vodivých a nevodivých vláken 4:1 [4].



Obr. 12. Struktura elektrotextilie *Satin 5* [4]; upraveno.

Na obr. 13 je zobrazeno několik struktur vodivých tkaných látek v příčném řezu. Paralelně uspořádané kružnice znázorňují vlákna, vybarvená jsou vlákna vodivá a ostatní jsou nevodivá. Jednotlivá uspořádání mají různý vliv na míru ztrát v dielektriku. Vzorek (a), kde je vodivá vrstva elektrotextilu umístěna pod nevodivou přímo na substrátu, se většina elektrické intenzity soustřeďuje pouze do substrátu. V tomto případě jsou ztráty v nevodivých vláknech minimální. V případě, kdy je na substrát umístěna nevodivá vrstva elektrotextilu (obr. 14b), je větší vliv elektrické intenzity v oblasti nevodivých vláken a tudíž jsou ztráty výraznější. Na základě

těchto předpokladů stojí tvrzení, že v případě reálného tkaného vzoru z obr. 14c, kde počet vodivých vláken umístěných přímo na substrát převažuje nad počtem nevodivých vláken, je situace podobná jako v případě na obr. 14a. Měl by tedy platit předpoklad, že dielektrické ztráty budou v tomto případě nižší než při použití vzoru z obr. 14d, kde se opět uplatní dielektrické ztráty vlivem nevodivých vláken [3], [4].



Obr. 13. Řez strukturou tkané planární antény [3]; upraveno.

TenQ to typ výroby je vhodný spíše pro velké plochy elektrotextilu, tudíž větší vodivé motivy (např. Faradayova klec). Problémem je, ale výroba menších anténních motivů, kdy je nutné vystříhnout z elektrotextilie požadovaný motiv. Jelikož podélná a příčná vlákna drží pohromadě díky vzájemnému kontaktu, dojde po stříhu k samovolnému páření jednotlivých vláken, což může způsobit změnu elektrických vlastností. Ošetření krajů pomocí prošitého ohybu nebo nevodivého lepidla má obdobný vliv na elektrické vlastnosti.

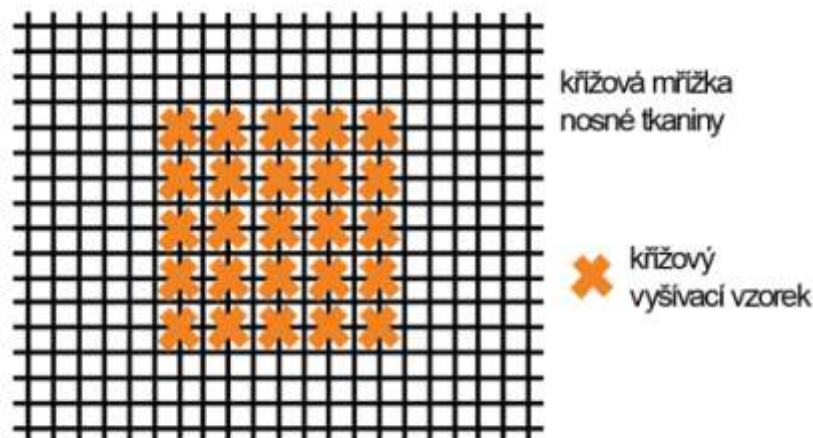
### 5.1.3 Vyšívání

Vyšívání je založeno na provlékání vodivého vlákna do nosné textilie. Nosný nevodivý materiál je standardně utkán křížovým vzorem a do něj je ručně nebo pomocí stroje vetkána požadovaná vodivá struktura tvořená vodivými vlákny. Na obr. 14 je uveden princip vyšívání.

Vyšíváním je možno dosáhnout menších a strukturovanější vodivých motivů. Vyšítím křížového motivu lze napodobit větší anténní strukturu a snížit tak náklady na použitý vodivý materiál. Výběrem vhodné hustoty mřížky vzoru je kompromis mezi ušetřenými náklady a elektrickými vlastnostmi. V blízkosti krajních hran motivu je vhodnější zvětšit hustotu vyšívaného vzoru z důvodu vyšší proudové hustoty v těchto místech.

V závislosti na průřezu vodivého vlákna lze dosáhnout vysoké přesnosti navrženého motivu a to až 0,5 mm v případě strojového vyšívání a dostatečně tenkého vodivého vlákna. Výhodou vyšívaných antén je možnost jejich výroby na jakýkoli textilní materiál a to bez nutnosti ošetření zastřížených krajů [3].





Obr. 14. Příklad anténního motivu vytvořeného ručním vyšíváním.

## 5.2 Technologie výroby souvislé vrstvy vodivého materiálu

Tyto technologie jsou založeny na nanesení souvislé vrstvy materiálu na nosný textil, který bude zároveň působit i jako dielektrický substrát. Pro tento účel se používají elektrovedivé barvy, které se mohou nanášet vícero způsoby. Dalším způsobem je nalepení vodivé fólie přímo na nosný textil. Oproti anténám vyrobeným pomocí vodivých vláken je zde jednodušší způsob buzení. Vodivá barva i fólie tvoří celistvou materiálovou vrstvu, na kterou lze bez větších složitostí napájet nebo vodivým lepidlem nalepit napájecí port.

### 5.2.1 Inkoustový tisk

Inkoustový tisk je běžně užívaná technologie v kancelářském prostředí. Oproti běžnému tisku se používá vodivá barva, která není bohužel dostupná pro všechny výrobce tiskařských zařízení. Vodivá barva musí mít navíc obdobné vlastnosti jako inkoustová barva, týká se to především vodivých látek přidávaných do barvy. Krystalová struktura vodivých látek může způsobit ucpaní tiskacích trysek.

Kvalita tisku závisí na velikosti inkoustových kapek nanášených na textil a rozteči mezi jednotlivými nanášenými kapkami. V případě, kdy jde pouze o klasický tisk, není kladen na tyto vlastnosti takový důraz. V případě tisku, za účelem elektrické vodivosti a jednotné celistvosti tisknuté vrstvy, jsou tyto parametry stěžejní. Nízká hustota tisku způsobí nespojitost tisknuté vrstvy, čímž nebude zajištěna elektrická vodivost ve všech směrech. Na druhou stranu příliš vysoká hustota tisku může způsobit horší zasychání barvy a tudíž její následné rozpítí, rozmazání nebo prosáknutí barvy skrz textil. Velikost inkoustové kapky je cca 60  $\mu\text{m}$ . Tiskárny vyšších cenových tříd, s piezoelektrickou tiskovou hlavou, mají nastavitelnou tiskací rozteč. Velikost tiskací kapky se však nastavit nedá [3],[11].

V dnešní době se inkoustový tisk používá především na vytvoření vodivých cest a základních obvodových prvků v integrovaných oděvech. Japonští výzkumníci se zaměřili například na vývoj elastické vodivé barvy pro inkoustový tisk [11].

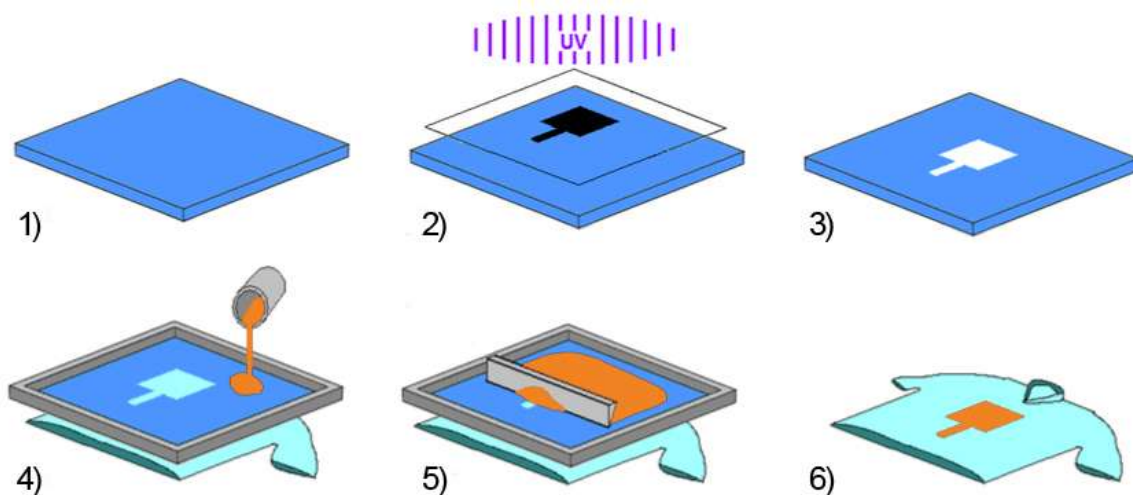
## 5.2.2 Sítotisk

Jedná se o nejpopulárnější způsob vytváření motivů planárních antén. Princip spočívá v nanesení vodivé barvy na textilní materiál přes průchozí síto s definovanou hustotou. Metody sítotisku se od sebe liší pouze rozdílným vytvářením vzorové šablony, která slouží k omezení prostoru tisknutého motivu.

Postup nejznámější přímé fotomechanické metody sítotisku je v jednotlivých bodech popsán následovně [3]:

- 1) Na napnuté síto, o požadované výšce nanášené vrstvy barvy, je v zatemněném prostoru nanesena rovnoměrná vrstva fotocitlivé emulze. Plocha emulze je omezena tzv. korytem, aby jí nebylo plýtváno.
- 2) Emulze je nechána 4 až 8 hodin v zatemněném prostředí tvrdnout tak, aby se na ni mohl umístit pozitivní film s požadovaným anténním motivem. Následně se pak emulze se sítem osvítl pomocí UV záření přes pozitivní film. Doba osvitů závisí na výkonu UV zářiče a typu použité emulze.
- 3) Po vytvrnutí a dostatečném osvětlení je síto pomalu propláchnuto pod tekoucí vodou, dokud není neosvícená emulze úplně smyta.
- 4) Síto s vytvořeným vzorem položeno na materiál, na který se bude nanášet vodivá barva. Barva je ve větším množství nanesena k jednomu z okrajů síta.
- 5) Pomocí rovné stěrky s vhodnou pružností je barva jedním tahem rozprostřena po celé ploše síta. V průchodných místech síta dojde k prosáknutí mřížkou a nanesení vodivé barvy na nosný materiál.
- 6) Po chvilkovém schnutí je síto opatrně sejmuto a nanesená vodivá vrstva je ponechána úplně zaschnout nebo je přežhlena.

Postup popsáný výše je graficky znázorněn na obr. 15.



Obr. 15. Princip popsaného postupu sítotisku [3]; upraveno.

Pokud je k sítu přistupováno s dostatečnou opatrností a po každém použití je dostatečně omyto, může být opakovaně použito až stovek opakování sítotisku.

Současný trh nabízí několik vodivých barev vhodných pro sítotisk. Tyto barvy jsou charakterizovány pomocí určitých vlastností, např. teplotní podmínky úplného ztvrdnutí, obsahem pevných krystalů pevných látek apod. Dalšími parametry jsou viskozita barvy, udávaná v newton-sekundě na čtvrcení metr ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ), a povrchové napětí barvy, udávané v milinewtonech na metr ( $\text{mN}/\text{m}$ ). Tyto dva parametry určují hloubku vstřebání vodivé barvy do tkaniny. Další zmíněnou vlastností je přilnavost barvy na textil. Vhodné jsou především vodivé barvy na bázi stříbra nebo niklu, protože nepodléhají oxidaci ve vzduchu jako barvy na bázi mědi. Jejich použití je ale spojeno s vyššími pořizovacími náklady [3], [11].

### 5.2.3 Plátování

Plátování je metoda spočívající v nanášení tenkých vodivých plátů (fólií) na textilní podklad. Tato metoda výroby je velice levná a jednoduchá, je lehce realizovatelná v domácích podmínkách a není k ní potřeba složité technické vybavení. Motiv lze vyrobit pomocí několika nenáročných způsobů a na textil se pak nanese pomocí vodivého lepidla.

Prvním nejjednodušším způsobem je vystříhnutí motivu ručně rovnou z fólie. Bohužel přesnost této metody je malá a stříháním lze realizovat pouze jednoduché motivy. Přesnost realizace motivu pomocí stříhu je maximálně do rozlišení 0,5 mm.

Přesnější výrobou motivu z fólie je jeho vyleptání v chloridu železitém ( $\text{FeCl}_3$ ). Tato metoda již vyžaduje využití pokročilejších technologií než v předchozím případě, ale stále se jedná o jednoduše dostupný postup podobný výrobě plošného spoje. Postup výroby je popsán níže:

- 1) Filmová předloha vytvářené struktury se invertovaně vytiskne na fotoplotteru.
- 2) Příprava vodivé fólie - Fólii je nutno hladce vyrovnat ve všech směrech. Dále se odmastí pomocí lihu. Pro zajištění mechanické stability je umístěna na pomocnou laminátovou podložku (FR/0,8). Tato sestava se celá zalaminuje fotorezistem při teplotě 105 °C. Fotorezist se následně nechá vytvrdnout minimálně 24 hodin.
- 3) Expozice - Na vytvrzenou strukturu se přiloží filmová předloha citlivou vrstvou k fólii. Dokonalého přilnutí filmu se dosáhne pomocí podtlaku. Expozice se provede osvětlením pomocí UV záření po dobu 15 sekund.
- 4) Vyvolání fotorezistu - Neosvícené části fotorezistu se nechají odplavit v roztoku sody (uhličitan sodný  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), kde je struktura koupána 2 minuty. Následně jsou veškeré zbytky spláchnuty vodou.
- 5) Leptání – Struktura je vložena do předehřátého roztoku  $\text{FeCl}_2$ . V ní se nechá struktura vyleptat. Doba leptání určují vlastnosti konkrétní leptací lázně.
- 6) Odstranění zbytku fotorezistu a leptací kyseliny se provede pomocí hydroxidu sodného ( $\text{NaOH}$ ) cca 5 minut a všechny zbytky se pak opět opláchnou vodou.
- 7) Vytvořený vzorek je nakonec nutno opatrně osušit, aby nedošlo k rozmočení spodní části fólie a slepení s pomocnou laminátovou podložkou.

Postup popsáný výše je graficky znázorněna na obr. 16.



Obr. 16. Princip vyleptání anténního vzoru [3].

Posledním používaným postupem výroby anténního motivu pomocí vodivých fólií je vyřezání motivu do fólie pomocí automatického řezacího laseru. Tato metoda je nejpřesnější metodou vůbec a lze s ní realizovat velice složité struktury. Bohužel její nákladnost a dostupnost jsou obrovskými nevýhodami v porovnání s výše popsányými postupy v této kapitole.

## 6 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

Tato kapitola pojednává o vyšetření vlastností vybraných textilií, návrhu zvolené antény a výsledcích požadovaných zkoumaných situací (ohyb, blízkost lidského těla). Pro dosažení výsledků byl použit modelovací software CST Microwave Studio®.

### 6.1 Zvolený textil

Z vhodných textilií, běžně užívaných pro oděvnictví, byly vybrány tři vzorky pro zjištění jejich relativní permitivity  $\epsilon_r$ . Výběr vzorků záležel na jejich složení, výšce, mechanických vlastnostech a vhodnosti oděvního užití (viz kap. 3.1).

Prvním zvoleným materiálem byl softshell. Jedná se o umělý funkční materiál, který zajišťuje určitou míru voděodolnosti a chrání proti větru. Používá se především pro outdoorové oblečení určené do proměnlivých klimatických podmínek. U softshellu může nastat určitý problém při vyšetřování, protože se jedná o dvouvrstvou textilií, která může mít v obou na ni kolmých směrech jiné vlastnosti.

Za druhý a třetí vzorek byly vybrány různé druhy flauše. Flauš je tkanina vyrobená především z mýkané vlny s objemným, zdrsňeným povrchem. Je používána na výrobu svrchních částí oděvů jako kabáty a bundy. Rozdíl mezi vzorky je dán jejich složením.

Vzorek	Výška	Složení
softshell	1,2 mm	100% polyester
přírodní flauš	1,25 mm	70% vlna, 20% akryl, 3% kašmír
umělý flauš	1 mm	97% polyester, 3% elastan

Tab. 2. Tabulka vlastností vybraných textilních vzorků.

Pomocí metody reverzního určení (viz kap. 3.3.1) byla zjištěna relativní permitivita  $\epsilon_r$  všech tří vzorků na střední frekvenci ISM pásma  $i$ . Metoda byla provedena za pomoci jednoduché mikropáskové antény s vnořeným vedením přizpůsobeným na  $50 \Omega$  a výchozí relativní permitivitou 1,5. Rozměry této antény byly určeny pomocí vzorců uvedených v kapitole 4.5. K ověření správnosti výsledných hodnot postačila výroba antény z rozměrů určených první iterací. Relativní permitivita zjištěná pomocí této metody se jeví jako dostatečně přesná a tudíž nebylo dále prováděno zjišťování  $\epsilon_r$  pomocí některé z dalších popsanych metod v kapitole 3.3.1.

Vyzkoumaná relativní permitivita  $\epsilon_r$  vybraných textilních vzorků:

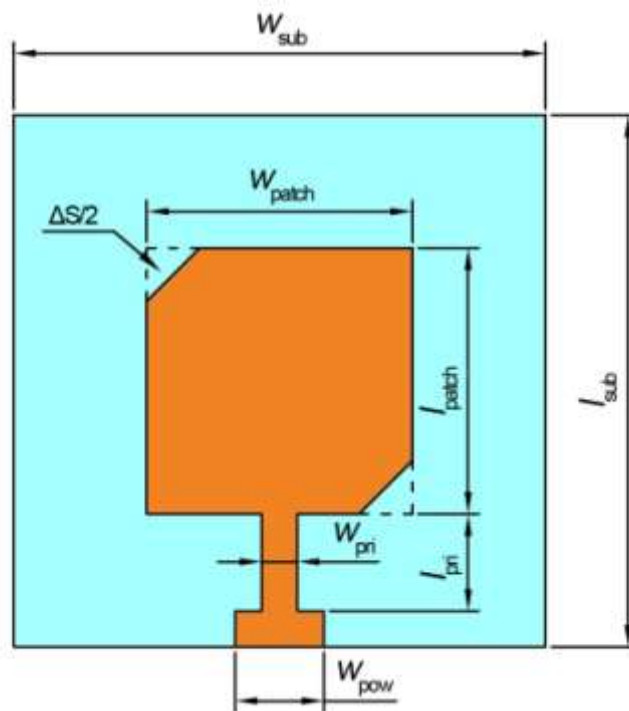
- softshell  $\epsilon_r = 1,29$  ,
- přírodní flauš  $\epsilon_r = 1,48$  ,
- umělý flauš  $\epsilon_r = 1,54$  .

Vzhledem k tomu, že softshell je moderní textilie, v dnešní době velice často používaná ve všedních oděvech, a disponuje nejnižší permitivitou, byl vybrán jako nejvhodnější vzorek dielektrického substrátu pro navrhovanou anténu.

## 6.2 Návrh antény

Pro vyšetření požadovaných vlastností byl zvolen motiv mikropáskové antény s kruhovou polarizací. Dielektrický substrát této antény bude tvořit vybraný softshellový textil. Pro pásmo ISM 5,8 GHz bude mít navržená struktura maximální rozměry antény do 80 x 80 mm, adekvátní velikost pro umístění na lidské tělo. Směr záření mikropáskové antény má poměrně široký vyzařovací svazek, který je osově kolmý na anténní motiv, což je vhodné pro Off-Body komunikaci (viz kap. 1). Navíc má mikropásková anténa zemnicí plochu ve směru k lidskému tělu, která by měla zabránit průchodu záření k němu.

Anténa byla navržena pomocí vzorců uvedených v kapitole 4.5. Na obr. 17 je uvedena navrhovaná struktura antény. Napájení je řešeno pomocí mikropáskového vedení. Bylo přizpůsobeno na 50  $\Omega$  a pro správné vybudování kruhové polarizace je do napájení zaveden čtvrtvlnný transformátor. Šířka jednotlivých mikropásku byla určena pomocí webové výpočetní kalkulačky [12]. Rozměry plochy zemnicího zářiče jsou dány násobky délky vlny v dielektrickém substrátu od okraje anténního motivu. Vypočtené rozměry byly následně upraveny pomocí software optimalizačních nástrojů. Výsledné parametry navržené antény jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 17. Grafické zobrazení mikropáskové antény.

Rozměr	$w_{sub}$	$l_{sub}$	$w_{patch}$	$l_{patch}$	$w_{pow}$	$w_{pri}$	$l_{pri}$	$\Delta S/2$
Jednotka	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]
Velikost	52,0	54,0	21,1	22,3	5,0	2,8	11,0	6,9

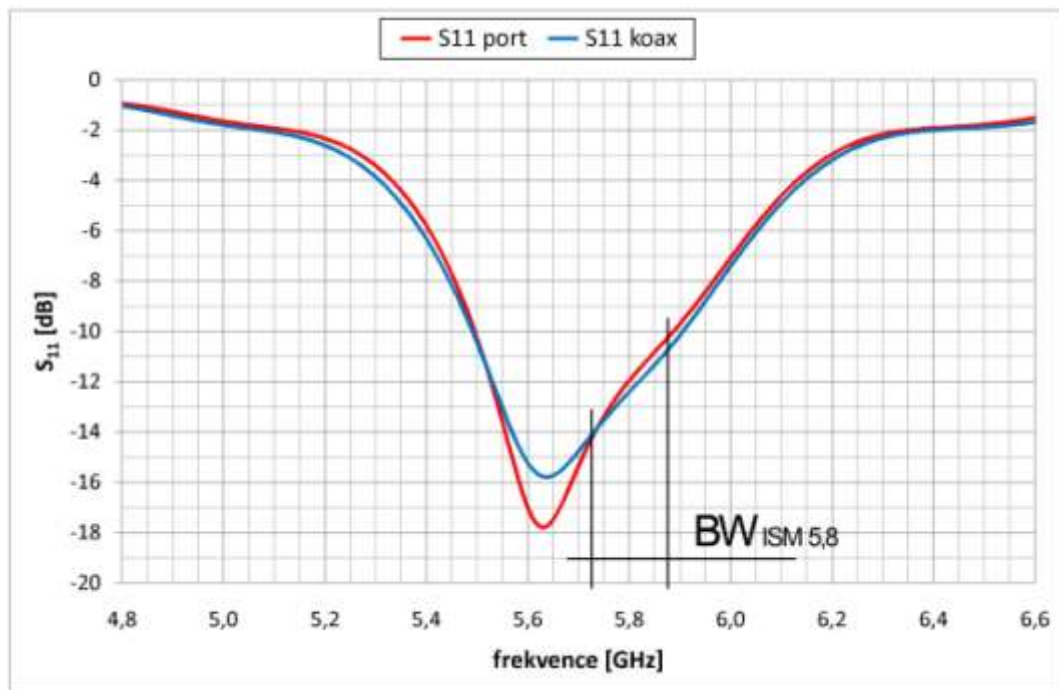
Tab. 3. Tabulka konečných rozměrů navržené antény.

### 6.3 Simulace anténního motivu

Model návrhu je složen ze tří vrstev. Anténní motiv, napájecí mikropásek a zemní plocha jsou vytvořeny pomocí dokonale elektricky vodivé materiálové vrstvy (PEC), která má tloušťku 40  $\mu\text{m}$ . Prostřední vrstvu tvoří dielektrický substrát, reprezentující nosnou textilii, jejíž relativní permitivita  $\epsilon_r$  je 1,29 a ztrátový úhel  $\tan \delta$  0,02. Ten byl určen obdobně jako permitivita pomocí metody reverzního určení (viz kap 3.3). Simulace je řešena analýzou časové domény v pásmu 1 – 11 GHz.

Pro správné vybuzení motivů se v CST Microwave Studiu® používá plošný port. Takovýto port se vytvoří velice jednoduše a rychle. Jelikož se, ale tento port nedá použít při simulacích ohnutých struktur (3), byl vytvořen i model, ve kterém je motiv napájen pomocí koaxiálního vedení přizpůsobeného na 50  $\Omega$ .

Na obr. 18 jsou znázorněny činitele odrazu  $S_{11}$  na vstupu antény pro buzení pomocí portu a koaxiálního kabelu. Navržená anténa se jeví velice širokopásmově. V požadovaném ISM pásmu má  $S_{11}$  dostatečně vysoké potlačení, v celém průběhu vyšší než 10 dB. Celé pásmo potlačení o 10 dB je téměř dvojnásobně širší než uvažované ISM pásmo, nemají ale shodnou střední frekvenci.

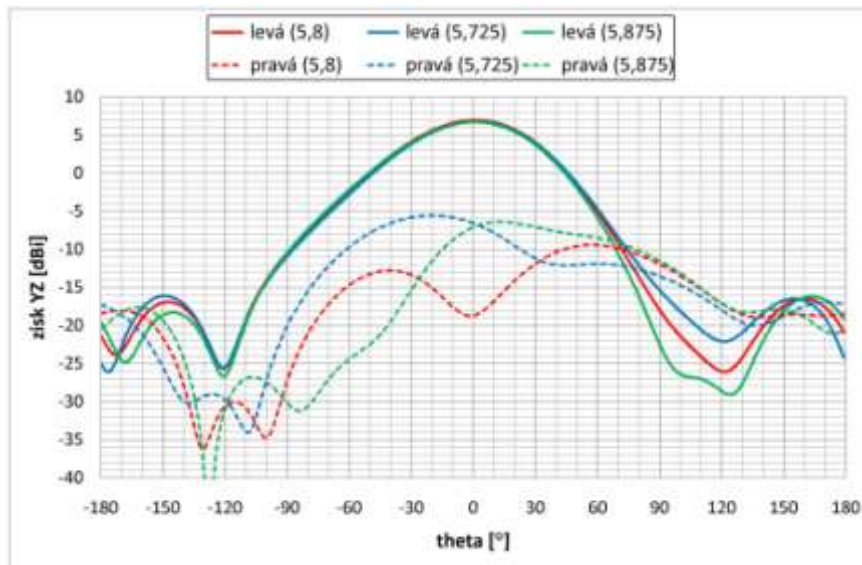


Obr. 18. Graf činitele odrazu na vstupu navržené antény.

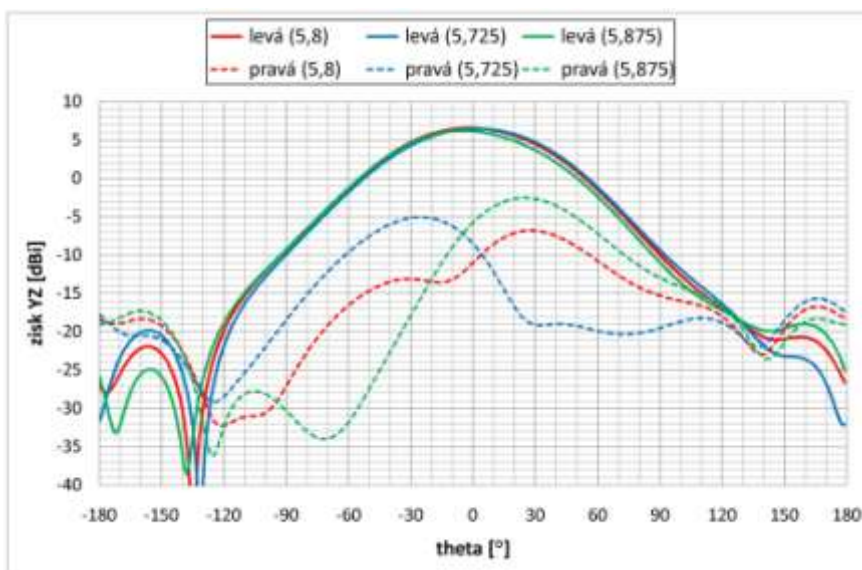
Typ buzení	šířka pásma	$f_L$	$f_H$	$f_{střed}$
	[MHz]	[GHz]	[GHz]	[GHz]
$BW_{(-10dB)} port$	400	5,49	5,89	5,69
$BW_{(-10dB)} coax$	420	5,49	5,91	5,70

Tab. 4. Tabulka pásma pro potlačení vstupu o 10dB.

Zavedené poruchové segmenty způsobí vybuzení levotočivé kruhové polarizace. Obr. 19 a 20 znázorňují vyzářovací diagramy v rovině YZ pro levotočivou a pravotočivou polarizaci vyvolanou oběma typy buzení. V obou grafech jsou uvedeny závislosti na středním a krajních frekvencích požadovaného ISM pásma. Z obou grafů je jasně patrné, že průběhy na jednotlivých frekvencích požadované levotočivé polarizace si jsou velice podobné a minimální rozdílnosti nastávají pouze v zadních lalocích. Rozdílnost mezi jednotlivými typy buzení je v jejich maximálním zisku. Buzení pomocí portu má větší zisk a užší vyzářovací úhel. Buzení koaxiálním vedením má menší zisk, ale jeho symetričnost a vyzářovací úhel jsou vyšší než v předchozím případě. Přesné hodnoty získané simulací, jsou uvedeny na konci kapitoly v přehledné tabulce.



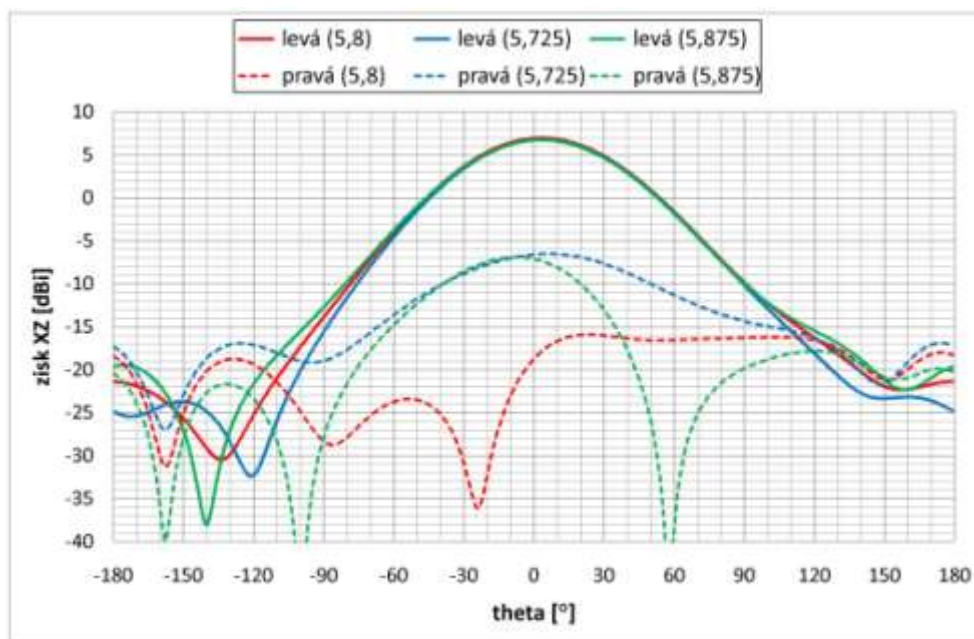
Obr. 19. Graf vyzářovací charakteristiky roviny YZ při buzení portem.



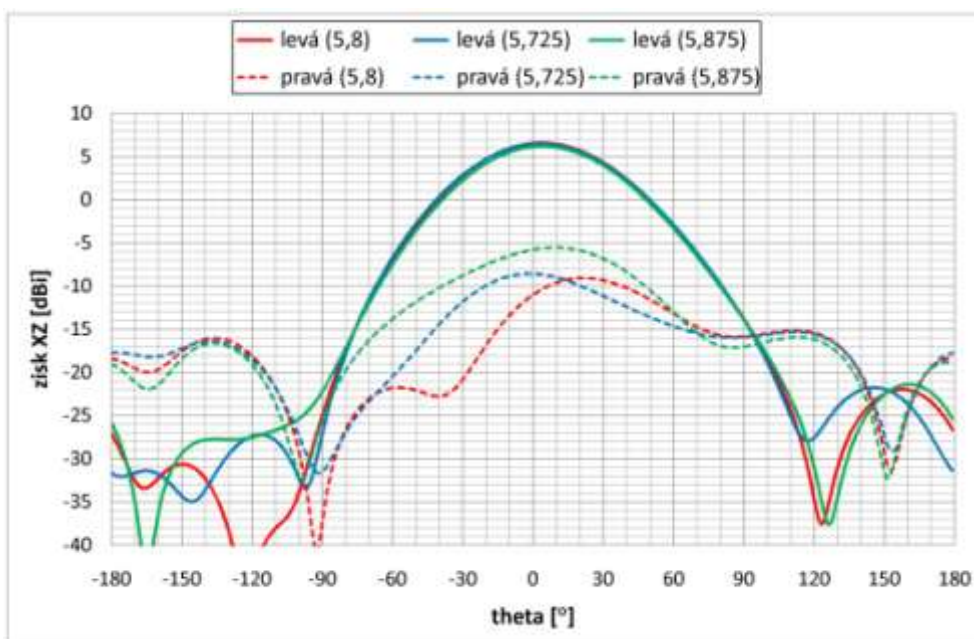
Obr. 20. Graf vyzářovací charakteristiky roviny YZ při buzení koaxiálním vedením.



Na obr. 21 a 22 jsou vykresleny grafy vyzařovacích diagramů v rovině XZ, opět pro oba typy buzení. Závěry z grafů jsou podobné, jako pro rovinu YZ. Průběhy na jednotlivých frekvencích jsou téměř identické a liší se opět pouze v zadních lalocích, které jsou tentokrát výrazně rozdílnější. Větší zisk opět vykazuje buzení pomocí portu. Navíc oproti rovině YZ má buzení pomocí portu větší symetričnost a větší vyzařovací úhel než buzení pomocí koaxiálního vedení. Přesné získané hodnoty, simulací jsou uvedeny na konci kapitoly v přehledné tabulce.

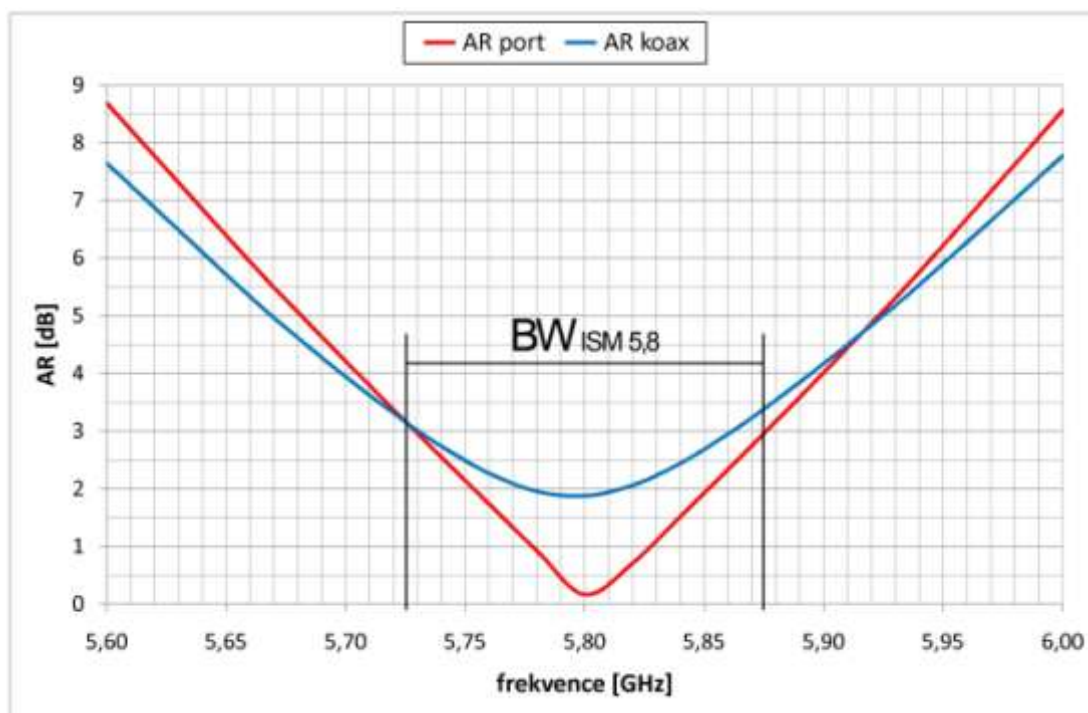


Obr. 21. Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při buzení portem.



Obr. 22. Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při buzení koaxiálním vedením.

Pro ověření správného vybuzení kruhové polarizace je na obr. 23 uveden průběh axiálního poměru v požadovaném ISM pásmu pro oba typy buzení. Ze závislostí je jasně patrné, že lepšího axiálního poměru se dosáhne vybuzení portem. Nejideálnější situace by nastala, kdyby v celém průběhu byl axiální poměr menší než 3 dB, to dle vynesného grafu nesplňuje ani jedna ze závislostí. To ale pouze těsně na obou okrajích uvažovaného ISM pásma. Přesné hodnoty si lze prohlédnout v přehledné tabulce níže na této stránce.



Obr. 23. Graf průběhu axiálního poměru v uvažovaném ISM pásmu obou typů buzení.

<i>Levotočivá polarizace</i>			YZ rovina			XZ rovina				
Typ buzení	$f$	axiální poměr	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku
	[GHz]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
port	5,725	3,17	6,78	2	61,3	-22,9	6,81	3	63,6	-30,0
	5,8	0,17	6,97	1	61,6	-23,4	6,99	3	63,7	-28,4
	5,875	2,96	6,74	1	62,0	-22,9	6,77	3	64,3	-26,2
koax	5,725	3,17	6,48	2	73,7	-26,3	6,51	3	61,2	-28,3
	5,8	1,89	6,57	-2	73,4	-27,3	6,60	4	60,4	-28,6
	5,875	3,39	6,22	-5	72,2	-25,2	6,22	4	60,0	-27,6

Tab. 5. Přehledná tabulka hodnot zjištěných simulací.

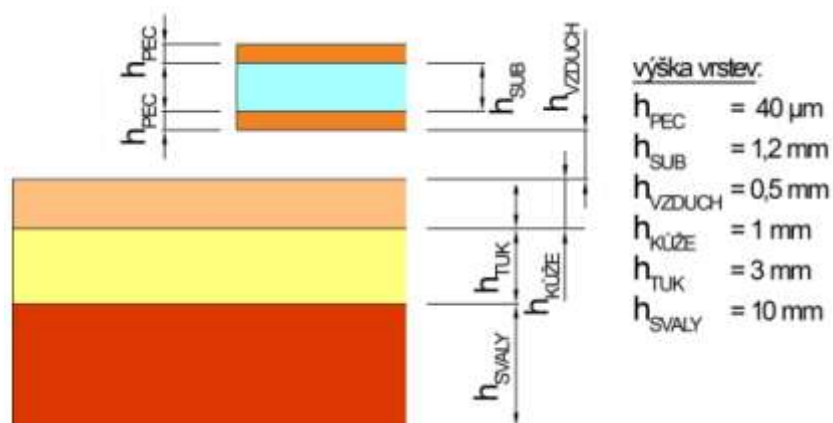
Tab. 4 blíže popisuje vypočítané závislosti popsané výše. Platí skutečnost, že při buzení antény koaxiálním vedením se pro obě roviny nedosáhne tak vysokého zisku jako při buzení portem. Rozdíl v zisku je cca 0,4 dB pro všechny sledované závislosti. Jediný výrazný rozdíl v průbězích mezi jednotlivými buzeními je ve velikosti vyzařovacího úhlu v rovině E, kdy pro buzení koaxiálním vedením je vyzařovací úhel o cca 10° širší. Rozdíly mezi vlastnostmi na jednotlivých frekvencích při daném buzení jsou téměř identické, liší se pouze v zadních lalocích, což v dané problematice není podstatné. Pravotočivá složka je ve všech zobrazených závislostech potlačena oproti levotočivé v hlavním směru o 10 dB. Účinnost simulovaného návrhu je cca 60%. Průběhy pro buzení portem a koaxiální sondou jsou velice podobné, ne-li shodné a tudíž by simulované výsledky pro ohnuté struktury, buzené pomocí koaxiálního vedení, měli být důvěryhodné.

## 6.4 Vliv blízkosti lidské tkáně

Lidské tělo má elektrické vlastnosti, které mohou výrazně ovlivnit výstupní parametry antény. U nositelných antén je tedy nutné provést vyšetření vlivu lidské tkáně. V závislosti na pracovní frekvenci (vlnové délce) může docházet v různé vzdálenosti od lidské tkáně k posunu rezonanční frekvence, zhoršení impedančního přizpůsobení a deformacím ve směrových charakteristikách.

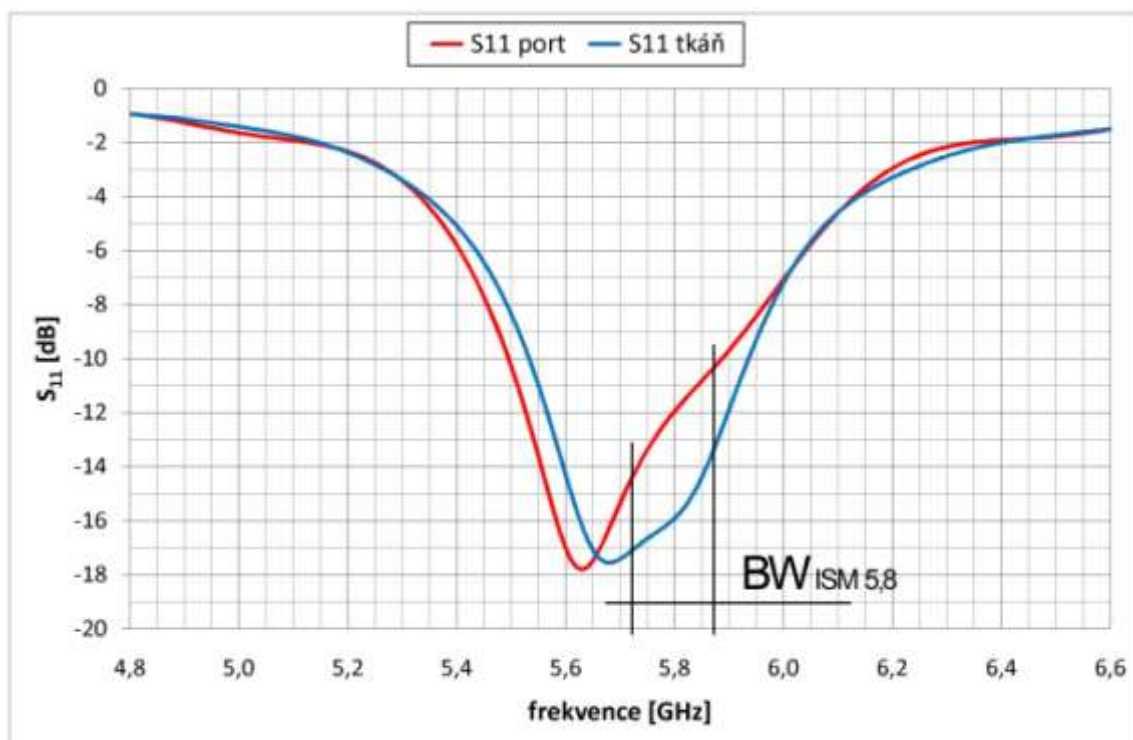
Pro co nejvhodnější simulaci modelu antény v přítomnosti lidského těla se podle [13] udává třívrstvý model lidské tkáně. V knihovně materiálů CST Microwave Studio® jsou modely pro lidskou tkáň definované pomocí měrné vodivosti, což není shodné se [13], kde jsou modely definovány pomocí  $\epsilon_r$  a  $\tan \delta$ . Z výsledků prezentovaných v práci [3] je rozdíl v dosažených závislostech na použitých modelech tkáně minimální, proto byly v následujících simulacích použity materiály definované knihovnou CST Microwave Studio®.

Uvažovaný model lidské tkáně se skládá z vrstvy kůže o tloušťce 1 mm, vrstvy tuku tlusté 3 mm a vrstvy svaloviny o tloušťce 10 mm. Pro věrohodnost umístění antény na oděv bude mezi nosný textil, sloužící jako dielektrikum, a lidskou tkáň vložena 0,5 mm vzduchová mezera. Na obr. 25 uveden řez simulovanou strukturou. Jedná se o principiální zobrazení, které není zobrazeno v přesném měřítku.



Obr. 24. Principiální zobrazení řezu simulovanou strukturou.

Na obr. 26 jsou v grafu vyneseny parametry  $S_{11}$  pro simulaci samostatné antény a simulaci antény v blízkosti modelu lidské tkáně. Ze závislosti vyplývá, že jejich průběh je podobný a dokonce pro simulaci v blízkosti lidské tkáně je dosaženo vyššího potlačení o 2 dB. Dále dojde k mírnému posunu střední frekvence a nárůstu šířky pásma potlačení 10 dB.



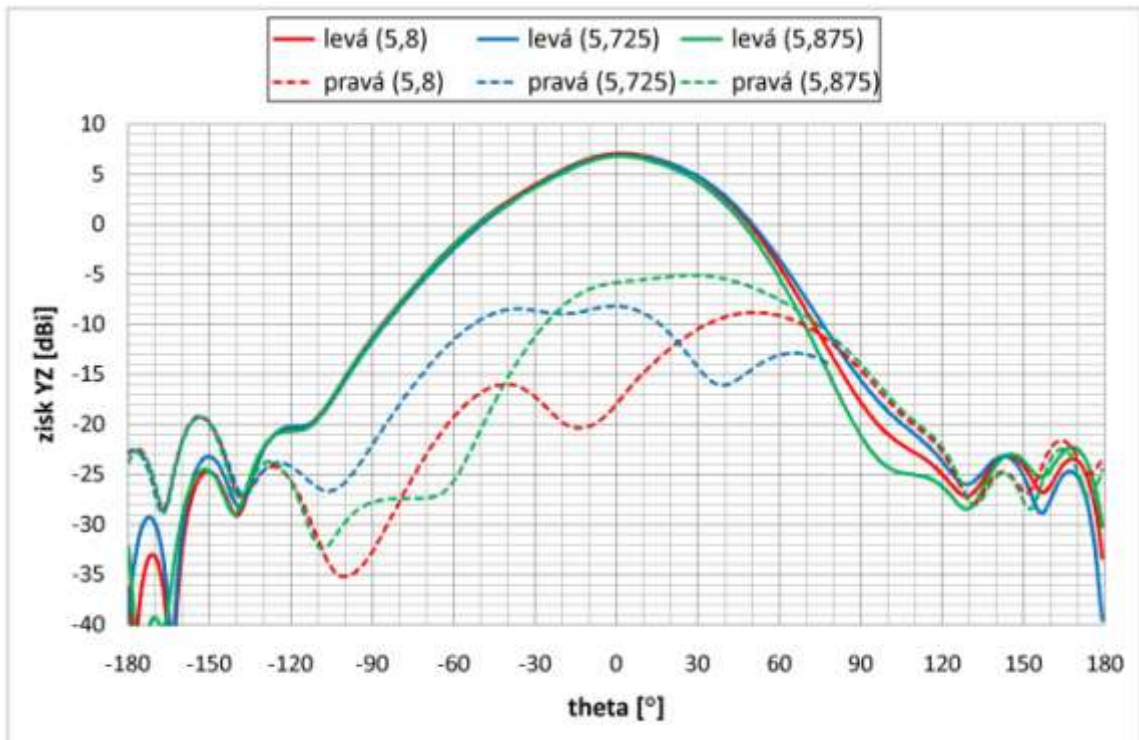
Obr. 25. Graf činitele odrazu na vstupu na antény v blízkosti lidské tkáně.

Typ buzení	šířka pásma	$f_L$	$f_H$	$f_{střed}$
	[MHz]	[GHz]	[GHz]	[GHz]
$BW_{(-10dB)} port$	400	5,49	5,89	5,69
$BW_{(-10dB)} tkáň$	430	5,51	5,94	5,73

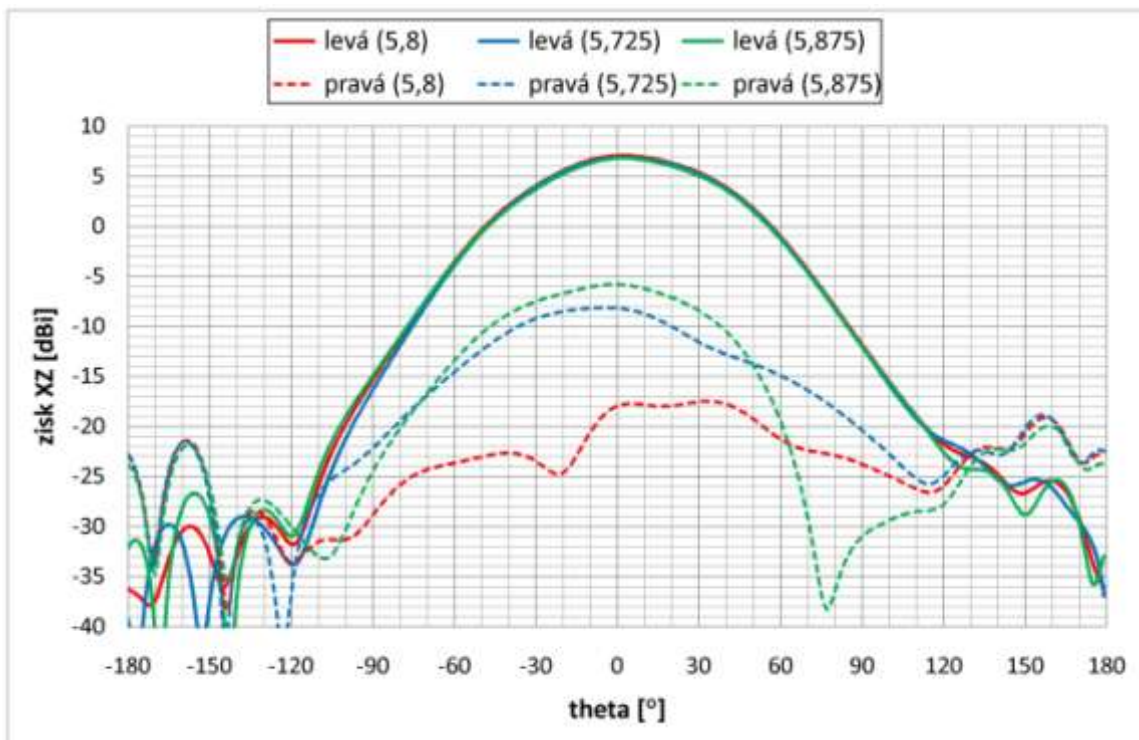
Tab. 6. Tabulka pásma pro potlačení vstupu o 10dB.

Obr. 26 znázorňuje vyzařovací diagram roviny YZ. Lze vysledovat, že vyzařovací charakteristika je pro požadované ISM pásmo identická a maximální zisk není výrazně ovlivněn blízkostí lidské tkáně. Vyzařovací úhel se liší pouze o cca 2°. Symetričnost podle osy v 0° není v tomto grafu tak vysoká a boční laloky jsou více potlačené, cca 8 dB. Přesné hodnoty získané simulací jsou uvedeny na konci kapitoly v přehledné tabulce.

Obr. 27 vykresluje vyzařovací diagram roviny XZ. Vyzařovací charakteristika je opět téměř identická a zisk není výrazně ovlivněn. Změna oproti samostatné anténě nastává ve velikosti vyzařovacího úhlu, který je cca o 5° širší. Přesné hodnoty získané simulací jsou uvedeny na konci kapitoly v přehledné tabulce.

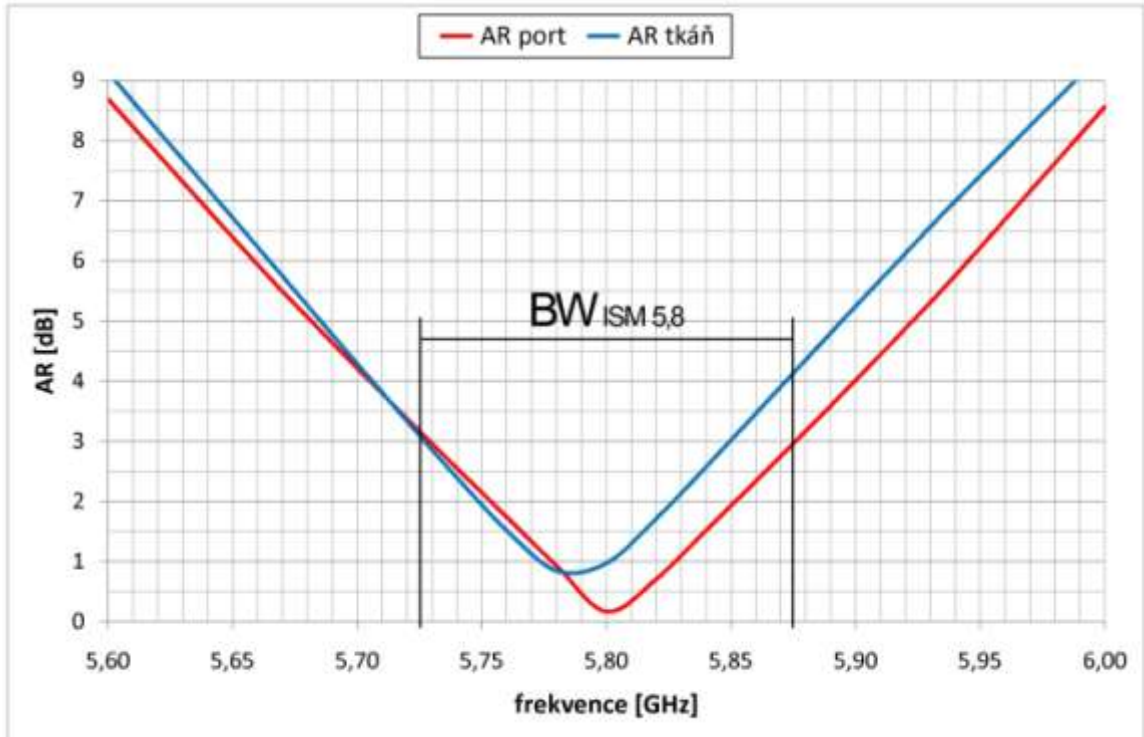


Obr. 26. Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ při zkoumání vlivu lidské tkáně.



Obr. 27. Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ při zkoumání vlivu lidské tkáně.

Axiální poměr v přítomnosti lidské tkáně je zobrazena na obr. 28. Z průběhů je patrné, že hodnota minima axiálního poměru se frekvenčně posunula níže. V horní polovině chtěného pásma také narostla hodnota axiálního poměru o cca 1 dB.



Obr. 28. Graf průběhu axiálního poměru v přítomnosti modelu lidské tkáně.

<i>Levotočivá polarizace</i>				E rovina			H rovina			
Tkáň	$f$	axiální poměr	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku
	[GHz]	[dB]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]
ne	5,725	3,17	6,78	2	61,3	-22,9	6,81	3	63,6	-30,0
	5,8	0,17	6,97	1	61,6	-23,4	6,99	3	63,7	-28,4
	5,875	2,96	6,74	1	62,0	-22,9	6,77	3	64,3	-26,2
ano	5,725	3,10	6,90	2	64,1	-30,1	6,90	2	69,6	-32,2
	5,8	0,98	7,09	2	62,7	-30,1	7,09	2	68,7	-33,5
	5,875	4,14	6,83	1	61,2	-29,1	6,84	2	68,2	-32,2

Tab. 7. Přehledná tabulka hodnot zjištěných simulací pro zkoumání vlivu lidské tkáně.

Tab. 7 shrnuje číselně poznatky vysledované při zkoumání vlivu lidské tkáně.

Jednotlivé skutečnosti byly popsány výše v komentářích k jednotlivým grafům. Ze získaných poznatků vyplývá, že vliv blízkosti lidské tkáně je téměř zanedbatelný a dochází pouze k nárůstu vyzařovacích úhlů a mírnému nárůstu axiálního poměru. Tato skutečnost je způsobena zemnicí plochou mikropáskové antény, která veškeré záření ve směru k lidské tkáni odrazí zpět do směru záření antény.

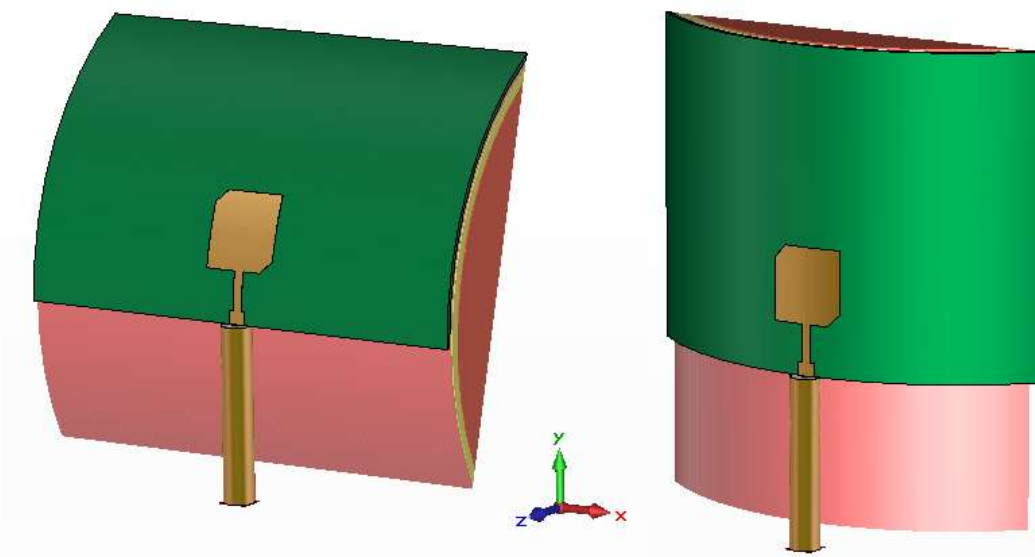
## 6.5 Vliv ohybu struktury

Ohyb struktury má představovat situaci umístění anténního motivu na nerovnou část těla. Předchozí kapitola představovala umístění anténního motivu na záda, břicho nebo hrudník. V této kapitole jsou zkoumány možnosti umístění antény na rameno, paži nebo koleno. Anténa svými rozměry kopíruje plošné rozměry v osách  $x$  a  $y$ . V těchto rovinách je pak zaveden imaginární válec nebo koule, jehož povrch anténní motiv kopíruje. V předchozí kapitole bylo vyzorováno, že v daném ISM pásmu jsou průběhy vyzařovacích charakteristik identické, proto jsou dále grafiky vynášeny pouze charakteristiky na nosné frekvenci 5,8 GHz.

Jak bylo zmíněno v kapitole 6.3, pro správné buzení ohnutých struktur je vhodné použít koaxiální vedení. To je namodelováno pro obvyklé přizpůsobení  $50 \Omega$ , kdy průměr vnitřního vodiče je 1,27 mm, a dielektriku, tvořené teflonem s relativní permitivitou 2,1, má vnější průměr 4,25 mm.

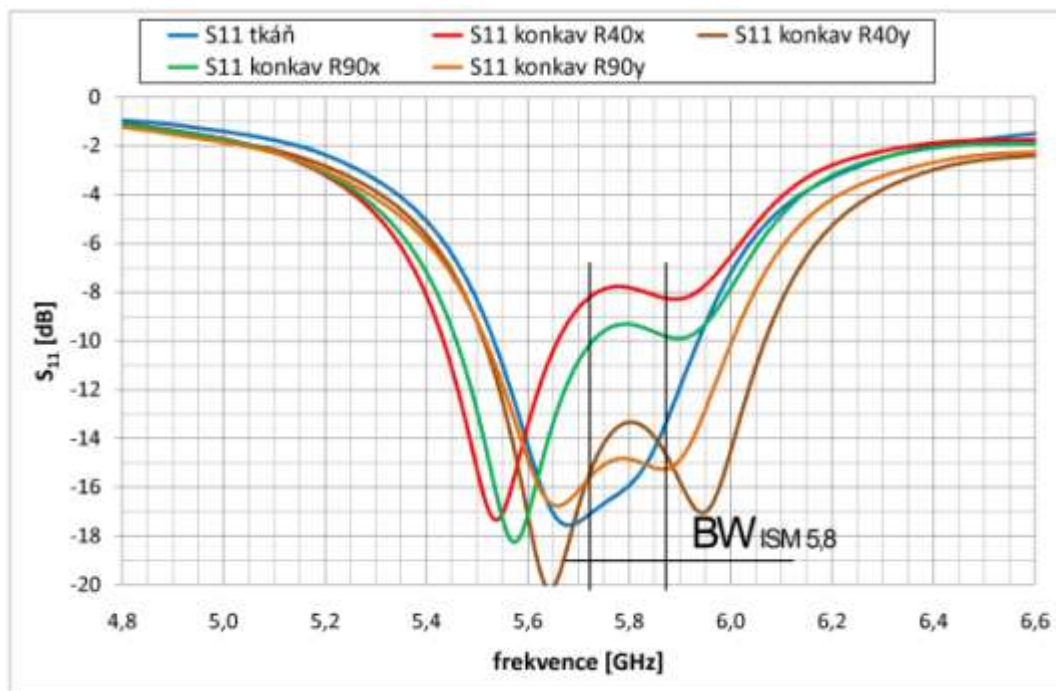
### 6.5.1 Konkávní ohyb

Konkávní ohnutí má simulovat ohyb struktury přes končetiny lidského těla. Pro simulaci ohybu kolem lidské paže a holení části nohy je vhodné použití poloměru  $R = 40^\circ$ . Umístění antény na stehno vyhovuje velikost poloměru válce  $R = 90^\circ$ . Je zkoumán ohyb struktury v obou plošných osách  $x$  a  $y$ , jelikož napájecí mikropásek může být veden k anténnímu motivu z horizontální i vertikální strany.



Obr. 29. Obrázky simulovaných struktur konkávního ohybu v ose  $x$  a  $y$ .

Na obr. 30 jsou vyneseny závislosti činitele odrazu na vstupu antény v závislosti na ohybu struktury. Při ohybu kolem osy  $x$  dochází k výraznému zmenšení činitele odrazu v uvažovaném ISM pásmu, cca 8 dB. Ohyb kolem osy  $y$  nemá na  $S_{11}$  ve chtěném pásmu takový vliv jako v předchozím případě a odstup se sníží pouze o cca 2 dB. Pásmo poklesu o 10 dB je pro každý ohyb odlišné a hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.



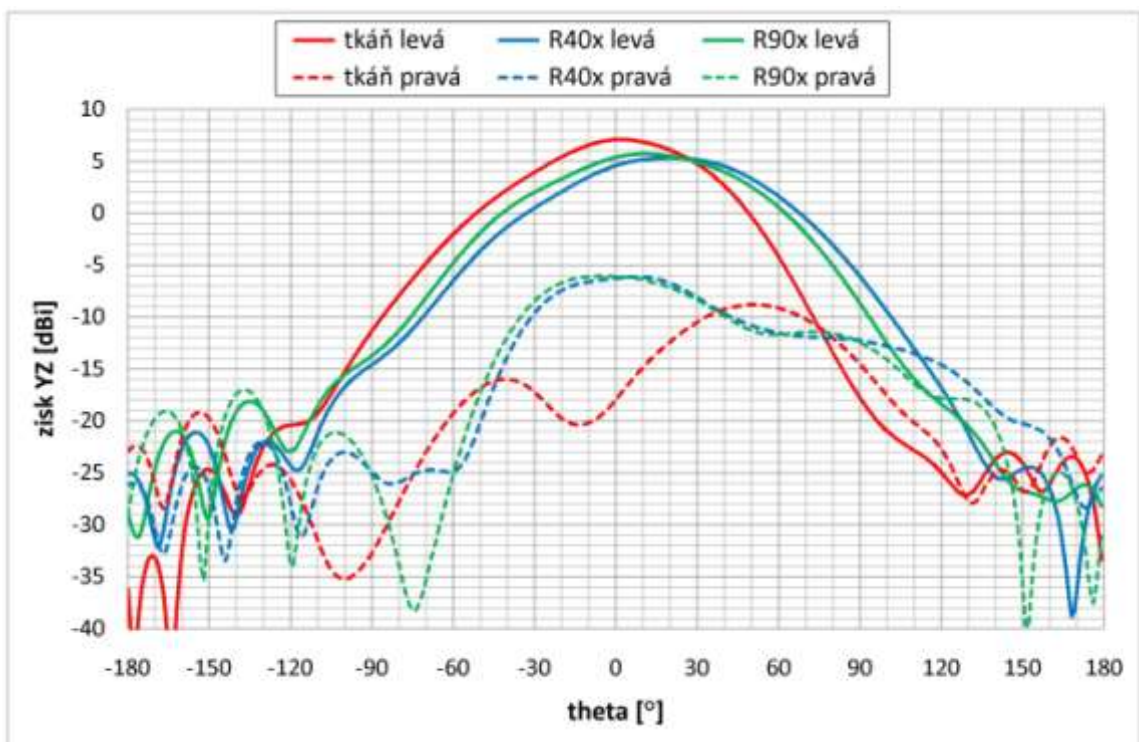
Obr. 30. Graf činitele odrazu na vstupu v závislosti na konkávním ohybu struktury.

Konkávní ohyb	šířka pásma	$f_L$	$f_H$	$f_{střed}$
	[MHz]	[GHz]	[GHz]	[GHz]
$BW_{(-10dB)} tkáň$	420	5,51	5,94	5,73
$BW_{(-10dB)} R40x$	220	5,44	5,66	5,55
$BW_{(-10dB)} R40y$	560	5,51	6,07	5,79
$BW_{(-10dB)} R90x$	270	5,46	5,73	5,60
$BW_{(-10dB)} R90y$	490	5,51	6,00	5,76

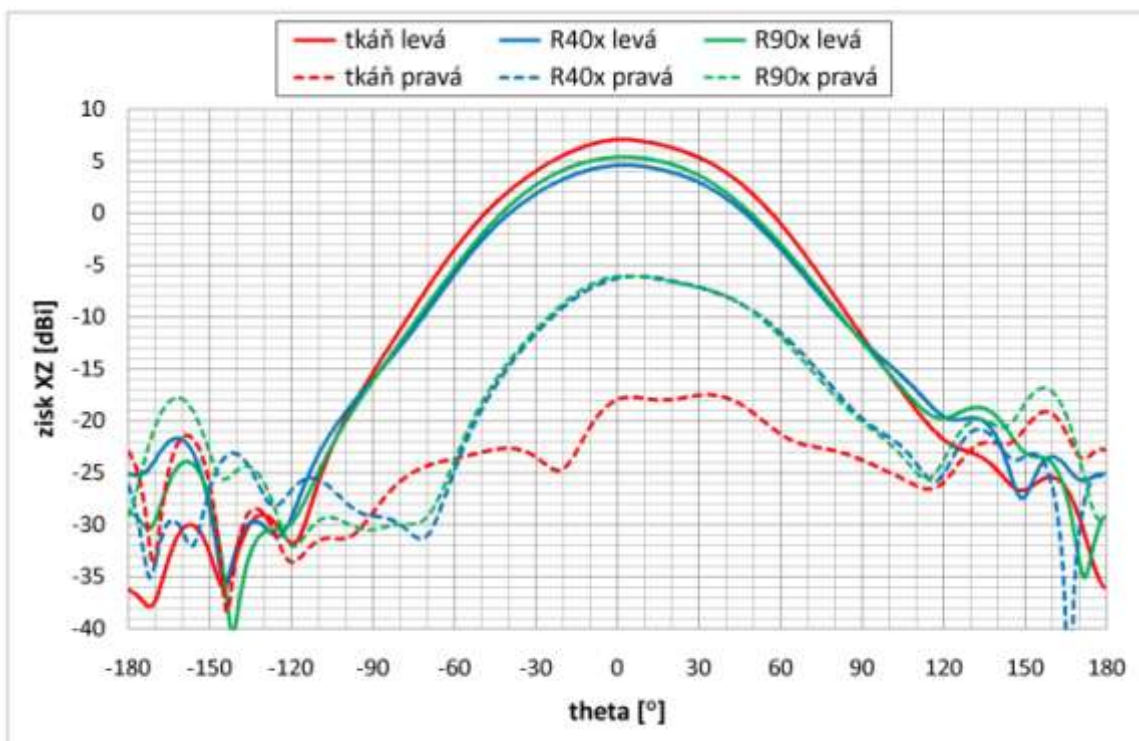
Tab. 8. Tabulka pásma poklesu o 10 dB pro konkávní ohyby.

Obr. 31 a 32 znázorňují vliv ohybu podle osy  $x$  v rovinách  $YZ$  a  $XZ$ . Lze vysledovat, že v rovině  $YZ$  dojde k výraznému nárůstu vychýlení svazku a celkovému nárůstu vyzařovacího úhlu. Velikost vychýlení je ale způsobena modelem ohybu v simulačním software a tudíž tuto rozdílnost můžeme neuvažovat. Dále způsobí pokles celkového zisku. V rovině  $XZ$  nedochází k tak výraznému vlivu na vyzařovací diagram. Dojde k nárůstu vyzařovacího úhlu. Vliv na celkový zisk v této rovině je ale výraznější a vyšší ohyb způsobí výrazný pokles. Přesné hodnoty získané simulací jsou uvedeny na konci kapitoly v přehledné tabulce.



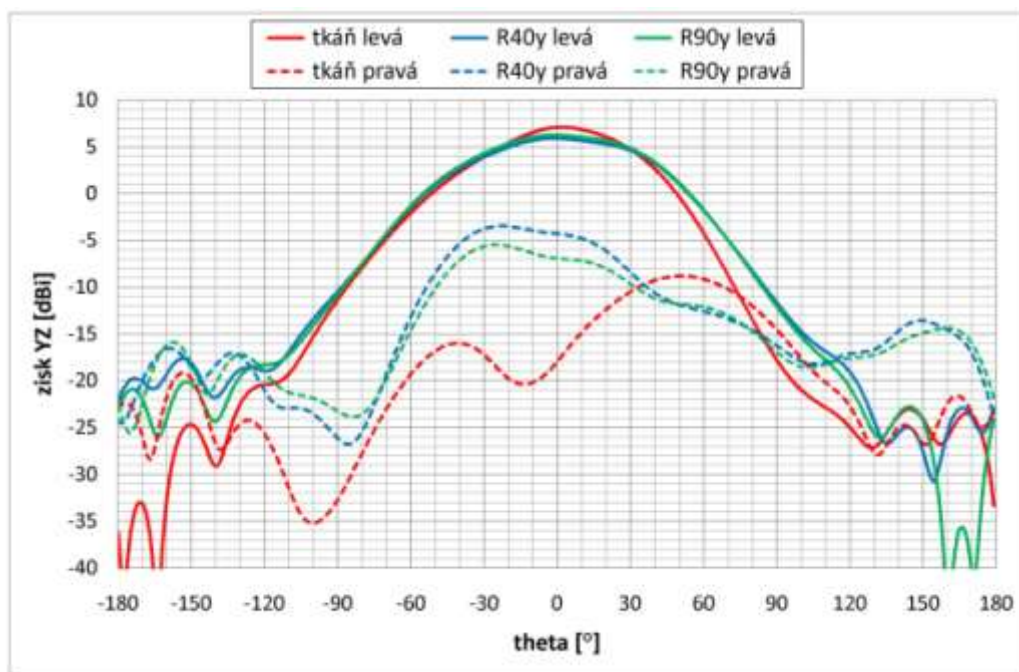


Obr. 31. Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konkávní ohyb po ose  $x$ .

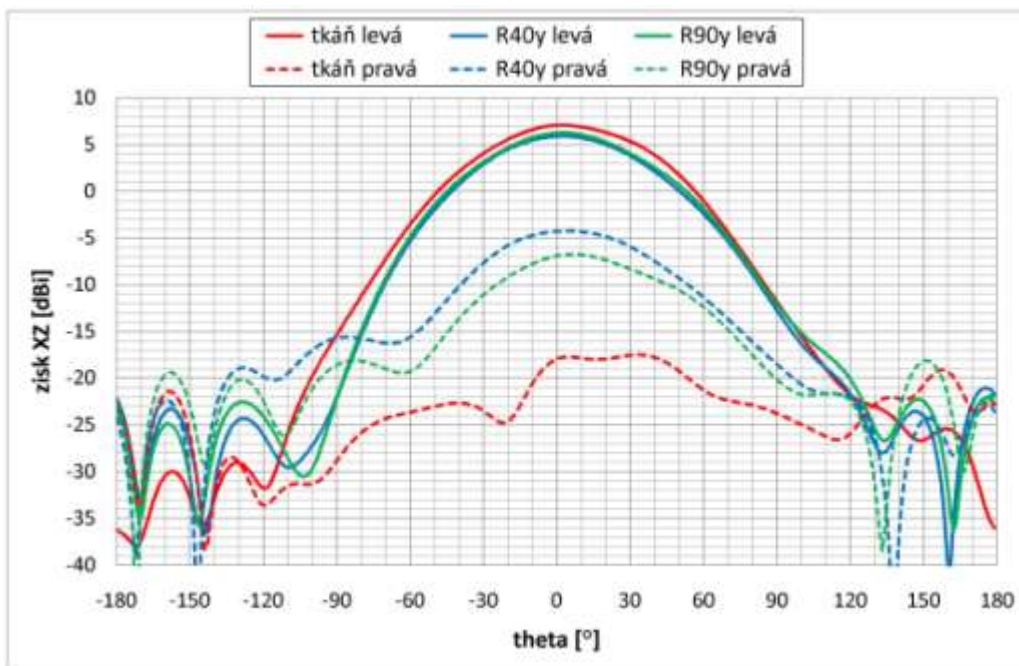


Obr. 32. Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konkávní ohyb po ose  $x$ .

Na obr. 33 a 34 jsou vykresleny závislosti směrových charakteristik v rovinách YZ a XZ na ohybu v ose  $y$ . V rovině YZ ohyb nejvíce působí na šířku vyzařovacího úhlu, který výrazně naroste. Zisk je také ovlivněn, ne tak výrazným poklesem jako při ohybu v ose  $x$ . Přesné hodnoty získané simulací jsou uvedeny na konci kapitoly v přehledné tabulce.

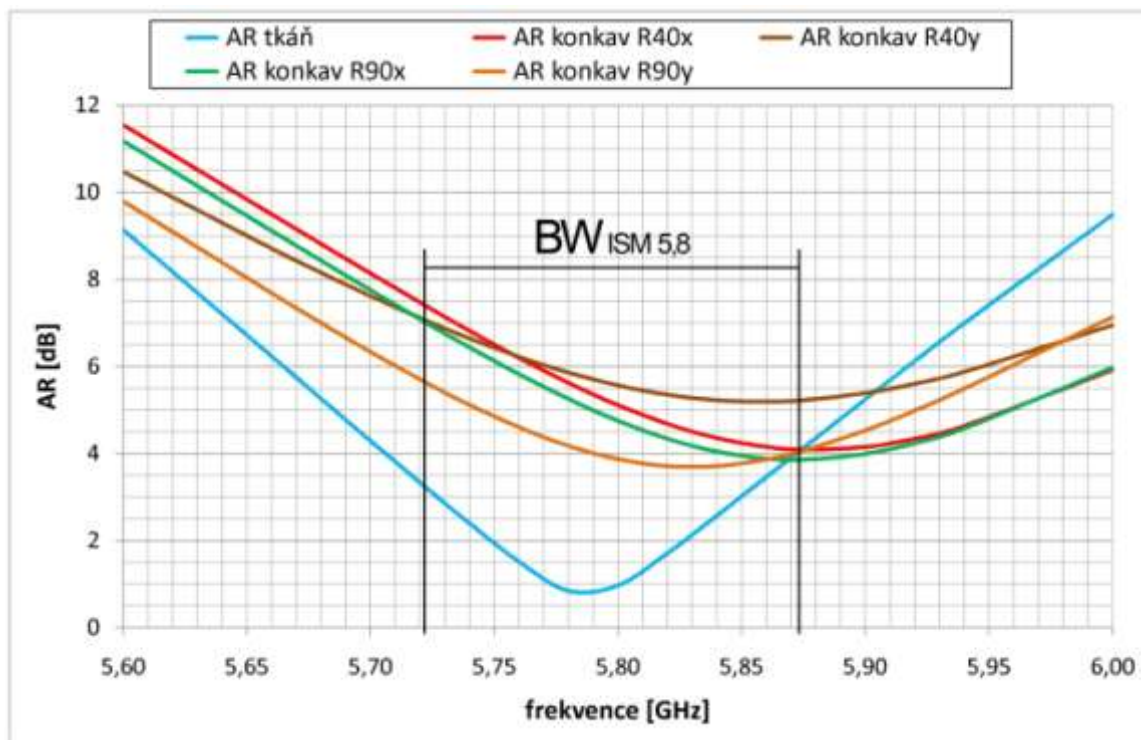


Obr. 33. Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konkávní ohyb po ose  $y$ .



Obr. 34. Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konkávní ohyb po ose  $y$ .

Axiální poměr je konkávním ohybem velice ovlivněn. Z grafu na obr. 35 je patrné, že pro žádný ze simulovaných konkávních ohybů se axiální poměr nedostane k potřebné hranici 3 dB. Navíc se také ohybem výrazně posune minimum všech průběhů směrem k vyšším frekvencím.



Obr. 35. Grafy průběhu axiálního poměru pro jednotlivé konkávní ohyby struktury.

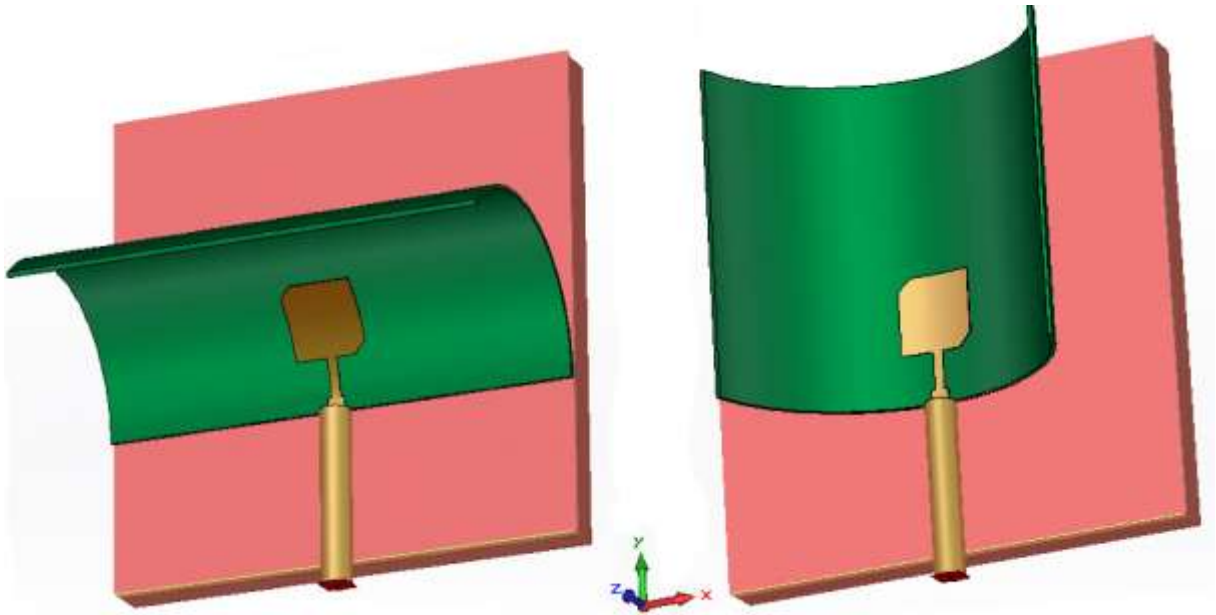
Tab. 9 číselně shrnuje sledované závislosti. Jakýmkoli konkávním ohybem dojde ke zhoršení axiálního poměru. Výraznější je tato změna pro větší ohyb s rádiem rovným 40 mm. K většímu poklesu maximálního zisku dojde při ohybu podle osy  $x$ , kdy v  $YZ$  rovině je pokles o cca 1,2 dB a v rovině  $XZ$  je pokles o cca 2 dB. Jak bylo výše zmíněno vychýlení svazku roviny  $YZ$  ohybem v ose  $x$  je způsobeno modelem. Ohyb v ose  $y$  se vyznačuje pouze působením na velikost vyzařovacího úhlu v rovině  $YZ$ , kde naroste až o  $20^\circ$ . Axiální poměr je negativně ovlivněn ohybem podle obou os. Obecně lze říci, že větší vliv na simulovanou strukturu má ohyb v ose  $x$ . Dále také platí, že podstatnější vliv na vlastnosti struktury má ohyb s nižším rádiem, tedy čím víc je struktura ohnutá tím horší jsou její výstupní vlastnosti. Každý ohyb způsobí rozladění z navrhované střední frekvence 5,8 GHz, což způsobí, že se maxima jednotlivých závislostí posunou v tomto případě směrem k vyšším frekvencím.

Konkávní ohyb				YZ rovina				XZ rovina			
rovina ohybu	úhel	$f$	axiální poměr	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku
	[°]	[GHz]	[dB]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]
x	40	5,725	7,31	5,21	24	73,6	-26,2	4,29	4	70,7	-24,9
		5,8	5,12	5,32	20	74,6	-26,4	4,62	2	70,4	-24,3
		5,875	4,10	5,36	16	75,0	-26,3	4,84	2	70,3	-24,1
	90	5,725	6,92	5,55	14	73,4	-23,0	5,13	3	69,8	-24,8
		5,8	4,75	5,71	10	73,8	-23,8	5,41	3	69,4	-24,1
		5,875	3,86	5,78	8	73,7	-23,9	5,57	2	69,2	-24,0
y	40	5,725	6,70	5,63	1	78,6	-21,9	5,61	2	65,7	-27,3
		5,8	5,59	5,90	-2	79,8	-23,5	5,90	2	65,7	-26,9
		5,875	5,23	6,01	-4	80,6	-24,5	5,99	3	66,0	-26,6
	90	5,725	5,55	5,99	2	77,2	-22,9	6,00	2	64,6	-27,7
		5,8	3,87	6,27	-1	78,4	-26,3	6,29	2	64,8	-28,4
		5,875	4,07	6,26	-4	79,2	-26,8	6,25	3	65,2	-28,4

Tab. 9. Přehledná tabulka zjištěných hodnot pro zkoumání vlivu konkávního ohybu.

## 6.5.2 Konvexní ohyb

Při umístění anténní struktury na hrudník, vnitřní část lokte nebo mezi lopatky, nastává situace, kdy se oděv prohne konvexně. Vliv ohybu je testován opět pro obě osy  $x$  i  $y$ , přičemž se tentokrát ohyb po ploše imaginárního válce provádí v opačném směru osy  $z$ . Ohyb s poloměrem  $R = 40^\circ$  simuluje umístění antény do vnitřní části loketního kloubu a ohyb s poloměrem  $R = 90^\circ$  nahrazuje umístění zařízení mezi prsní svaly nebo mezi opatky. Na obr. 36 jsou zobrazeny simulované konvexně ohnuté struktury.

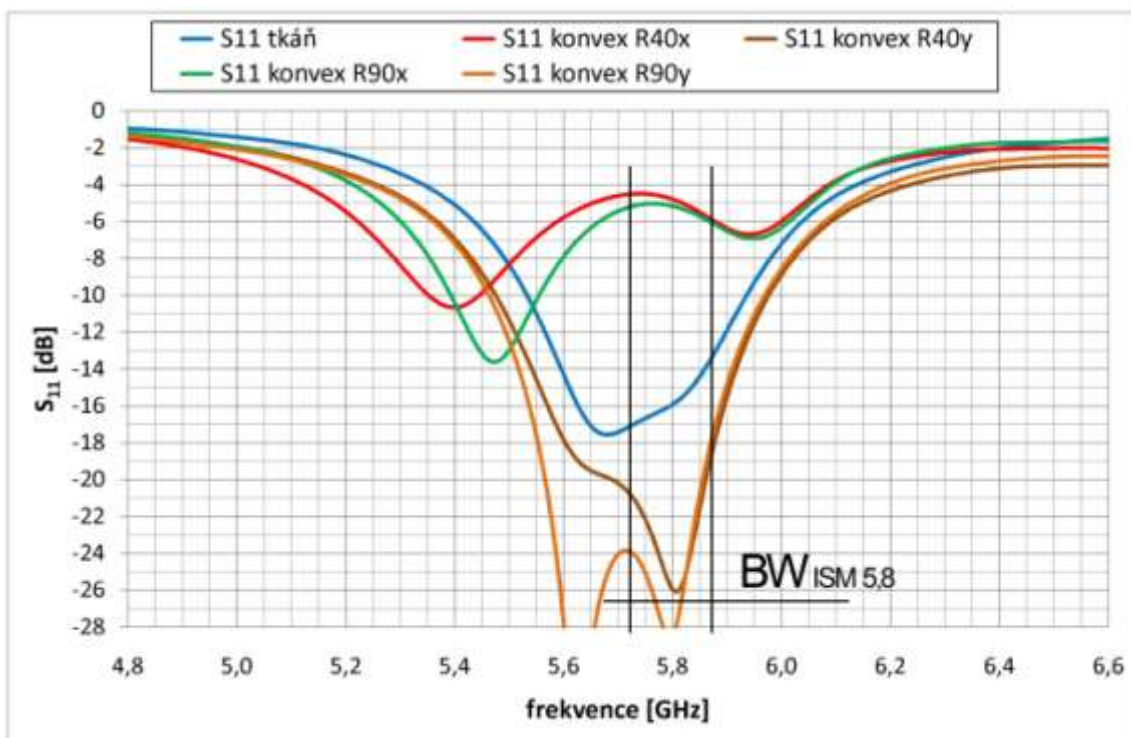


Obr. 36. Obrázky simulovaných struktur konvexního ohybu v ose  $x$  a  $y$ .

Činitel odrazu pro konvexně ohnuté antény je zobrazen na obr. 37. Konvexní ohyb v ose  $x$  má ze všech zobrazovaných závislostí nevýraznější vliv na činitel odrazu. Při tomto ohybu  $S_{11}$  nedosáhne v požadovaném pásmu potlačení 10 dB. Ohyb v ose  $y$  naopak způsobí zvětšení šířky pásma pro pokles o 10 dB oproti neohnuté struktuře a v pásmu ISM nárůst  $S_{11}$  minimálně o 4 dB. Obecně má dle simulace konvexní ohyb v ose  $y$  pozitivní vliv na činitel odrazu navrženého zařízení.

Konvexní ohyb	šířka pásma	$f_L$	$f_H$	$f_{střed}$
	[MHz]	[GHz]	[GHz]	[GHz]
$BW_{(-10dB)} tkáň$	430	5,51	5,94	5,73
$BW_{(-10dB)} R40x$	100	5,35	5,45	5,40
$BW_{(-10dB)} R40y$	500	5,47	5,97	5,72
$BW_{(-10dB)} R90x$	70	5,49	5,56	5,53
$BW_{(-10dB)} R90y$	510	5,46	5,97	5,72

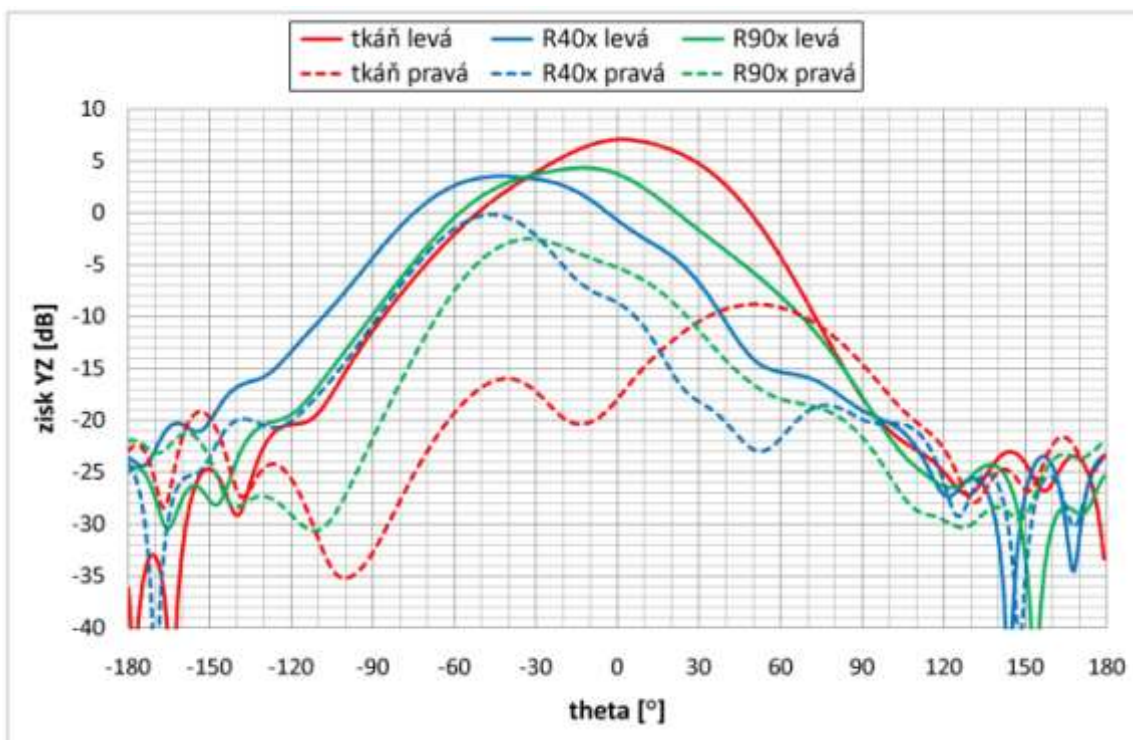
Tab. 10. Tabulka pásma poklesu o 10 dB pro konvexní ohyby.



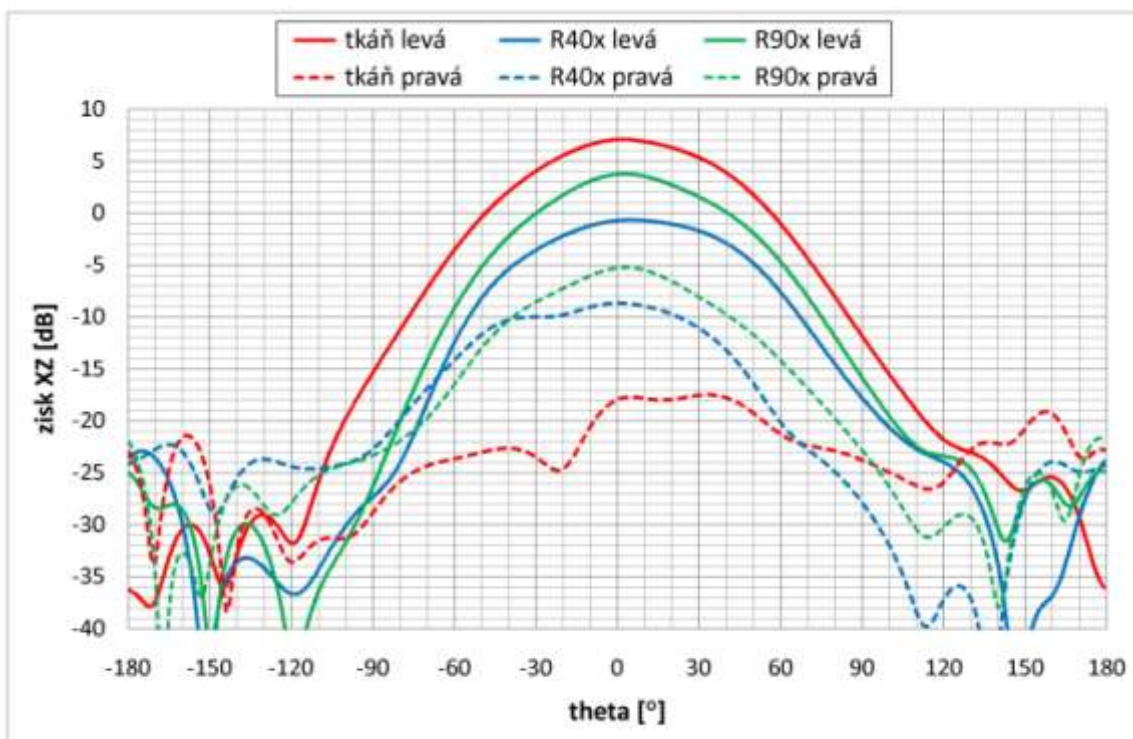
Obr. 37. Graf činitele odrazu na vstupu v závislosti na konvexním ohybu struktury.

Obr. 38 a 39 vykreslují závislosti směrových charakteristik v rovinách YZ a XZ pro ohyby v ose  $x$ . Ohyb po ose  $x$  způsobuje v rovině YZ zmenšení zisku o 3 dB. Dále se při tomto ohybu projevuje opačná pravotočivá složka, která výrazně naroste v obou případech k hodnotě 0 dB. Výrazné vychýlení hlavního svazku je způsobeno opět simulačním modelem a tento vliv se tedy nemusí uvažovat. Působení v rovině XZ je výrazné, co se týká zisku, při ohybu v jednotlivých poloměrech. Při ohybu menším poloměrem dojde k poklesu o 3 dB a ohyb větším poloměrem způsobí pokles zisku o 8 dB.

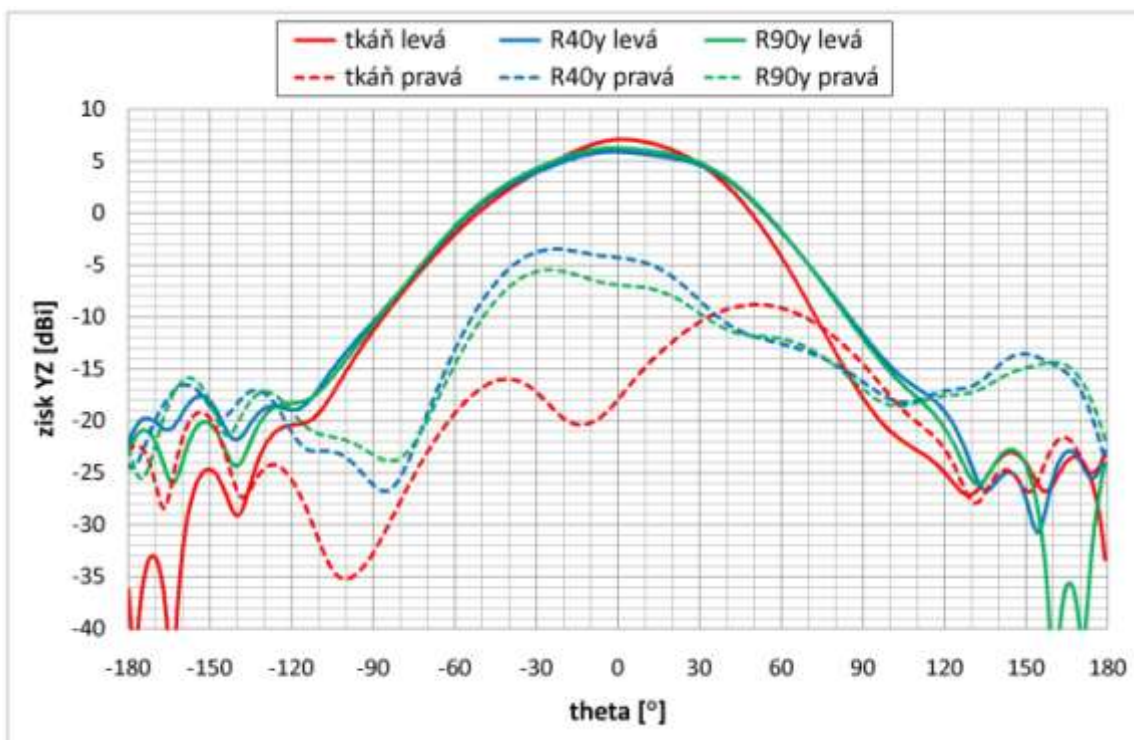
Na obr. 40 a 41 jsou zobrazeny závislosti směrových charakteristik roviny YZ a XZ při ohybu v ose  $y$ . Při ohybu v ose  $y$  dojde v rovině YZ pouze k mírnému poklesu zisku o 1 dB. Dále tento ohyb způsobí nárůst souměrnosti hlavního laloku ve směru záření. Vliv na rovinu XZ není u tohoto typu ohybu tak výrazný jako v ose  $x$ . Dojde pouze k malému poklesu zisku o 1 dB. Pravotočivá vlna se v tomto případě projevuje výrazněji a dosahuje k úrovni 0 dB.



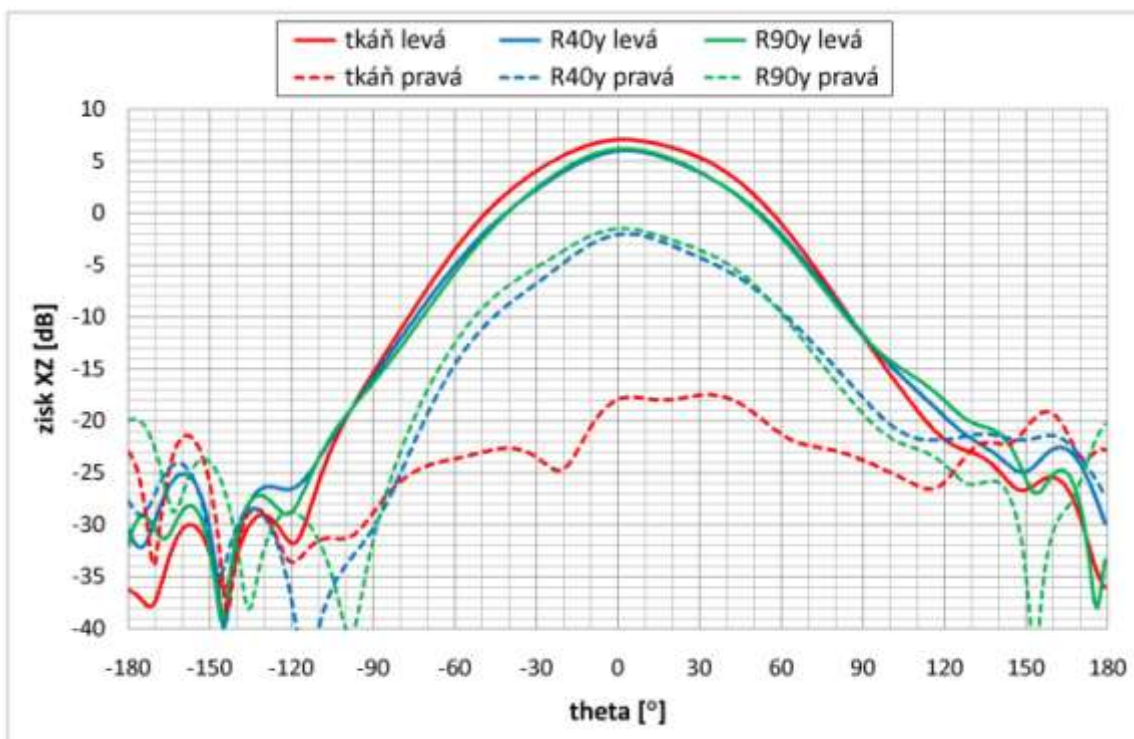
Obr. 38. Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konvexní ohyby v ose  $x$ .



Obr. 39. Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konvexní ohyby v ose  $x$ .



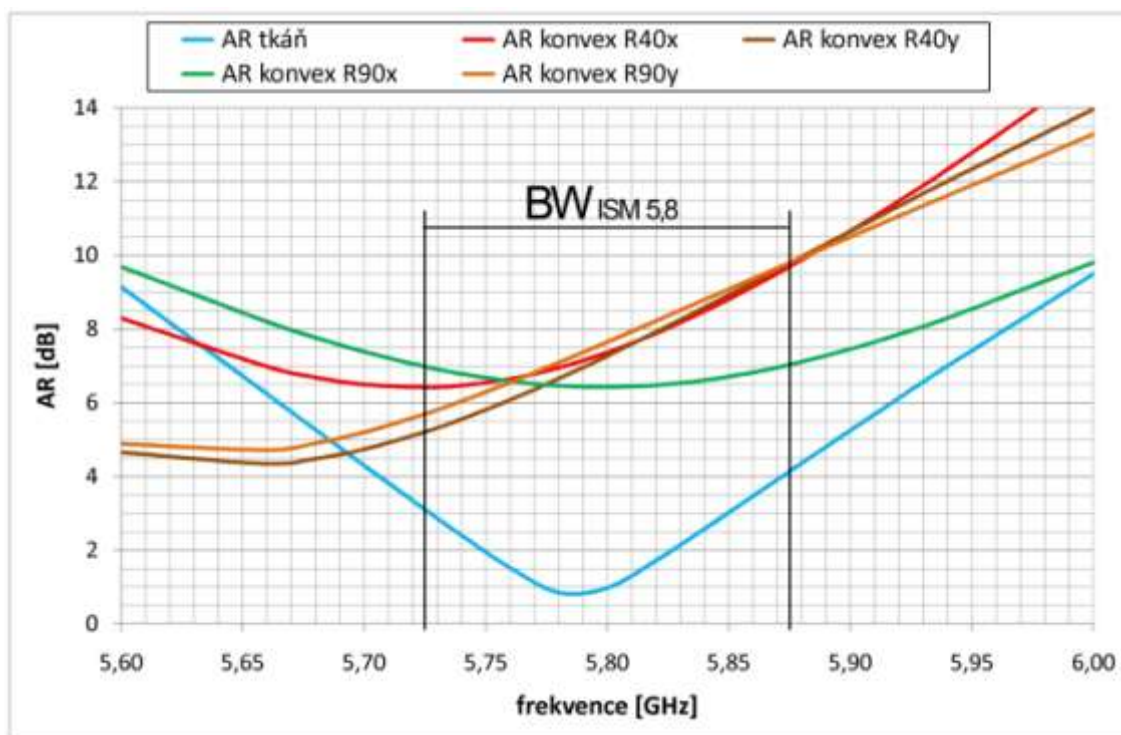
Obr. 40. Graf vyzařovací charakteristiky roviny YZ pro konvexní ohyb v ose y.



Obr. 41. Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro konvexní ohyb v ose y.



Axiální poměr je konvexním ohybem velmi ovlivněn. Oproti konkávnímu ohybu je zde posun minim jednotlivých závislostí směrem k nižším frekvencím. Opět lze pozorovat, že ani v jednom z případů se axiální poměr nedostane pod požadovanou hranici 3 dB. Nejmenší rozladění axiálního poměru dojde při ohybu s poloměrem  $40^\circ$  v ose  $x$ .



Obr. 42. Grafy průběhu axiálního poměru pro jednotlivé konvexní ohyby struktury.

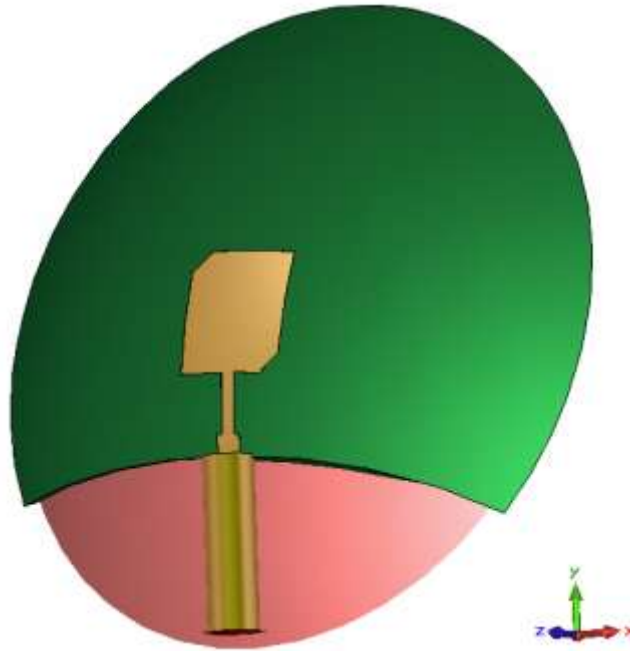
Tab. 11 uvádí přesné hodnoty sledovaných závislostí. Zle odvodit přímou závislost výstupních vlastností na axiálním poměru. Při konvexním ohybu nedosáhne axiální poměr k uvažované hranici 3 dB ani v jednom ze simulovaných případů. Zde je největší zisk vždy na spodním krajním kmitočtu tohoto pásma a s frekvenčním nárůstem klesá. Jak bylo zmíněno výše, podstatnější vliv na výstupní vlastnosti má ohyb v ose  $x$ . V rovině  $YZ$  způsobuje velmi výrazné vychýlení svazku, což je způsobeno modelem, a rovnoměrný pokles zisku v ISM pásmu. V rovině  $XZ$  je zisk potlačen k hodnotě 0 dB. Vyzařovací úhel v této rovině podobně jako v předchozích bodech narostl o  $10^\circ$ . Struktura konvexně ohnutá v ose  $y$  nevykazuje takové ovlivnění jak v případě v ose  $x$ . Zisk v obou rovinách poklesl o cca 1 dB. Vyzařovací úhel narostl pouze v rovině  $YZ$  cca o  $10^\circ$ .

Konvexní ohyb				YZ rovina				XZ rovina			
rovina ohybu	úhel	$f$	axiální poměr	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku
	[°]	[GHz]	[dB]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]
x	40	5,725	6,42	2,30	-28	72,3	-21,9	-1,07	4	77,7	-22,2
		5,8	7,37	3,52	-43	66,4	-23,8	-0,66	5	75,3	-22,2
		5,875	9,70	5,01	-46	60,4	-25,5	0,14	7	72,1	-21,1
	90	5,725	5,22	3,91	-11	67,0	-27,0	3,46	3	62,8	-27,5
		5,8	7,28	4,35	-12	66,9	-28,6	3,79	3	61,4	-28,6
		5,875	9,79	4,97	-14	66,7	-28,5	4,26	2	60,2	-29,3
y	40	5,725	6,98	6,62	-1	71,6	-25,8	6,24	3	63,0	-29,7
		5,8	6,42	6,02	-3	73,8	-27,3	6,03	3	62,1	-28,6
		5,875	7,03	5,63	-4	75,5	-27,1	5,60	3	61,4	-28,0
	90	5,725	5,69	6,51	-2	70,3	-24,7	6,52	2	61,6	-30,6
		5,8	7,65	6,23	-1	72,6	-24,8	6,20	3	61,4	-30,9
		5,875	9,79	5,81	-5	73,9	-24,4	5,73	3	61,3	-30,8

Tab. 11. Přehledná tabulka zjištěných hodnot pro zkoumání vlivu konvexního ohybu.

### 6.5.3 Ohyb po povrchu koule

Umístěním anténní struktury na rameno či koleno vzniká její ohnutí podél obou rozměrových os zároveň. Tento ohyb jde nejjednodušeji simulovat ohnutím struktury po povrchu koule s uvažovaným poloměrem. V tomto případě byly zvoleny ohyby s rádií 50° a 90°, které je možné porovnat výsledky získanými v [3]. Jednotlivé rádiové simulují umístění antény v různých polohách na rameni. Na obr. 43 je zobrazen ohyb simulované struktury po povrchu koule.

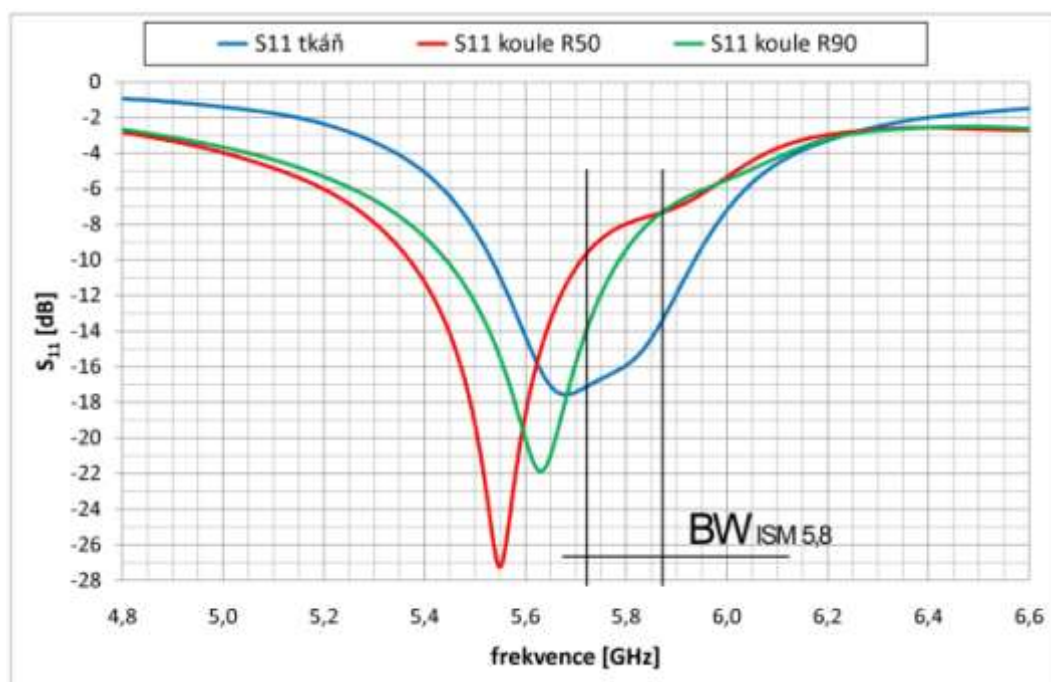


Obr. 43. Obrázek simulované struktury ohybu po povrchu koule.

Činitel odrazu pro tyto ohyby je zobrazen na obr. 44. Ohyb po povrchu koule způsobí výrazný posun střední frekvence na menší kmitočty a velký nárůst odstup signálu, čím větší ohyb tím větší odstup signálu a nižší frekvence. Dochází tedy k výraznému rozladění z uvažovaného ISM pásma. Tabulka pásma potlačení pod 10 dB je uvedena níže.

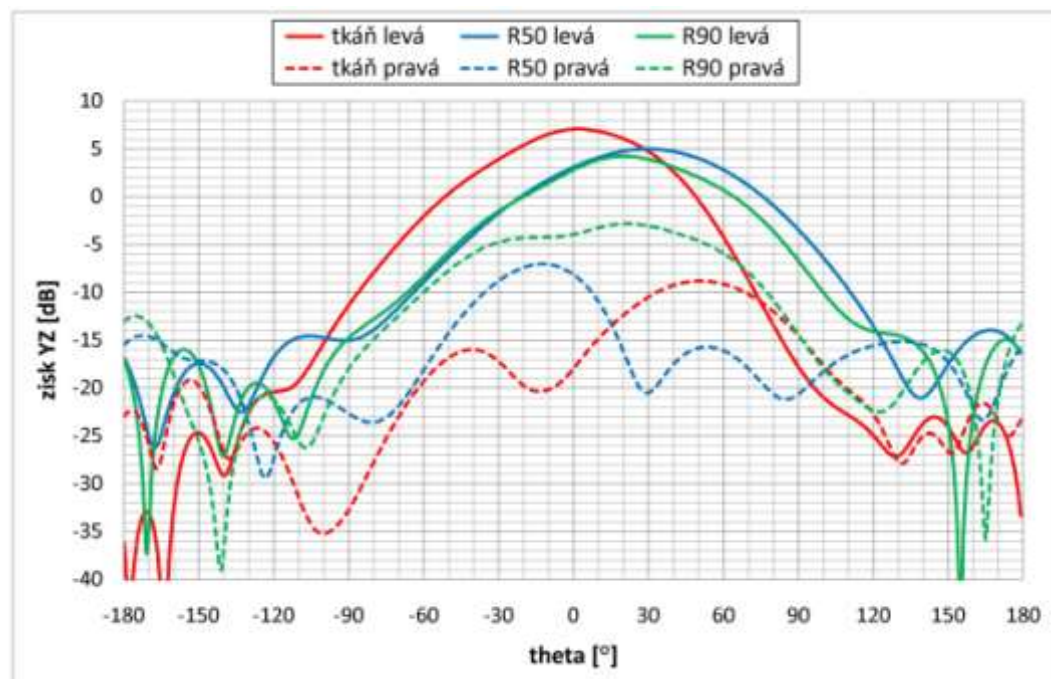
Koule ohyb	šířka pásma	$f_L$	$f_H$	$f_{střed}$
	[MHz]	[GHz]	[GHz]	[GHz]
$BW_{(-10dB)} tkáň$	430	5,51	5,94	5,73
$BW_{(-10dB)} R50$	340	5,37	5,71	5,54
$BW_{(-10dB)} R90$	340	5,45	5,79	5,62

Tab. 12. Tabulka pásma poklesu o 10 dB pro ohyb po povrchu koule.

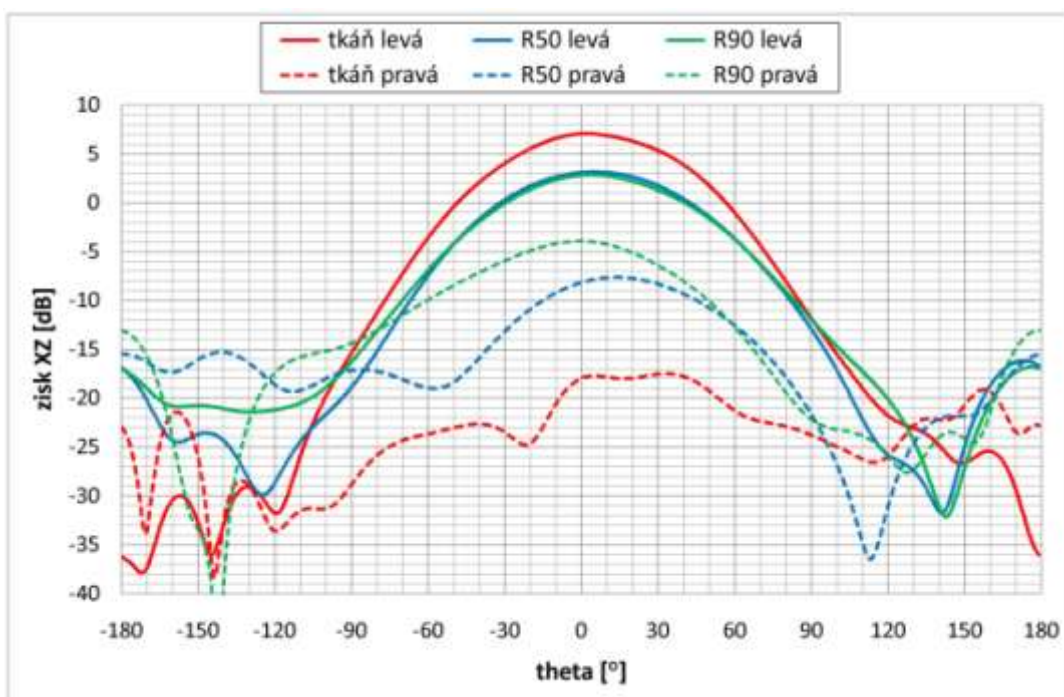


Obr. 44. Graf činitele odrazu na vstupu v závislosti na ohybu po povrchu koule.

Na obr. 45 jsou zobrazeny směrové charakteristiky v rovině YZ při ohybu po kouli. Vychýlení je opět způsobeno modelem v simulačním software a dochází k poklesu zisku 2 dB. Obr. 46 zobrazuje vyzařovací charakteristiky v rovině XZ. Tento ohyb působí pouze snížení celkového zisku oproti neohnuté struktuře a to o 4 dB.

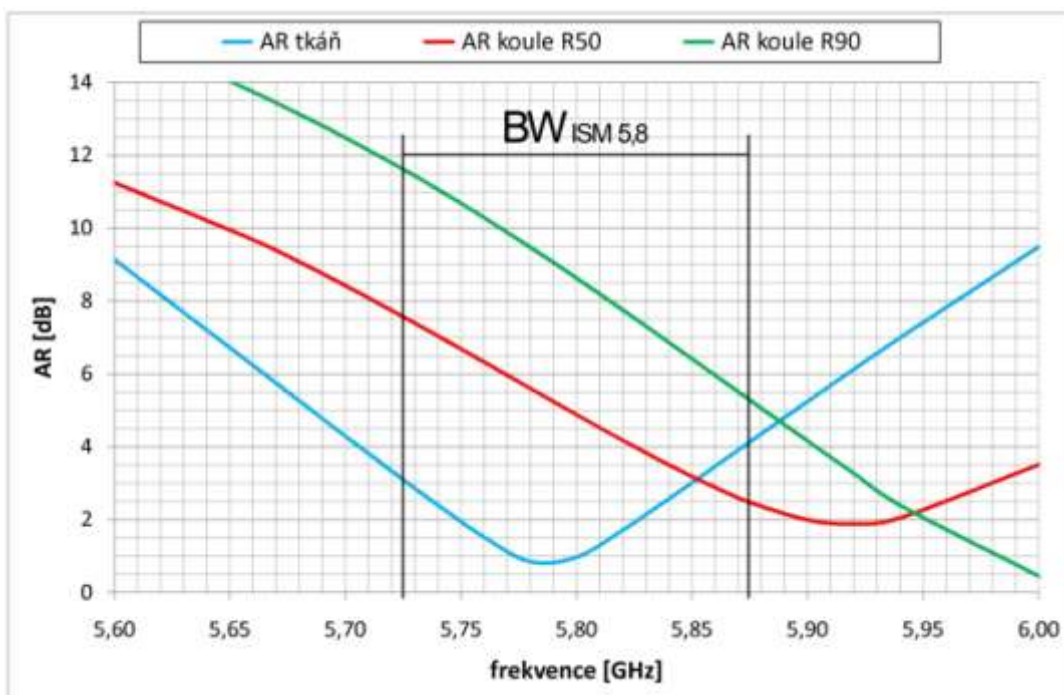


Obr. 45. Graf vyzařovací charakteristik roviny YZ pro ohyby po povrchu koule.



Obr. 46. Graf vyzařovací charakteristiky roviny XZ pro ohyby po povrchu koule.

Axiální poměr je v případě ohybu po kouli nejrozladnější ze všech simulovaných případů. Minimum se výrazně posune na vyšší frekvence mimo požadované ISM pásmo.



Obr. 47. Graf průběhu axiálního poměru pro simulované ohyby pro povrchu koule.

Tab. 13 uvádí přesné hodnoty sledovaných závislostí. Lze pozorovat, že ohybem po kouli dojde k úplnému rozladění axiálního poměru i činitele odrazu na vstupu antény, týká se to obou poloměrů ohybu. Zisk v obou rovinách je výrazně ovlivněn a to především v rovině XZ. Dále je patrný velký nárůst úrovně bočních laloků až o 10 dB. Je překvapivé, že neplatí stejné pravidlo jako při konkávním a konvexním ohybu, kdy měl větší poloměr negativnější vliv na výstupní vlastnosti. V tomto případě se lepšími vlastnostmi vyznačuje větší ohyb.

Ohyb po kouli			YZ rovina				XZ rovina			
úhel	$f$	axiální poměr	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	úroveň bočního laloku
[°]	[GHz]	[dB]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]	[dBi]	[°]	[°]	[dBi]
50	5,725	7,57	4,74	30	71,9	-18,0	2,71	6	73,1	-18,5
	5,8	4,88	5,01	30	74,0	-18,9	3,17	5	72,4	-19,3
	5,875	2,48	4,88	29	76,6	-19,7	3,30	4	71,9	-19,5
90	5,725	11,06	3,59	20	66,7	-17,5	2,20	4	73,1	-17,5
	5,8	8,63	4,26	20	67,7	-19,2	2,87	4	71,7	-19,7
	5,875	5,28	4,69	20	69,3	-20,0	3,40	3	70,5	-20,6

Tab. 13. Přehledná tabulka zjištěných hodnot pro zkoumání vlivu ohybu po kouli.

#### 6.5.4 Shrnutí simulovaných závislostí

Ve třech předchozích kapitolách byly uvedeny výsledky simulací vybraných ohybů. Celkově lze tvrdit, že ohyby mají na navrženou anténní strukturu vždy negativní vliv. Ve všech případech se jedná o zhoršení kvality axiálního poměru. Působení na činitel odrazu je velice individuální dle uvažovaného ohybu a jeho velikosti. Co se týče vyzařovacích diagramů, je zde především vliv na zisk ve směru záření a vždy zvětšení vyzařovacího úhlu (-3dB). Vzhledem k výsledkům získaným pomocí simulací lze tedy tvrdit, že navržená anténa je, při mírném zanedbání požadavků na axiální poměr, použitelná pro konkávní a konvexní ohyby v ose  $y$  a to i při uvažování větších ohybů. Ohyby po povrchu koule a v ose  $x$  jsou tedy pro tuto anténu nevhodné.

## 7 MĚŘENÍ NA REALIZOVANÝCH ANTÉNÁCH

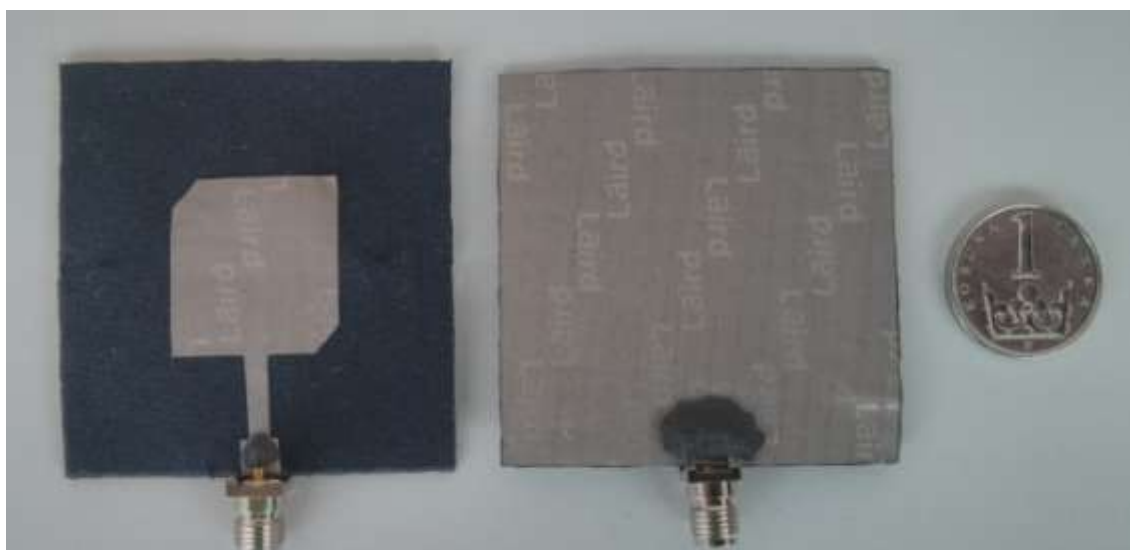
Navržená anténa byla realizována na nosný dielektrický materiál softshell skládající se ze dvou vrstev, voděodolné membrány a nosného fleecu. Vybraný softshell disponuje následujícími vlastnostmi; výška 1,2 mm; složení 100 % polyester; gramáž 308 g/m<sup>2</sup>; relativní permitivita 1,29 a ztrátový úhel 0,02; pro které byla anténa v kapitole 6.2 navržena. Anténa i její zářič byly na toto dielektrikum vyrobeny pomocí tří různých technologií.

Prvním způsobem realizace bylo plátování popsané v kapitole 5.2.3. Anténní motiv byl vyroben, z důvodu potřeby vysoké přesnosti, pomocí vyleptání v chloridu železitém z elektrovedivé fólie firmy ELCHEMCo [14]. Vlastnosti této fólie; substrát měď; výška 0,04 mm; plus nanesená vrstva elektricky vodivého lepidla na spodní straně. Tato fólie je pájitelná a tudíž k ní mohl být vstupní SMA konektor připájen. Anténa je ukázána na obr. 48.



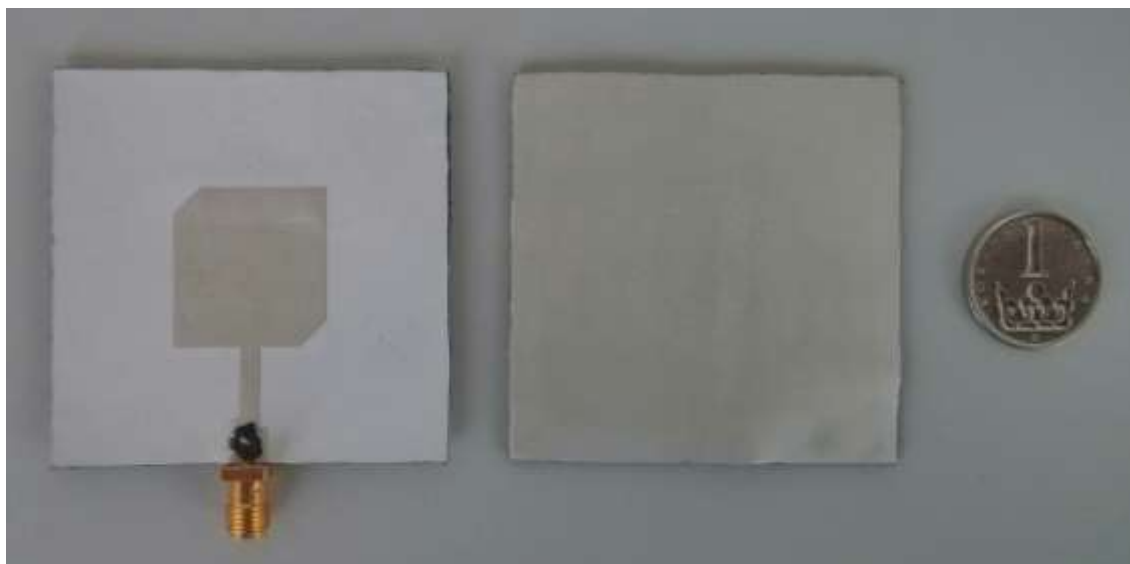
Obr. 48. Plátovaná anténa.

Druhou použitou technologií výroby antény, bylo využití elektrovedivé textilie. Anténní motiv byl z textilie vyřezáván pomocí skalpelů a kancelářské řezačky. Tato metoda výroby nedosahuje, co se týče rozměrové přesnosti, takových kvalit jako předchozí, ale vyřezání motivu pomocí laseru nedostupné. Na výrobu byla použita textilie firmy LairdTech [15]. Elektrovedivá tkanina vykazuje následující vlastnosti: název Ni/Cu Polyester Mesh; výška 0,178 mm; gramáž 70 g/m<sup>2</sup>. Připevnění motivu na nosné dielektrikum se v tomto případě provádí pomocí laminačního lepidla společnosti 3M [16], které má tloušťku 50 μm. Konektor se v tomto případě na anténu spojuje pomocí elektrovedivého lepidla na bázi uhlíku [17]. Realizace antény je na obr. 49.



Obr. 49. Anténa vyrobená pomocí elektrovedivé textilie.

Posledním způsobem realizace anténního zařízení byla technologie sítotisku. Postup výroby pomocí sítotisku je popsán v kapitole 5.2.2. Motiv antény byl vyroben pomocí vodivé barvy PSC 1901-S [17] s příměsí stříbra. Barva má následující vlastnosti: rezistivita  $< 20 \text{ m}\Omega/\text{m}$ ; průměrné krytí  $100 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Pro rovnoměrné nanesení barvy a zabránění jejího prosáknutí do tkaniny, byla na nosný textil nažehlena z obou stran srovnávací fólie. Konektor se v tomto případě připojuje pomocí elektrovedivého lepidla jako v případě elektrické textilie. Anténa vyrobená pomocí sítotisku je na obr. 50.



Obr. 50. Anténa vyrobená pomocí sítotisku.

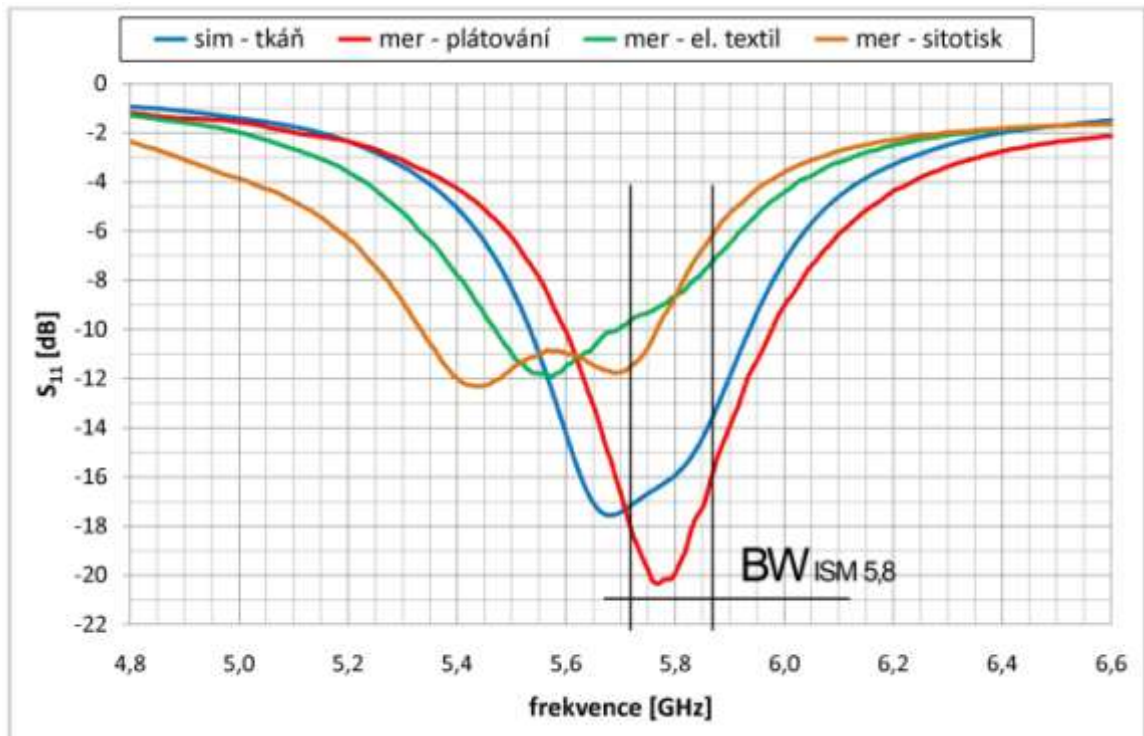


## 7.1 Měření činitele odrazu na vstupu antény

Zjištění činitele odrazu je nejjednodušejí proveditelné měření. Porovnáním simulovaných a měřených  $S_{11}$  se určí, které typy antén budou preferovány pro měření směrových charakteristik v bezodrazové komoře.

### 7.1.1 Měření činitele odrazu vyrobených vzorků

Změřené činitele odrazu antén vyrobených výše zmíněnými postupy lze sledovat na obr. 51. Nejlepší vlastnosti vykazuje anténa vyrobená pomocí technologie plátování. Její střední frekvence je jen nepatrně vychýlená od střední frekvence zvoleného ISM pásma a odstup signálů na vstupu je v celém pásmu menší než -16 dB. Anténa vyrobená pomocí elektrovodivé textilie má výrazněji vychýlenou střední frekvenci a nedosahuje v žádné části svého průběhu pod -10 dB. Tato skutečnost může být z části způsobena jak nepřesným vyřezáváním anténního motivu, tak i samotnými elektrickými vlastnostmi textilie, které nedosahují kvalit měděné fólie. Poslední použitou technologií je sítotisk. Rezonanční frekvence sítotiskové antény je rozladěna více, než je tomu v obou předchozích případech. Tato změna je způsobena výrobním postupem sítotisku. Použití pomocné nažehlovací fólie změnilo uvažované hodnoty permitivity a výšky substrátu natolik, že došlo ke snížení rezonanční frekvence na hodnotu okolo 5,6 GHz. Pásmo odstupu pod -10 dB je u této antény k nalezení a tudíž, lze tvrdit, že jednoduchou úpravou rozměrových parametrů  $W$  a  $L$ , by se anténa dala doladit na správnou frekvenci.



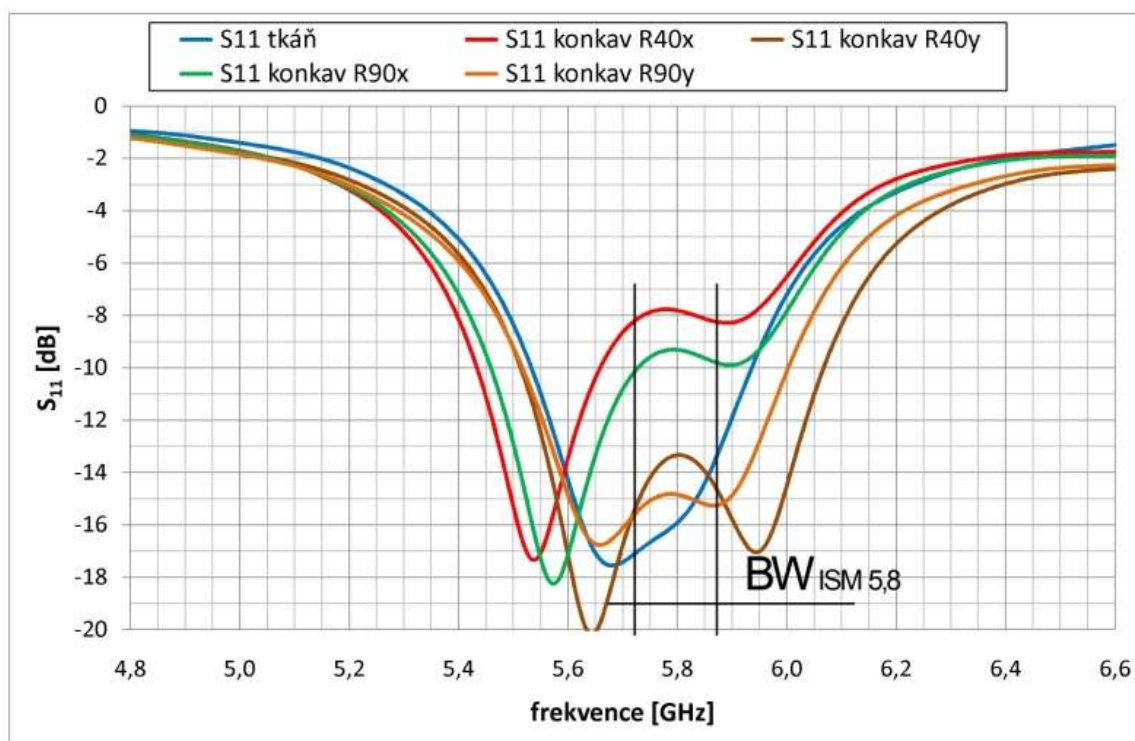
Obr. 51. Porovnávací graf činitele odrazu na vstupu pro jednotlivé technologie výroby.

Závěry vyplývající z grafu na obr. 51 jsou následující. Pro další zkoumání vlivu ohybů a možné měření vyzařovacích charakteristik jsou vhodné antény vyrobené pomocí technologie plátování a sítotisku. Plátování protože vykazuje nejlepší  $S_{11}$  a téměř žádné frekvenční vychýlení. Sítotisk splňuje požadovaný odstup signálu na vstupu a problematiku rozladění z ISM pásma lze v tomto případě neuvažovat z důvodu, zmíněném výše v kapitole.

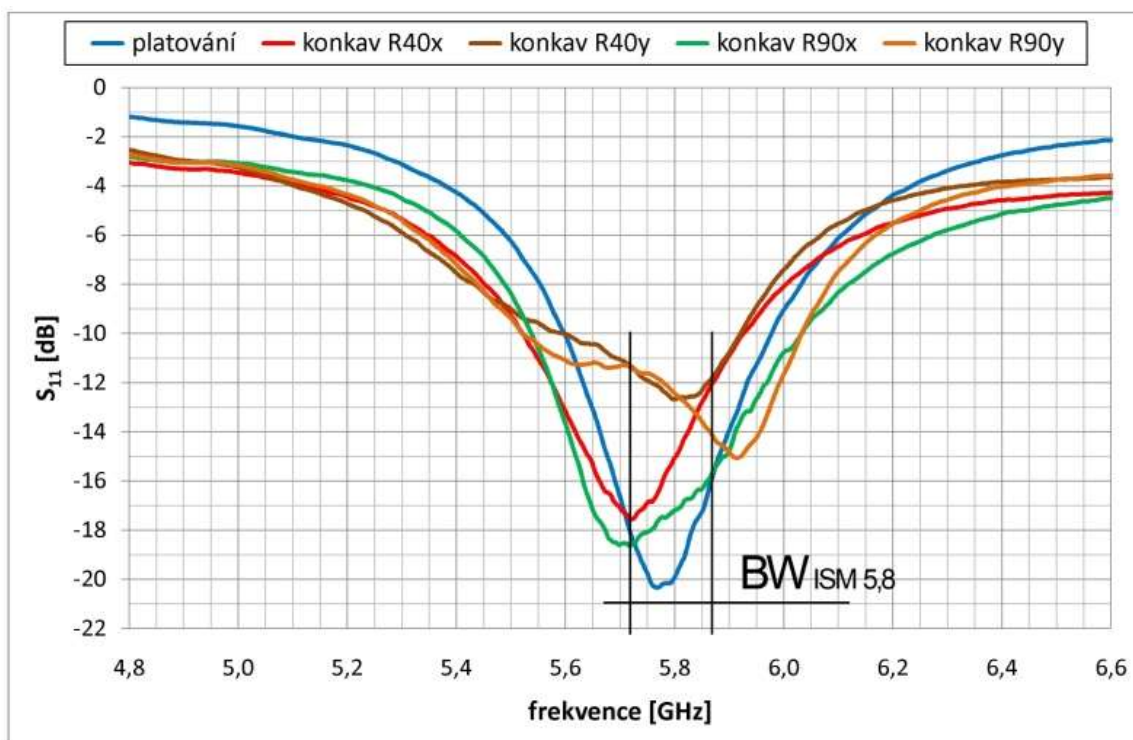
### 7.1.2 Měření činitele odrazu v ohybech

Pro měření ohnutých struktur antény byly vyrobeny polystyrénové držáky s jednou zkosenou stranou v požadovaném úhlu ohybu. Polystyrén byl zvolen jako nejvhodnější materiál, protože má elektrické vlastnosti velice blízké vzduchu. Velice jednoduše se z něj dají vyrobít požadované struktury pomocí odporové rezačky. Obrázky vyrobených držáků jsou uvedeny v příloze B.

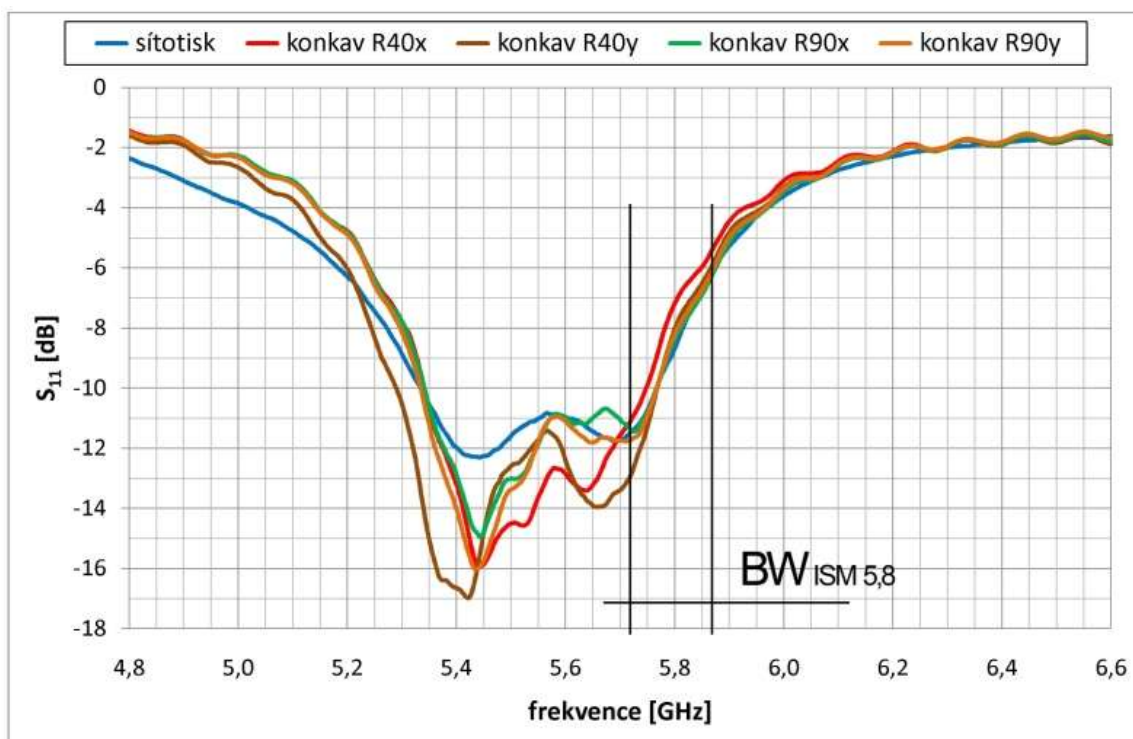
Pro porovnání simulovaných a měřených  $S_{11}$  pro konkávní ohyb zvolených antén jsou zobrazeny grafy na obr. 52 až 54. Při pohledu do grafů plátované antény je patrné, že oproti simulaci, kdy se ohyby v ose  $x$  jeví jako nepoužitelné, vykazují v tomto případě lepší vlastnosti než ohyby v ose  $y$ . Ohyby v ose  $y$  nevykazují tak vysoký odstup jako v simulacích, ale i přes to se v požadovaném ISM pásmu dostanou pod požadovaných  $-10$  dB. Grafy ohybu antény vyrobené sítotiskem jsou velice podobné grafu neohnuté antény. Vzhledem k uvažovanému posunu rezonanční frekvence lze tvrdit, že splňují požadavky na  $S_{11}$  ve všech konkávních situacích. Zvlnění v grafech je způsobeno nevhodným nastavením vektorového analyzátoru.



Obr. 52. Graf simulovaných  $S_{11}$  konkávních ohybů.

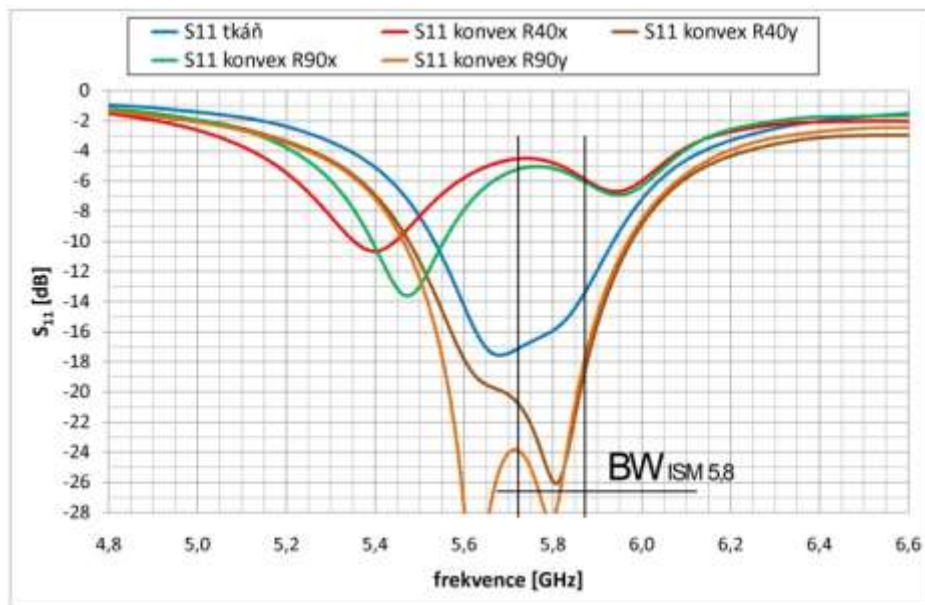


Obr. 53. Graf měřených  $S_{11}$  konkávních ohybů plátované antény.

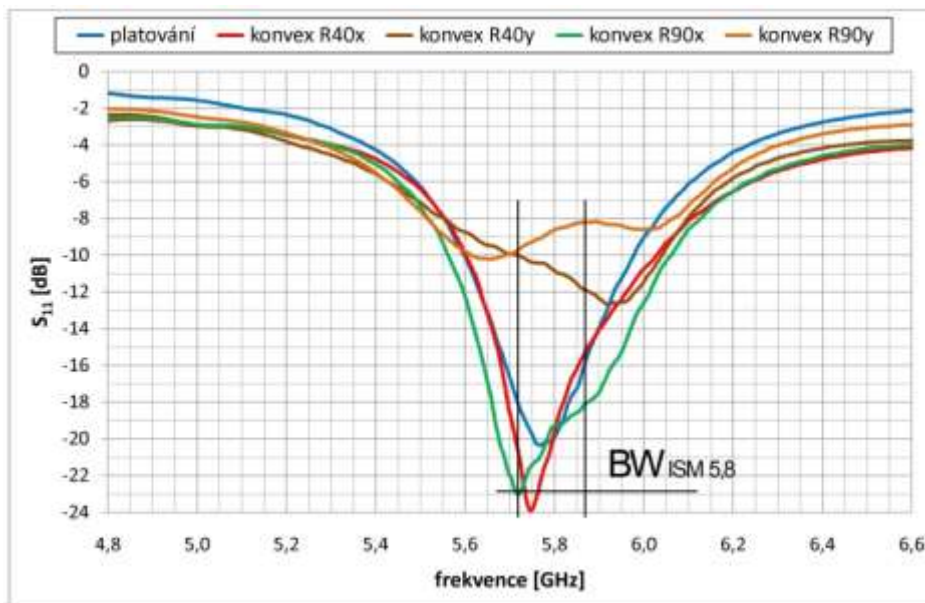


Obr. 54. Graf měřených  $S_{11}$  konkávních ohybů sítotiskové antény.

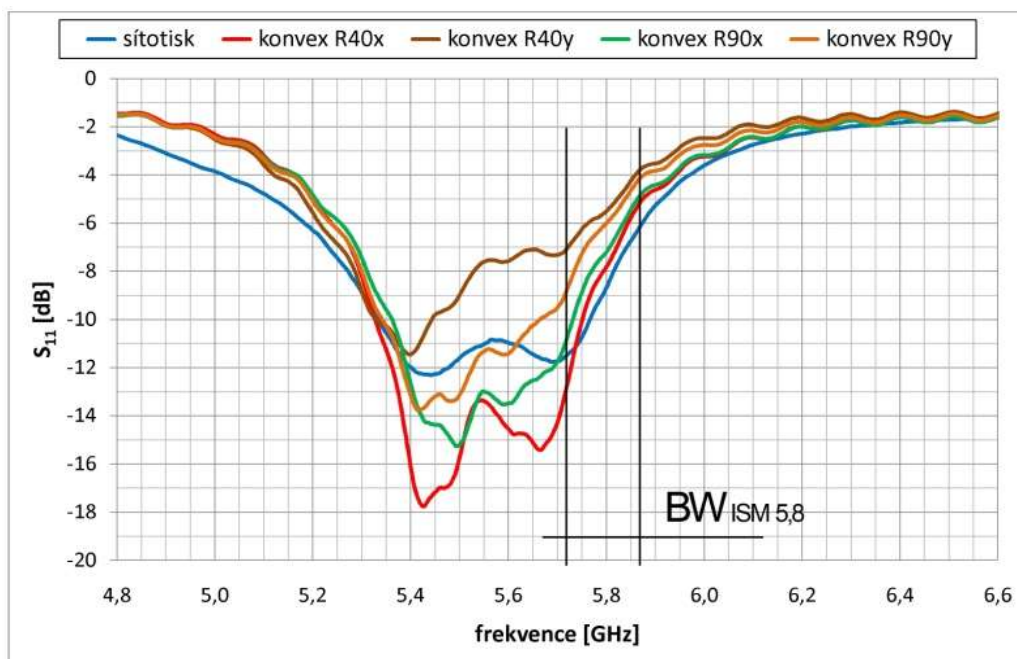
Grafy simulovaných a měřených závislostí  $S_{11}$  pro konvexní ohyby jsou zobrazeny na obr. 55 až 57. U plátované antény platí podobné závěry jako při konkávním ohybu. Ohyby v ose  $x$  mají výrazně lepší vlastnosti než ohyby  $y$ , což je v rozporu se závěry ze simulací. Navíc menší konvexní ohyb v ose  $y$  nedosahuje požadovaných parametrů odstupů signálu, což je překvapivé. Závislosti pro sítotiskovou anténu jsou průběhově opět velice podobné grafu pro neohnutou strukturu, ale platí stejná skutečnost, jako pro konvexní ohyb u plátované antény, že ohyb v  $y$  je horší než v  $x$ . V tomto případě natolik, že oba ohyby podle osy  $y$  nesplňují požadavek na  $S_{11}$  menší než -10 dB.



Obr. 55. Graf simulovaných  $S_{11}$  konvexních ohybů.

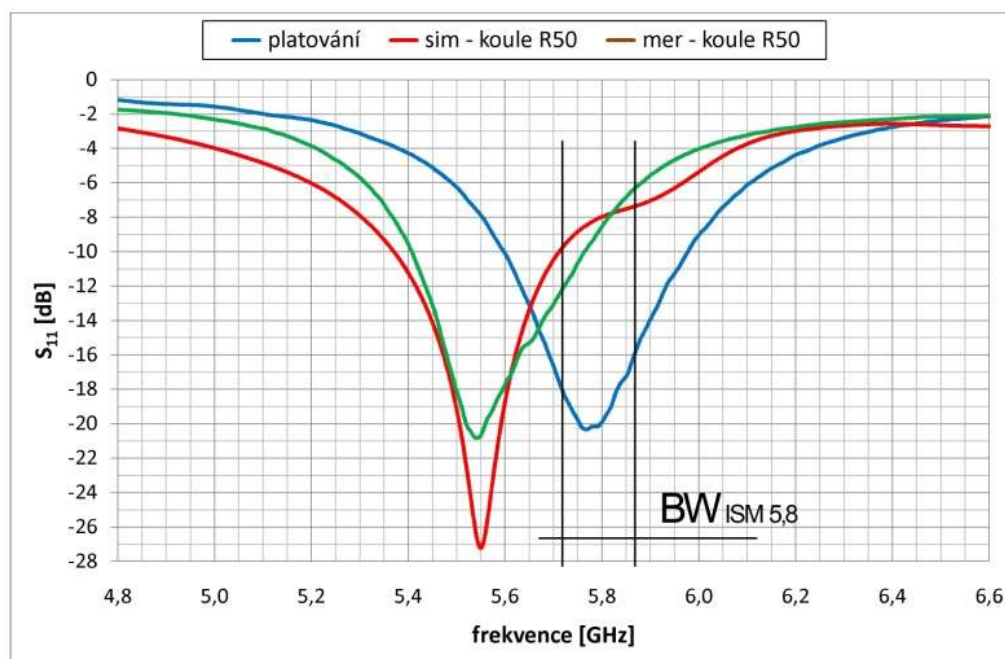


Obr. 56. Graf měřených  $S_{11}$  konvexních ohybů plátované antény.



Obr. 57. Graf měřených  $S_{11}$  konvexních ohybů sítotiskové antény.

Obr. 58 prezentuje vliv ohybu po povrchu koule s rádiem 50. V tomto případě byla změřena pouze anténa vyrobená pomocí plátování. V grafu jsou vyneseny závislosti  $S_{11}$  simulovaného ohybu, měřeného ohybu a reference neohnutého plátu. V tomto případě grafické závislosti potvrzují skutečnost, že tímto ohybem dojde k výraznému rozladění rezonanční frekvence a tento ohyb je nepoužitelný.



Obr. 58. Graf simulovaného a změřeného  $S_{11}$  pro ohyb po povrchu koule.

### 7.1.3 Měření činitele odrazu na fantomu

Pro ověření vlastností navržené antény v blízkosti lidské tkáně, jak bylo prováděno v simulacích, byly vyrobeny fantomy lidské tkáně. Gelový fantom má svými vlastnostmi odpovídat vlastnostem lidské tkáně. Je odlit z látky zvané modifikovaná agarová hmota do požadovaného tvaru. Pro měření byly vytvořeny tři fantomy lidské tkáně, to pro rovinu a konkávní, konvexní ohyb s rádiem 90. Vytvořené fantomy se na frekvenci 5,8 GHz vyznačují relativní permitivitou  $\epsilon_r = 48$  a měrnou vodivostí  $\sigma = 8$  S/m. Obrázky všech fantomů je možné si prohlédnout v příloze C.

Dle předpokladů bylo měření činitele odrazu na fantomech téměř identické s hodnotami získanými pomocí držáků vyrobených z polystyrénu, proto nejsou v této kapitole uvedeny žádné grafické závislosti.

### 7.1.4 Shrnutí měření činitel odrazu

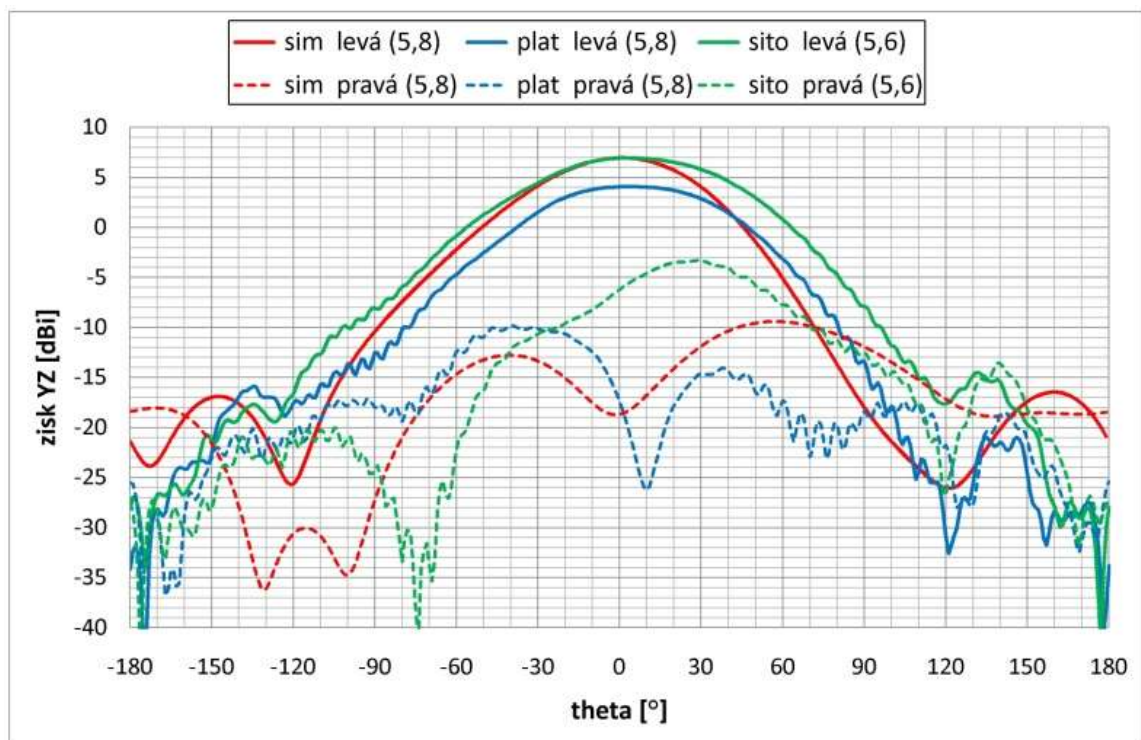
Ze zjištěných poznatků a závěrů z kapitol 6.4, 6.5 a 7.1 lze říci, že vypočítané vlastnosti simulací a měření se rozcházejí ve výběru vhodných ohybů pro měření v bezodrazové komoře. Simulované parametry  $S_{11}$  ukazují spíše na ohyby podle osy  $y$ , přičemž, měřené závislosti  $S_{11}$  poukazují spíše na ohyby podle osy  $x$ . Anténa vyrobená pomocí plátování vykazuje lepší vlastnosti, co se odstupem signálu ve vhodném ohybu týče. Sítotisková anténa není naopak v parametru  $S_{11}$  tolik ohybem ovlivněna a průběhy na ní změřené jsou si ve většině simulovaných situací velmi podobné. Zároveň je nutné říci, že neustálé mechanické působení na plátovanou anténu, zapříčiňuje záporný vliv na její strukturu, což způsobuje zhoršování jejích vlastností a viditelné nerovnosti ve struktuře. Na sítotiskovou anténu mechanická manipulace nepůsobí viditelným poškozením a elektrické vlastnosti nejsou nijak ovlivněny.

## 7.2 Měření směrových charakteristik

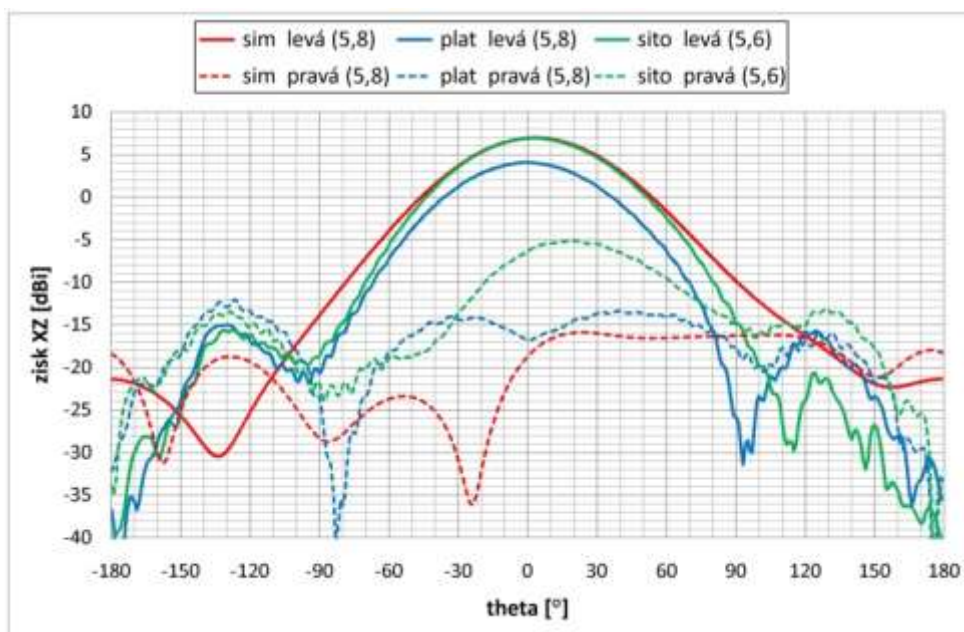
Pro ověření správnosti návrhu byly v bezodrazové komoře nejprve proměřeny vybrané antény samostatně bez vlivu ohybu či lidské tkáně. Anténa vyrobená pomocí plátování byla změřena na střední frekvenci ISM pásma 5,8 GHz, pro kterou byla navržena. Anténa vyrobená pomocí sítotisku, jejíž rezonanční frekvence poklesla z důvodu postupu výrobní technologie (viz kap. 7.1.1) byla proměřena na frekvenci 5,6 GHz.

### 7.2.1 Měření směrových charakteristik vyrobených vzorků

Sledované směrové charakteristiky jsou vyneseny na obr. 59 a 60. Z obr. 59 vyplývá, že plátovaná anténa má oproti návrhu 3 dB útlum levotočivé vlny ve směru záření. Sítotisková anténa se vyznačuje shodným ziskem, nárůstem vyzařovacího úhlu a větší symetričností podle směru záření. Na druhou stranu se u ní více uplatňuje pravotočivá složka, což je způsobeno měřením na ne úplně přesně určené rezonanční frekvenci této antény. Obr. 60 zobrazuje směrové charakteristiky vyrobených antén v rovině XZ. V tomto případě platí podobné závěry jako v rovině YZ, krom nárůstu vyzařovacího úhlu sítotiskové antény.

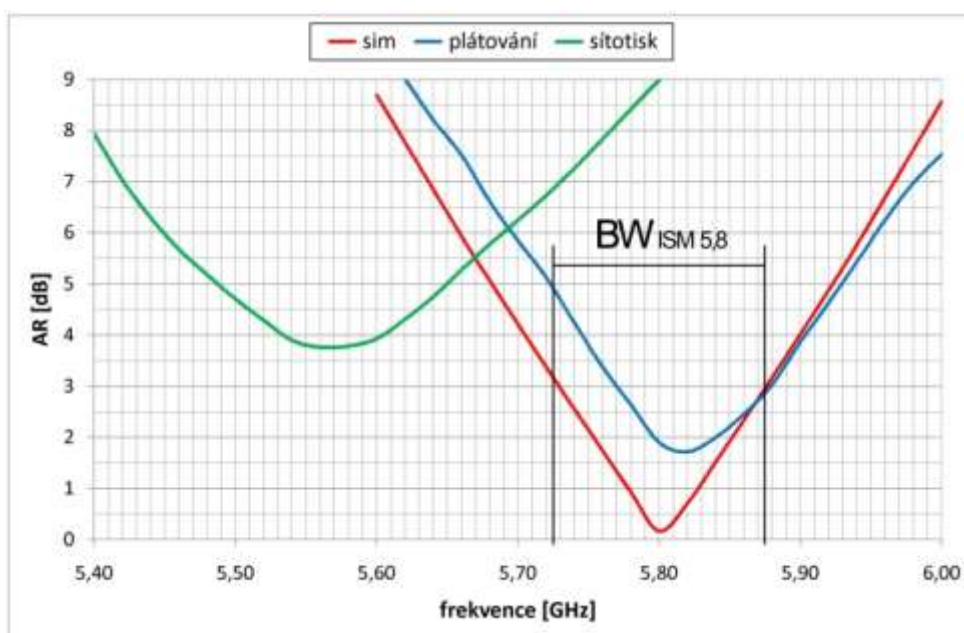


Obr. 59. Graf směrových charakteristik vyrobených antén v rovině YZ.



Obr. 60. Graf směrových charakteristik vyrobených antén v rovině XZ.

Axiální poměr vyrobených antén je ukázán na obr. 61. U plátované antény je minimum AR jen nepatrně vychýleno ze střední frekvence ISM pásma a úroveň na jednotlivých hranicích je značně nevyvážená. Ze závislosti síťotiskové antény, je patrné, že zvolená měřicí frekvence 5,6 GHz, není nejpřesněji nastavená a rezonanční frekvence antény se spíše pohybuje na 5,57 GHz. Ale z hlediska uvažování šířky požadovaného ISM pásma (150 MHz), lze tvrdit, že pro síťotiskovou anténu nevzroste axiální poměr nad hodnotu 5 dB. Tato skutečnost platí i pro plátovanou anténu.



Obr. 61. Graf axiálních poměrů vyrobených antén.



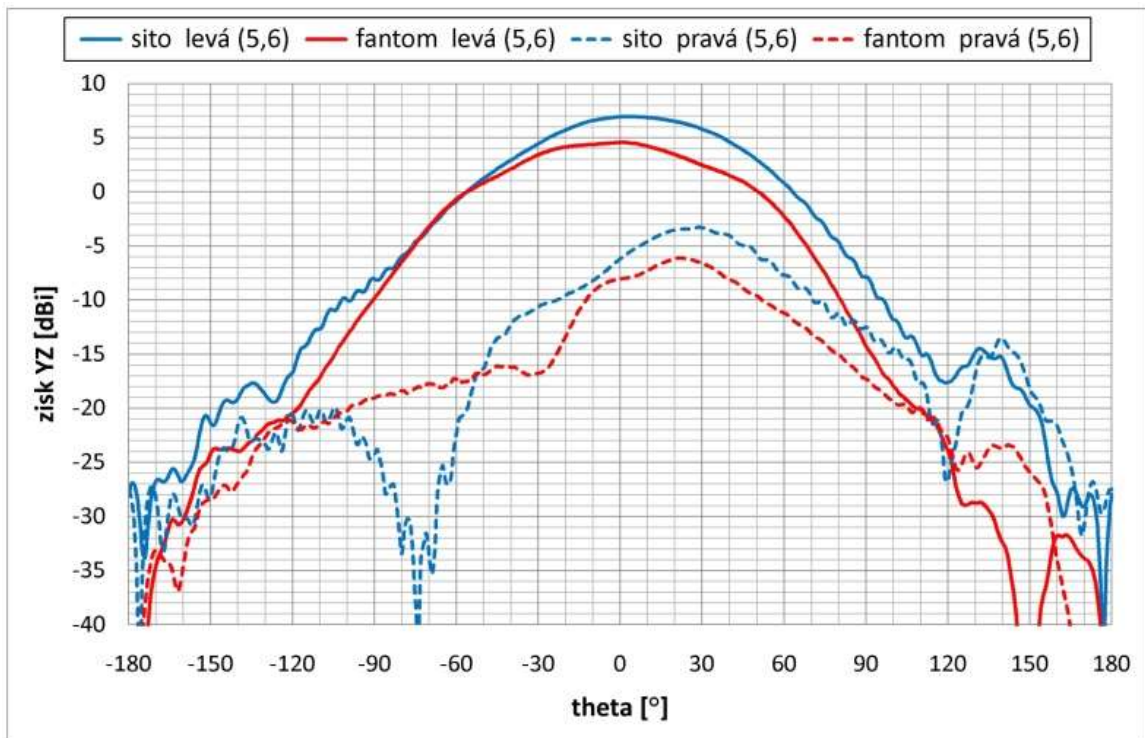
Tab. 14 přehledně shrnuje hodnoty vyrobených antén vzhledem k provedeným simulacím. Hodnoty v tabulce potvrzují fakta vysledované v předchozích třech obrázcích. Pokles zisku u antény vyrobené plátováním, nárůst vyzařovacího úhlu oproti simulaci v rovině YZ a zvýšení úrovně bočních laloků u vyrobených antén. Sítotisková anténa předčí, co se vyzařovacích charakteristik týče, plátovanou téměř ve všech směrech, krom maxima axiálního poměru a velikosti činitele odrazu. Proto byla -pro další zkoumání vlivu přítomnosti lidské tkáně a ohybu vybrána už jen sítotisková anténa.

Porovnání			simulace		plátování		sítotisk	
YZ rovina	zisk	[dBi]	6,97		4,07		6,92	
	vychýlení svazku	[°]	1		3,00		2	
	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	[°]	61,6		74,0		79,0	
	úroveň bočního laloku	[dBi]	-23,4		-20,9		-14,3	
XZ rovina	zisk	[dBi]	6,99		4,08		6,94	
	vychýlení svazku	[°]	3		0,00		2	
	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	[°]	63,7		62,0		62,0	
	úroveň bočního laloku	[dBi]	-28,4		-15,0		-15,6	
axiální poměr	[dB]	spodní hranice	[GHz]	5,725	3,17	4,96	5,528	4,29
		střední kmitočet	[GHz]	5,8	0,17	1,91	5,6	3,93
		horní hranice	[GHz]	5,875	2,96	3,04	5,675	5,80
S11	činitel odrazu	[dB]	5,8	-12	-20	5,6	-11	

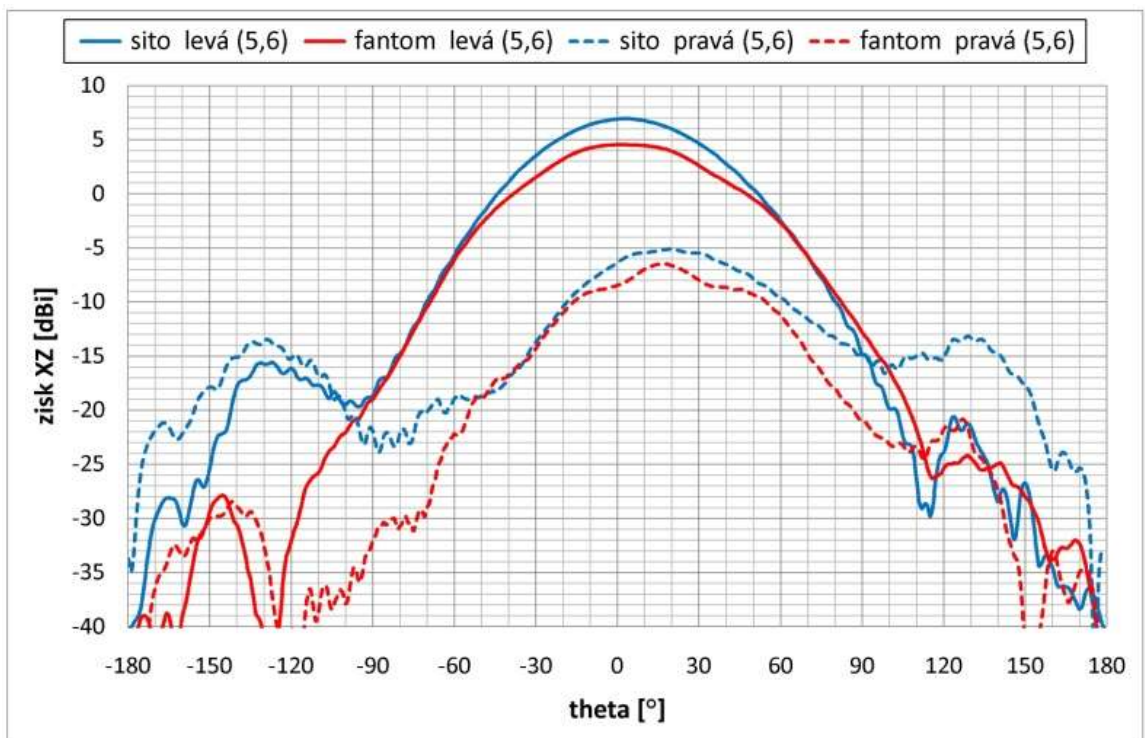
Tab. 14. Přehledná tabulka k porovnání hodnot vyrobených antén.

## 7.2.2 Měření směrových charakteristik na fantomu

Dle provedených simulací a měření  $S_{11}$  provedeném na fantomech (viz kap. 7.1.3) lze očekávat, že měření na rovném fantomu by nemělo mít na směrové charakteristiky antény téměř žádný vliv. Z grafů vynesných na obr. 62 a 63 však vyplývá, že tomu tak není. Umístění antény do přítomnosti fantomu sníží zisk o cca 2,5 dB ve směru záření v obou rovinách. V rovině YZ navíc způsobí zmenšení velikosti vyzařovacího úhlu. Tento útlum je ale způsoben použitím tří pomocných nastavovacích spojek, které byly využity pro připojení měřícího zařízení k anténě upevněné na fantom. Bylo provedeno informativní měření přenosu na spojkách a na frekvenci 5,6 GHz vykazovali útlum cca 2,1 dB. Vliv fantomu se tedy omezuje na cca 0,4 dB útlumu, tedy minimální.

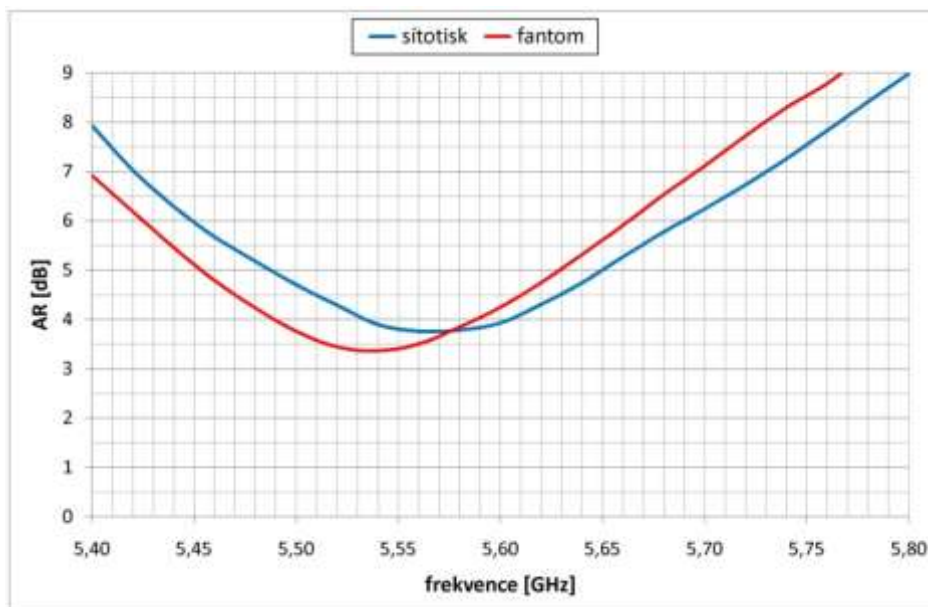


Obr. 62. Graf směrových charakteristik měřeného vlivu blízkosti fantomu v rovině YZ.



Obr. 63. Graf směrových charakteristik měřeného vlivu blízkosti fantomu v rovině XZ.

Axiální poměr je blízkostí fantomem frekvenčně posunut obdobně, jak je tomu podle výsledků simulace (viz kap. 6.4). Tento posun je výraznější než ve zmíněném případě, ale opět může být z části způsoben použitím nastavovacích spojek.



Obr. 64. Graf axiálního poměru měřeného vlivu blízkosti lidské tkáně.

Tab. 15 shrnuje získané poznatky o měření blízkosti fantomu do přehledného zobrazení. Jak bylo zmíněno výše, vliv fantomu je shodný se závěry získanými pomocí simulací. Dochází k mírnému rozladění axiálního poměru a ke snížení úrovně zisku o cca 2,5 dB. Tento pokles je způsoben použitím přechodových spojek k napájecímu konektoru antény.

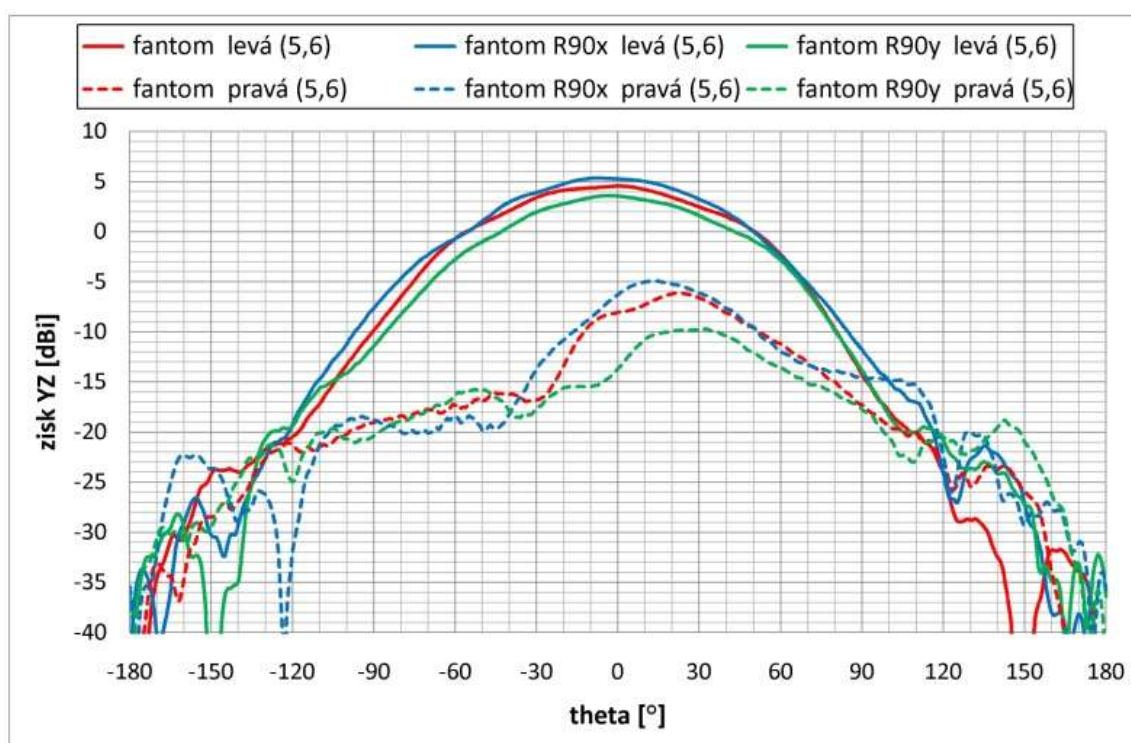
Porovnání			<i>sítotisk</i>	<i>fantom</i>		
YZ rovina	zisk	[dBi]	6,92	4,56		
	vychýlení svazku	[°]	2	1		
	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	[°]	79,0	75,0		
	úroveň bočního laloku	[dBi]	-14,3	-14,4		
XZ rovina	zisk	[dBi]	6,94	4,53		
	vychýlení svazku	[°]	2	1		
	vyzařovací úhel $\Phi$ (-3dB)	[°]	62,0	65,0		
	úroveň bočního laloku	[dBi]	-15,6	-31,9		
axiální poměr	[dB]	spodní hranice	[GHz]	5,528	4,29	3,45
		střední kmitočet	[GHz]	5,6	3,93	4,25
		horní hranice	[GHz]	5,675	5,80	6,54
S11	činitel odrazu	[dB]	5,6	-11	-12	

Tab. 15. Přehledná tabulka k porovnání hodnot při umístění antény k fantomu.

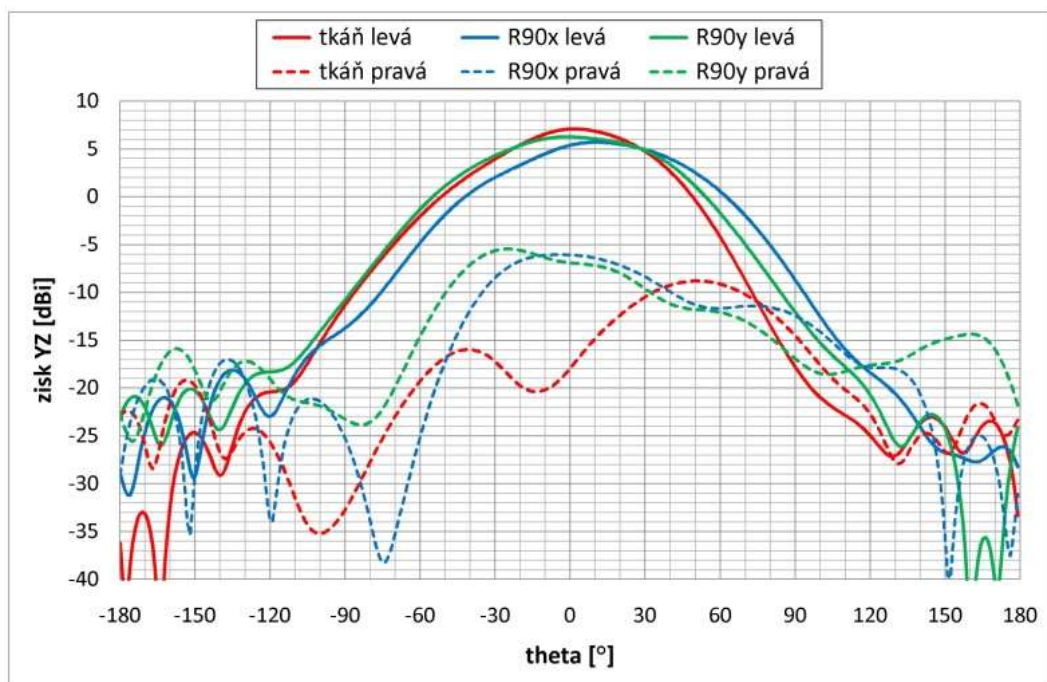
### 7.2.3 Měření směrových charakteristik v ohybu

Pro nejpřesnější simulaci umístění antény na lidské tělo byly poslední měření v bezodrazové komoře provedeny na prohnutě vyrobených fantomech. Obrázky těchto fantomů a měření je možné si prohlédnout v příloze C.

Obr. 65 a 66 znázorňují porovnání simulace a měření konkávního ohybu v obou osách v rádiu 90 pro rovinu YZ. Lze vidět, že mezi průběhy panuje značná podobnost a použitými ohyby nedochází k zásadnímu ovlivnění vlastností. Při ohybu v ose  $y$  dochází pouze k mírnému poklesu zisku cca o 1 dB. Ohyb v ose  $x$  způsobuje dokonce nárůst zisku. Tato skutečnost je nejspíše způsobena tím, že měření neprobíhá na přesné rezonanční frekvenci síťotiskové antény a ohybem dojde k posunu rezonanční frekvence blíže očekávané rezonanční frekvenci.

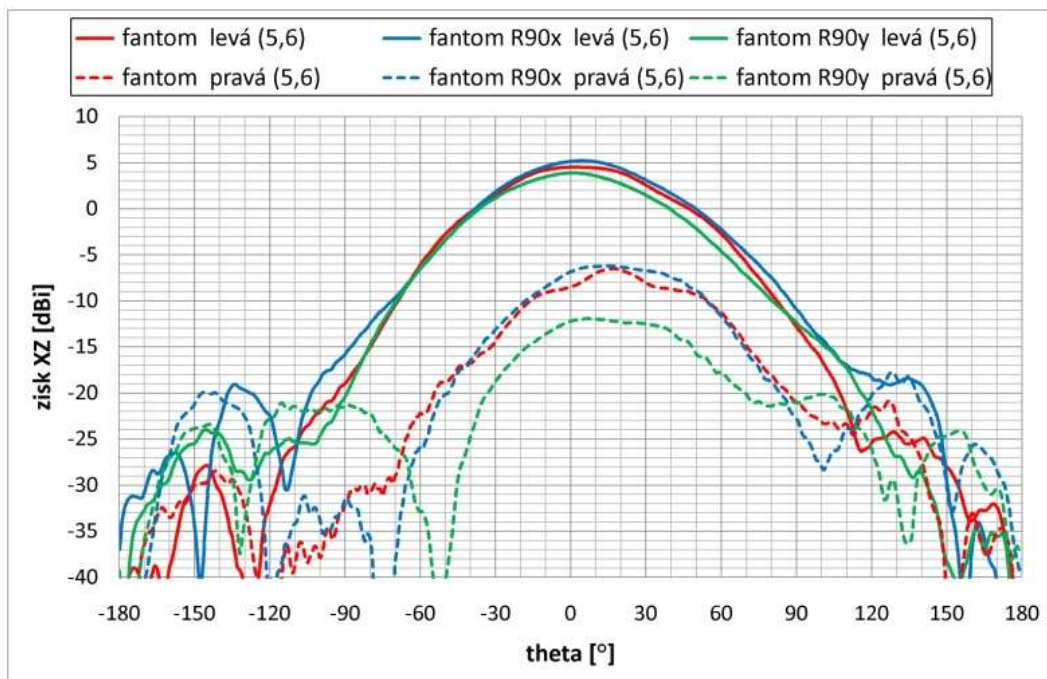


Obr. 65. Grafy měření konkávního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině YZ.

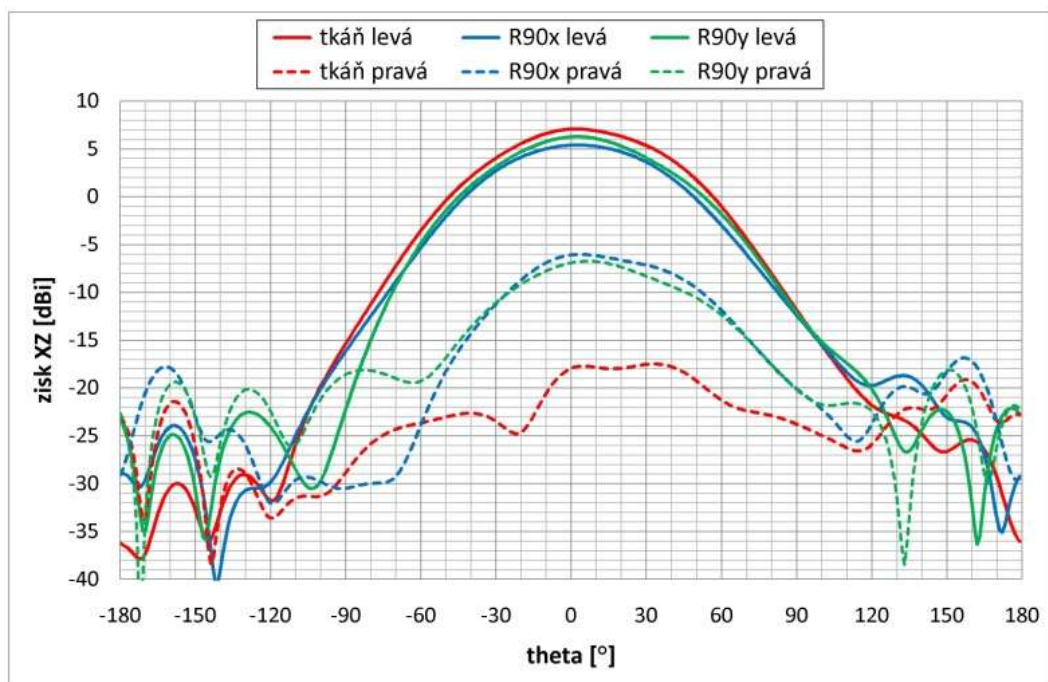


Obr. 66. Grafy simulace konkávního ohybu antény u modelu tkáně v rovině YZ.

Na obr. 67 a 68 jsou znázorněny simulace a měření výše zmíněného ohybu pro rovinu XZ. Opět zde můžeme vidět značnou podobnost. Ohyby způsobí v této rovině pouze pokles zisku ve směru záření a při ohybu v ose  $x$  cca 0,5 dB a v ose  $y$  cca 1 dB.

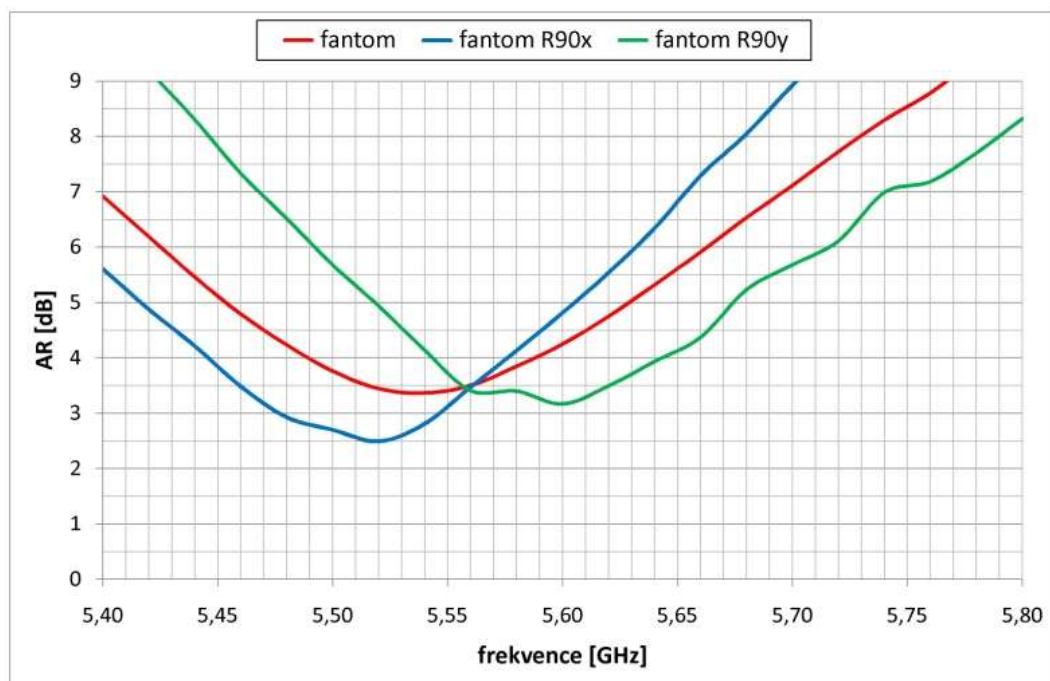


Obr. 67. Graf měření konkávního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině XZ.



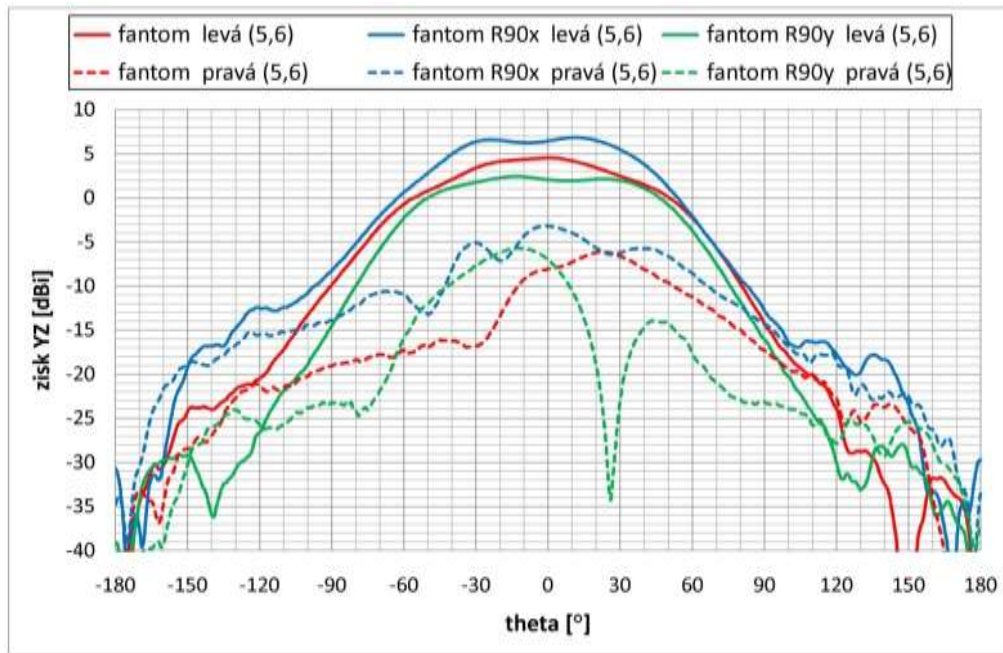
Obr. 68. Graf měření konkávního ohybu antény u modelu tkáně v rovině XZ.

Axiální poměr je ohybem jako vždy rozladěn. Při ohybu v ose  $y$  se pohybuje pod hranicí 6 dB s tím, že jeho minimum je úrovně shodné s neohnutou anténou. Pro ohyb v ose  $x$  se dokonce minimum AR sníží o 0,5 dB, což je způsobeno měřením na ne úplně přesné rezonanční frekvenci (viz zdůvodnění na začátku kapitoly).

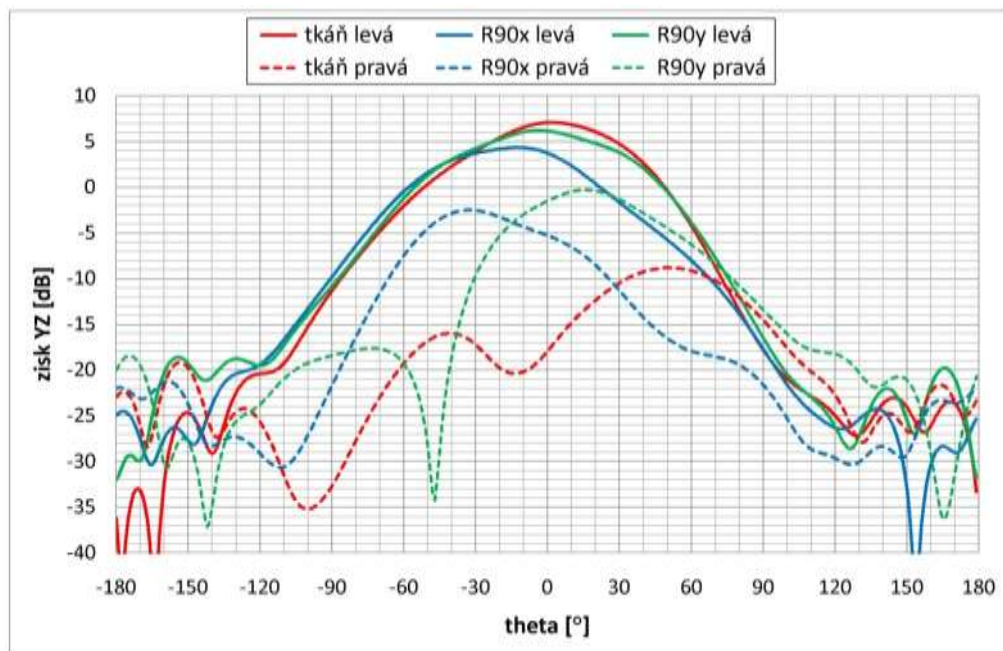


Obr. 69. Graf axiálního poměru měřených konkávních ohybů antény na fantomu.

Obr. 70 a 71 znázorňují porovnání simulace a měření konvexního ohybu v obou osách s rádiem 90 pro rovinu YZ. Závislosti jsou si svým průběhem značně podobné, ale podobnost nedosahuje podobných kvalit jako při konkávním ohybu. Ohybem v ose  $x$  dojde opět k nárůstu zisku (viz začátek kapitoly), který je až cca 2 dB. Ohybem v ose  $y$  dochází k mírnému poklesu zisku cca 1,5 dB. Také průběh směrových charakteristik je značně kostrbatý a to i ve směru záření.

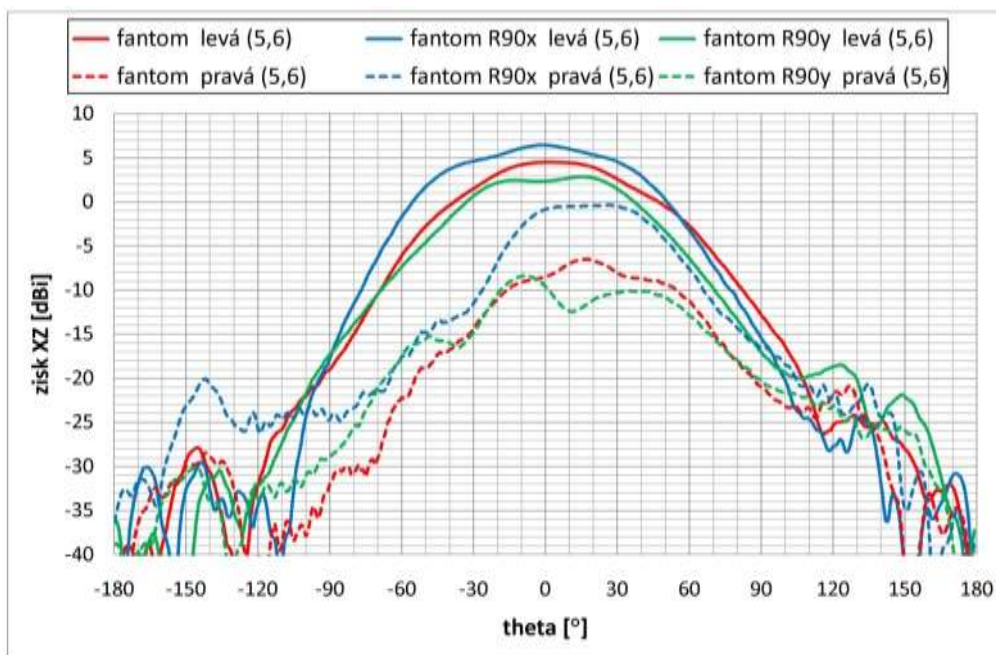


Obr. 70. Graf měření konvexního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině YZ.

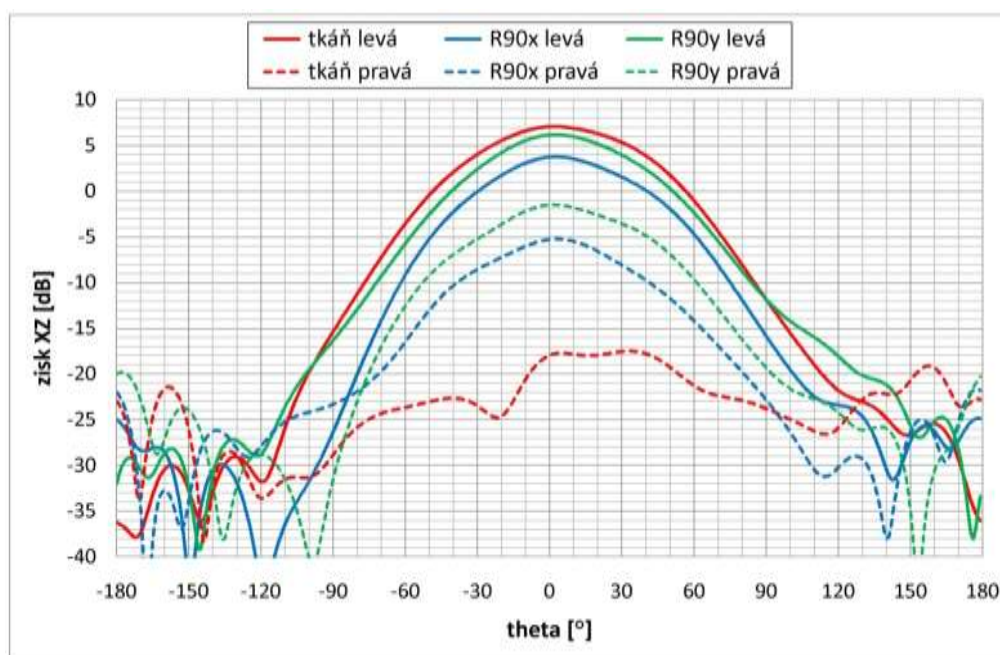


Obr. 71. Graf simulace konvexního ohybu antény u modelu tkáně v rovině YZ.

Na obr. 72 a 73 jsou zaznamenány simulace a měření konvexního ohybu pro rovinu XZ. Lze sledovat, že průběhy simulací a měření společně téměř korespondují. U ohybu v ose  $y$  opět dochází k malému poklesu zisku. Pro ohyb v ose  $x$  opět platí skutečnost zmíněná na začátku kapitoly o měření na ne úplně ideální frekvenci. Kostiřatost průběhu směrových charakteristik způsobené konvexním ohybem se projevuje i v rovině XZ.



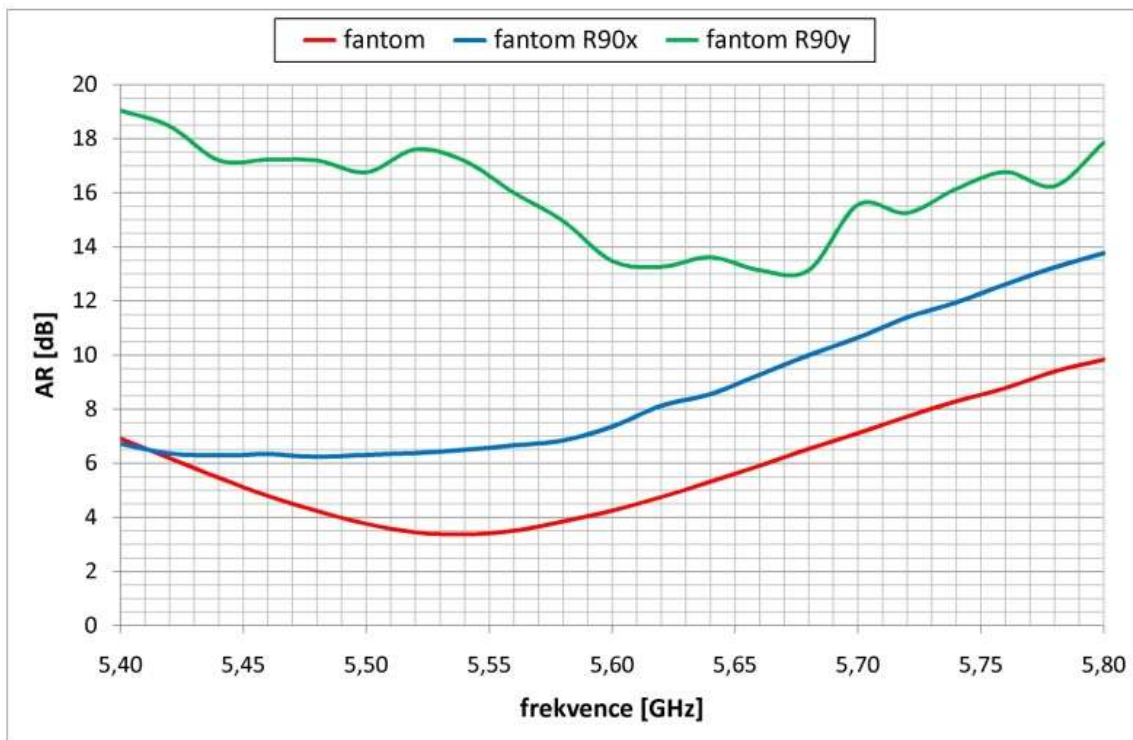
Obr. 72. Graf měření konvexního ohybu antény umístěné na fantomu v rovině XZ.



Obr. 73. Graf simulace konvexního ohybu antény u modelu tkáně v rovině XZ.



Axiální poměr u konvexního ohybu nedosahuje dostatečných kvalit. I když se ohybem v ose  $x$  dostává na anténě většího zisku, axiální poměr v tomto případě neklesne pod hodnotu 6 dB. Co se týče ohybu v ose  $y$ , je průběh závislosti výrazně nerovnoměrný a v celém průběhu je nad hodnotou 12 dB, což je nevyhovující.



Obr. 74. Graf axiálního poměru měřených konvexních ohybů anténa na fantomu.

## 8 ZÁVĚR

Tato práce shrnuje základní problematiku antén nositelných v blízkosti lidského těla. Čtenář je postupně seznámen s požadavky, měřením vlastností textilií, vhodnými anténami a technologiemi jejich výroby.

Dalším cílem práce byl návrh vhodně zvolené antény. Byly prozkoumány vlastnosti vhodných textilií. Pro další výzkum byl vybrán softshell, na který byla následně navržena nositelná mikropásková kruhově polarizovaná anténa. Tato anténa vykazuje výborné širokopásmové vlastnosti vhodné pro uvažované ISM pásmo 5,8 GHz. Účinnost navržené antény se pohybuje na hranici 61%. Axiální poměr navržené antény je v požadovaném ISM pásmu pod hodnotou 3 dB.

V další části práce byl zkoumán vliv lidské tkáně a ohybů na vlastnosti navržené anténní struktury. Nejprve byly vlivy vyšetřeny pomocí simulačních procesů v programu CST Microwave Studio. Simulací bylo určeno, že přítomnost lidské tkáně má na elektrické vlastnosti antény minimální vliv, což je způsobeno vhodně zvoleným typem antény se zemnicím zářičem ve směru k lidské tkáni. Na modelu s lidskou tkání bylo následně provedeno několik simulací ohybu celé struktury. Konkávní ohyb v obou ohýbacích osách nevykazuje výraznou změnu elektrických vlastností, Vždy dojde k poklesu celkového realizovaného zisku, menším změnám vyzařovacího úhlu a vychýlení svazku. Konvexní ohyb má na navrhovanou strukturu mnohem podstatnější vliv. Ohyb v ose  $x$  výrazně zhorší elektrické vlastnosti antény a to především zisk s činitelem odrazu na vstupu antény. Konvexní ohyb v ose  $y$  ovlivňuje strukturu podobně jako konkávní. Platí závislost, že čím větší je ohyb antény, tím horší jsou výstupní elektrické vlastnosti. Dále byla vyzorována skutečnost, že když dojde k ohybu struktury v ose  $y$ , anténa i napájecí vedení jsou souměrné podlé této osy, nejsou výstupní charakteristiky ovlivněny tak výrazně jako, když není motiv osově souměrný. Z výsledků simulovaného ohybu po kouli vyplývá, že dochází k výraznému rozladění z rezonanční frekvence cca 200 MHz a výraznému snížení zisku v obou rovinách a to v obou uvažovaných poloměrech ohybu. Axiální poměr u antén simulovaných ohnutím nedosahuje, ani v jednom ze zkoumaných případů, průběhu pod hodnotou 3 dB. Všemi typy ohybu dochází k posunu minima z rezonanční frekvence antény. Konkávním ohybem a ohybem po povrchu koule na vyšší frekvence, konvexním ohybem na nižší frekvence. U konkávních ohybů se v požadovaném ISM pásmu pohybuje  $AR$  v rozmezí 4 - 8 dB, konvexních je to 4 - 10 dB a u ohybu po kouli 4 - 12 dB. Průběhy  $AR$  jsou značně nesouměrné podle osy v rezonanční frekvenci.

Následně byly vyrobeny vzorky navržené antény pomocí tří různých technologických postupů. Anténní motiv byl vyroben pomocí plátování, elektrovodivé textilie a sítotisku. Požadavky na činitel odrazu pod hranicí -10 dB splňovaly pouze anténa vyrobená pomocí síto tisku a plátování. Anténa z elektrotextilu tomuto požadavku nevyhovovala. Průběh směrových charakteristik plátované a sítotiskové antény se příliš neliší od výsledků získaných z numerického modelu, plátovaná anténa ale vykazuje výrazně nižší zisk v obou rovinách. Ten je v hlavním směru záření menší o 3 dB než v případě numerického návrhu a sítotiskové antény. Účinnost namodelované antény byla 60 %, v případě vyrobených vzorků je účinnost u sítotisku 57 %, respektive 30 % u plátované antény. Velký pokles účinnosti u plátované antény je způsoben

ztrátami ve vodivé fólii. Axiální poměr vyrobených antén se u sítotiskové antény pohybuje v rozsahu 4 - 6 dB a u plátované antény 2 - 5 dB.

Na obou typech antény byly ověřeny změny činitele odrazu vlivem ohybů. V rozporu se závěry simulací je vliv ohybů na činitel odrazu. Z měření vyplývá, že na  $S_{11}$  má zápornější vliv ohyb v ose  $y$ . Projevuje se to především u plátované antény, kdy se činitel odrazu konvexních ohybů nedostane v požadovaném pásmu přes hodnotu - 10 dB. Skutečnost, že větší ohyb působí negativněji, byla měřeními potvrzena. Sítotisková anténa není ohyby ovlivněna tolik jako plátovaná.  $S_{11}$  naroste pod hranici - 10 dB pouze v případě konvexních ohybů v ose  $y$ . Měření činitele odrazu při ohybu na kouli potvrdilo závěry získané simulacemi. Měření bylo následně zopakováno na vyrobených fantomech se stejnými závěry.

Na sítotiskové anténě byly následně ověřeny změny ve směrových charakteristikách vlivem blízkosti lidské tkáně a ohybu. Měření potvrdili simulacemi zjištěný závěr, že lidská tkáň nemá na vhodně zvolenou anténní strukturu výrazný vliv. Vliv ohybů s poloměrem 90° koresponduje se simulovanými průběhy. Vlivem malého ohybu v obou osách dochází ve směrových charakteristikách konkávního ohybu pouze ke snížení zisku o cca 1,5 dB a nárůstu vyzařovacího úhlu. Axiální poměr pro konkávní ohyby se frekvenčně rozladí a nabývá hodnot od 3 - 7 dB. Konvexní ohyb v ose  $x$  působí podobně jako konkávní. Realizovaný zisk ve směru záření poklesne o cca 2 dB a naroste vyzařovací úhel. Také se výrazněji začne projevovat pravotočivá složka v rovině YZ. Konvexní ohyb v ose  $y$  bohužel neposkytuje věrohodné závislosti, ze kterých by bylo možno vyvodit nějaké závěry.

Jako nejvhodnější technologie výroby uvažované antény se jeví sítotisková technologie. Při návrhu je nutné znát přesný technologický postup, nutnost uvážení všech pomocných vrstev v návrhovém modelu. Sítotisková anténa má co se týče působení ohybů nejstálější vlastnosti a použití vhodné vodivé barvy nesnižuje účinnost antény oproti návrhu jako u plátované antény. Další výhodou sítotiskové antény je její mechanická odolnost. Plátovaná anténa se vlivem opakovaného ohýbání a působení mechanických sil poškozuje a ztrácí na svých elektrických vlastnostech, nerovnosti jsou lehce pozorovatelné. U sítotisku není opakovaným působením těchto sil viditelné poškození struktury.

Co se použití simulovaných ohybů týče, vhodné jsou konkávní ohyby v obou osách antény při malých ohybech. Vliv působení konvexního ohybu by bylo vhodné prozkoumat podrobněji na návrhu optimalizovaném k technologii sítotisku. Ohyb po kouli je pro tento případ antény nevhodný.

# LITERATURA

- [1] HEBELKA, V. *Antény pro bezdrátové sítě pracující v blízkosti lidského těla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 72 s. Vedoucí dizertační práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.
- [2] ISM band. *WIKIPEDIA* [online]. [2016] [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <[https://en.wikipedia.org/wiki/ISM\\_band](https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band)>.
- [3] JAKUBÍČEK, M. *Nositelná anténa pro komunikaci v blízkosti lidského těla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 54 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Vašina.
- [4] YUEHUI OUYANG a W.J. CHAPPELL. High Frequency Properties of Electro-Textiles for Wearable Antenna Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2008, vol. 56, issue 2, s. 381-389. DOI: 10.1109/TAP.2007.915435. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4447363>>.
- [5] LESNIKOWSKI, J. Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines. *Przegląd elektrotechniczny*. 2012, : 148 - 151. ISSN ISSN 0033-2097, R. 88 NR 3a/2012. Dostupné z: <<http://www.red.pe.org.pl/articles/2012/3a/43.pdf>>.
- [6] POLÁK, R. *Měření komplexní permitivity materiálů v pásmu milimetrových vln*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 52 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D..
- [7] ORLOFF, Nathan D., Jan OBRZUT, Christian J. LONG, Thomas LAM, Pavel KABOS, David R. NOVOTNY, James C. BOOTH a J. Alexander LIDDLE. Dielectric Characterization by Microwave Cavity Perturbation Corrected for Nonuniform Fields. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2014, 62(9): 2149-2159. DOI: 10.1109/TMTT.2014.2336775. ISSN 0018-9480. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6862934>>.
- [8] KAŠPAR, P. *Návrh 3D Vivaldiho anténní řady pro radarové aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 63 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Puskely, Ph.D..
- [9] RAIDA, Z., et al. *Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika* [online]. Brno: FEKT VUT v Brně, [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>>.
- [10] MIKULÁŠEK, T. *Dvoupásmová anténa pro Globální navigační satelitní systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D..

- [11] MATSUHISA, N. et al. *Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications*. Nat. Commun. 6:7461 DOI:10.1038/ncomms8461 (2015). Dostupné z: <<http://www.nature.com/ncomms/2015/150625/ncomms8461/full/ncomms8461>>.
- [12] *Microstrip Line Calculator* [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <[http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms\\_line\\_e.htm](http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms_line_e.htm)>.
- [13] Foundation for Research on Information Technologies in Society: Tissue properties. [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <<http://www.itis.ethz.ch/virtualpopulation/tissue-properties/diabase>>.
- [14] Měděná stínící páska s elektrovodivým lepidlem. *ELCHEMCo* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <<http://web.elchemco.cz/medena-paska.php>>.
- [15] EMI CATALOG (EMI-CAT-ESSENTIALS 1213). *LairdTech* [online]. [cit. 2016-05-10]. strana 76. Dostupné z: <<http://cdn.lairdtech.com/home/brandworld/files/EMI-CAT-Essentials1213.pdf>>.
- [16] 3M Laminační lepidlo, Produkty E-SHOP. *G3* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <<http://www.g3.cz/katalog/laminacni-lepidla-3m/3m-laminacni-lepidlo-7952mpl>>.
- [17] Elektrovodivé lepidlo WIRED GLUE, GM Electronic. *GME* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <<http://www.gme.cz/elektrovodive-lepidlo-wire-glue-p749-117>>.
- [18] POLYMER SILVER CONDUCTOR 1901-S, ESL ElectroScience – Conductor pastes. *ElectroScience Thick-Film Materials & Ceramic Tapes* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <<http://electroscience.com/sites/default/files/datasheets/1901-S.pdf>>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A	ampér, jednotka elektrického proudu
BAN	Body-Area network
<i>BW</i>	šířka pásma
C	chemická značka uhlíku
Cl	chemická značka chlóru
ČTU	Český telekomunikační úřad
dB	decibel, poměrová jednotka
E	intenzita elektrického pole
EIRP	efektivní vyzářený výkon vztažený k izotropnímu zářiči
ERP	efektivní vyzářený výkon vztažený k dipólovému zářiči
<i>f</i>	frekvence
Fe	chemická značka železa
FeCl <sub>2</sub>	chlorid železitý
<i>f<sub>H</sub></i>	horní frekvence
<i>f<sub>L</sub></i>	spodní frekvence
<i>f<sub>REZ</sub></i>	rezonanční frekvence
<i>f<sub>STŘED</sub></i>	střední frekvence
G	giga, měrná značka 10 <sup>9</sup>
H	intenzita magnetického pole
Hz	Hertz, jednotka frekvence
ISM	Industry, silence and medical, Průmysl, věda a medicína
ITR-U	International telecommunication union - Radiocomunication section
M	mega, měrná značka 10 <sup>6</sup>
m	metr, jednotka vzdálenosti
m	mili, měrná značka 10 <sup>-3</sup>
m <sup>2</sup>	metr na druhou, jednotka plochy
N	newton, jednotka síly
Na	chemická značka sodíku
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	uhličitan sodný
Ni	chemická značka niklu

O	chemická značka kyslíku
ozn.	Označení
PEC	perfekt electric conductor, ideální elektrický vodič
R	elektrický odpor
R	rádus
RFID	radiofrekvenční identifikace
s	sekunda, jednotka času
$S_{11}$	činitel odrazu na vstupu
$\tan \delta$	ztrátový činitel
tzv.	takzvaně
UV	ultrafialové
VNA	vektorový síťový analyzátor
W	Watt, jednotka výkonu
Wi-Fi	technologie lokální bezdrátové sítě
$\epsilon_r$	relativní permitivita
$\mu$	mikro, měrná značka $10^{-6}$
$\sigma$	měrná vodivost
$\Phi$	vyzařovací úhel
$\Omega$	ohm, jednotka elektrického odporu

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Tabulka ISM pásem</b>	<b>77</b>
<b>B</b>	<b>Polystyrénové držáky</b>	<b>78</b>
B.1	Vyrobené polystyrénové držáky .....	78
B.2	Měření konkávního ohybu .....	78
B.3	Měření konvexního ohybu .....	79
B.4	Měření ohybu na povrchu koule .....	79
<b>C</b>	<b>Fantomy lidského těla</b>	<b>80</b>
C.1	Vyrobené fantomy pro měření ohybu - z boku .....	80
C.2	Vyrobené fantomy pro měření ohybu - shora .....	80
C.3	Měření na rovném fantomu .....	81
C.4	Měření na konvexně ohnutém fantomu - zepředu .....	82
C.5	Měření na konvexně ohnutém fantomu – z boku .....	82



# A TABULKA ISM PÁSEM

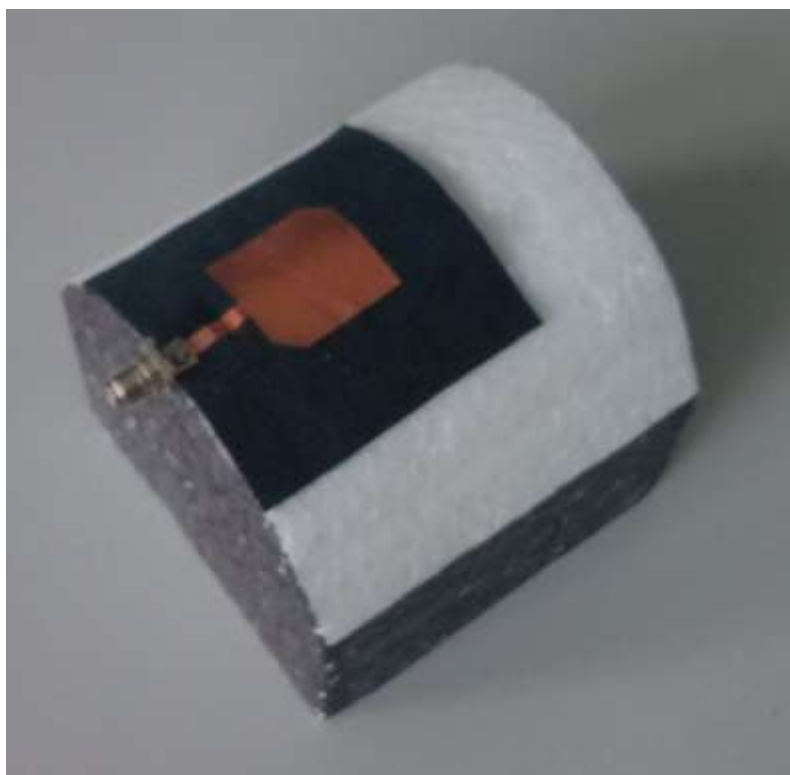
Označení	Frekvenční pásmo	Šířka pásma	Střední frekvence	Vyzařený výkon / Intenzita mag. pole	Použití
<i>a</i>	6,765 - 6,795 MHz	30 kHz	6,780 MHz	42 dB $\mu$ A/10m	pevné a mobilní služby
<i>b</i>	13,553 - 13,567 MHz	14 kHz	13,567 MHz	42 dB $\mu$ A/10m	pevné a mobilní služby
<i>c</i>	26,957 - 27,283 MHz	326 kHz	27,120 MHz	42 dB $\mu$ A/10m	občanské radiostanice
<i>d</i>	40,660 - 40,700 MHz	40 kHz	40,680 MHz	10mW ERP	pevné a mobilní služby
<i>e</i>	138,200 - 138,450 MHz	250 kHz	138,325 MHz	10mW ERP	radioamatérství
<i>f</i>	433,050 - 434,790 MHz	1740 kHz	433,920 MHz	10mW ERP	radioamatérství a radary
<i>g</i>	863,000 - 870,000 MHz	7 MHz	866,500 MHz	25mW ERP	radioamatérství a RFID
<i>h</i>	2,400 - 2,500 GHz	100 MHz	2450,000 GHz	25mW EIRP	Wi-Fi, radioamatérství a mikrovlnné spoje
<i>i</i>	5,725 - 5,875 GHz	150 MHz	5,800 GHz	25mW EIRP	Wi-Fi, radioamatérství a družicové spoje
<i>j</i>	24,000 - 24,250 GHz	250 MHz	24,125 GHz	100mW EIRP	radioamatérství a radary
<i>k</i>	61,000 - 61,500 GHz	500 MHz	61,250 GHz	100mW EIRP	mikrovlnné spoje a radary
<i>l</i>	122,000 - 123,000 GHz	1 GHz	122,500 GHz	100mW EIRP	radioamatérství a mikrovlnné spoje
<i>m</i>	244,000 - 246,000 GHz	2 GHz	245,000 GHz	100mW EIRP	radioamatérství a radioastronomie

## **B POLYSTYRÉNOVÉ DRŽÁKY**

### **B.1 Vyrobené polystyrénové držáky**



### **B.2 Měření konkávního ohybu**



### **B.3 Měření konvexního ohybu**

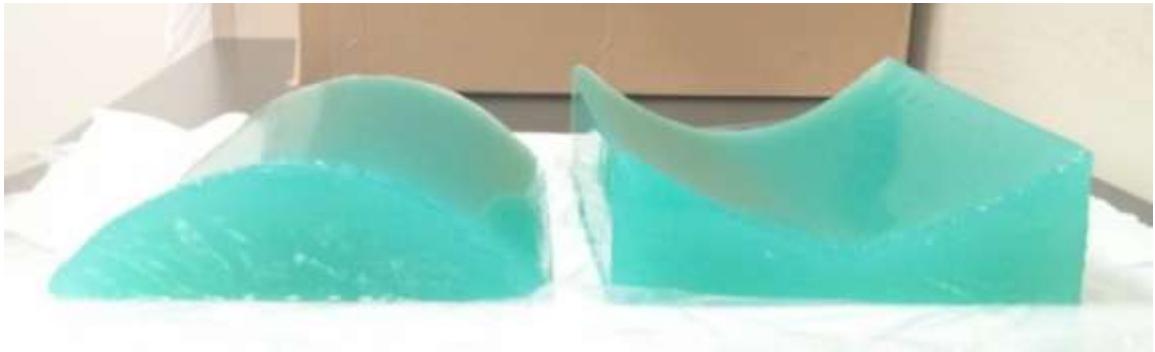


### **B.4 Měření ohybu na povrchu koule**

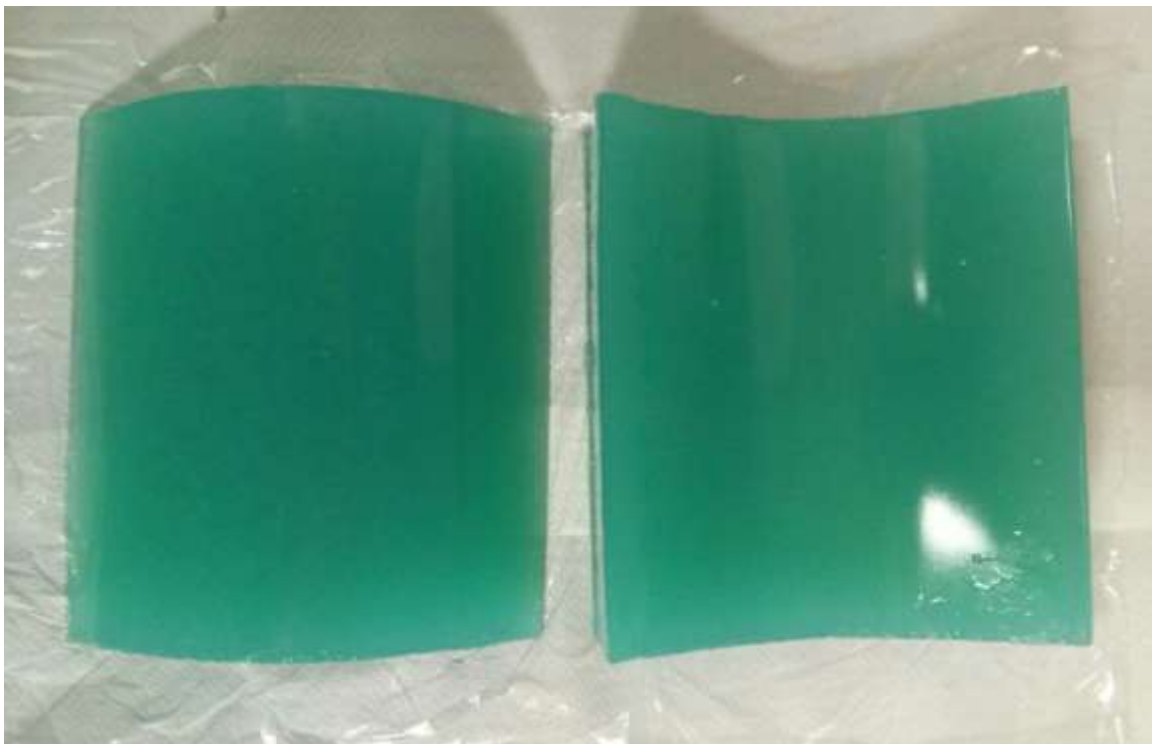


## **C FANTOMY LIDSKÉHO TĚLA**

### **C.1 Vyrobené fantomy pro měření ohybu - z boku.**



### **C.2 Vyrobené fantomy pro měření ohybu - shora.**



### C.3 Měření na rovném fantomu



**C.4 Měření na konvexně ohnutém fantomu - zepředu**



**C.5 Měření na konvexně ohnutém fantomu – z boku**

