

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická

## Dielektrické rezonátorové antény

**Michal Richter**

Školitel: Doc. Ing. Pavel Hazdra, Ph.D.  
Květen 2023



## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Pavlu Hazdrovi, Ph.D. za jeho cenné rady během vedení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Kabourkovi, Ph.D. za provedení měření a propůjčení laboratoře pro účely této práce.

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto práci psal sám dle svého nejlepšího vědomí a svědomí.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá dielektrickými rezonátorovými anténami, které představují inovativní a efektivní přístup k návrhu a výrobě mikrovlnných a milimetrových antén. Cílem práce je analyzovat principy, vlastnosti a možnosti využití 3D tisku pro tvorbu dielektrických rezonátorových antén v oblasti bezdrátové komunikace.

Praktická část práce se zaměřuje na návrh a realizaci dielektrické rezonátorové antény. Jsou prezentovány postupy pro návrh anténních struktur a optimalizaci rozměrů antény pro dosažení požadovaných elektromagnetických vlastností. Součástí praktické části jsou také experimentální metody měření a výsledky.

**Klíčová slova:** dielektrická rezonátorová anténa, 3D tisk, mikrovlnná anténa, bezdrátová komunikace

**Školitel:** Doc. Ing. Pavel Hazdra, Ph.D.  
FEL ČVUT v Praze, K13137

## Abstract

This bachelor's thesis focuses on dielectric resonator antennas, which represent an innovative and efficient approach to the design and fabrication of microwave and millimeter-wave antennas. The objective of this work is to analyze the principles, characteristics, and possibilities of utilizing 3D printing for the creation of dielectric resonator antennas in the field of wireless communication.

The practical part of the thesis focuses on the design and implementation of a dielectric resonator antenna. Procedures for antenna structure design and optimization of dimensions to achieve the desired electromagnetic properties are presented. Experimental measurement methods and their results are also included in the practical part.

**Keywords:** dielectric resonator antenna, 3D printing, microwave antennas, wireless communication

**Title translation:** Dielectric Resonator Antenna

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Dielektrický rezonátor</b>	<b>3</b>
<b>3 Návrh dielektrické rezonátorové antény</b>	<b>5</b>
3.1 Modifikovaný cylindrický rezonátor	6
3.2 Šroubovicovitý rezonátor .....	10
<b>4 Tisk rezonátorů</b>	<b>15</b>
4.1 Rozdíly ABS1200 oproti běžným filamentům pro FDM.....	16
4.2 Nastavení tisku .....	17
4.3 Modifikace tiskárny .....	18
4.4 Konstrukce antény .....	19
<b>5 Měření vlastností antény</b>	<b>21</b>
5.1 Měření reálné hodnoty permitivity materiálu .....	23
5.2 Měření vyzařovací charakteristiky	26
<b>6 Závěr</b>	<b>29</b>
<b>Literatura</b>	<b>31</b>

## Obrázky

2.1 Kvádrový rezonátor ve vlnovodu R48 .....	3	5.5 Detail měření .....	24
3.1 Model vodivé desky a koaxiálního konektoru v CST Studio Suite .....	5	5.6 Nejlepší shoda měření se simulacemi .....	25
3.2 Model cylindrického rezonátoru ..	6	5.7 Vyzařovací charakteristika E-rovina LHCP, 4,35 GHz .....	26
3.3 Graf S-parametrů cylindrického rezonátoru .....	7	5.8 Vyzařovací charakteristika E-rovina xPol, 4,35 GHz .....	27
3.4 Osový poměr rezonátoru ve směru osy Z .....	7	5.9 Vyzařovací charakteristika H-rovina LHCP, 4,35 GHz .....	27
3.5 Vyzařovací charakteristika v rovině $\Phi = 0$ , LHCP, 4,35 GHz .....	8	5.10 Vyzařovací charakteristika H-rovina xPol, 4,35 GHz .....	28
3.6 Graf prostorové vyzařovací charakteristiky LHCP, 4,35 GHz ...	8		
3.7 Vyzařovací charakteristika v rovině $\Phi = 0$ , xPol, 4,35 GHz .....	9		
3.8 Graf prostorové vyzařovací charakteristiky xPol, 4,35 GHz .....	9		
3.9 Model šroubovicovitého rezonátoru .....	10		
3.10 Graf S-parametrů šroubovicovitého rezonátoru .....	11		
3.11 Osový poměr rezonátoru ve směru osy Z .....	11		
3.12 Vyzařovací charakteristika v rovině $\Phi = 0$ , LHCP, 3,75 GHz .	12		
3.13 Farfield graf šroubovicovitého rezonátoru, LHCP, 3,75 GHz .....	12		
3.14 Vyzařovací charakteristika v rovině $\Phi = 0$ , xPol, 3,75 GHz ...	13		
3.15 Farfield graf šroubovicovitého rezonátoru, xPol, 3,75 GHz .....	13		
4.1 Model rezonátoru v PrusaSliceru	15		
4.2 Dielektrický filament Preperm ABS1200 .....	16		
4.3 Problémy vzniklé během tisku ..	17		
4.4 Vytisknutý cylindrický rezonátor .	18		
4.5 Anténa připevněná k desce .....	19		
4.6 Anténa s držákem .....	20		
5.1 S-parametry změřené antény ...	21		
5.2 Porovnání S-parametrů antény a simulace .....	22		
5.3 Vlnovod naplněný materiálem ABS1200 .....	23		
5.4 Měření permitivity .....	24		

## Tabulky

4.1 Materiály a doporučené hodnoty teplot .....	17
4.2 Velikosti trysek, výšky vrstev a rychlosti tisku .....	19





# Kapitola 1

## Úvod

Dielektrické rezonátorové antény (DRA)[1] jsou zařízení z dielektrického materiálu, která mohou být excitována elektrickým proudem, aby vytvářely velmi specificky tvarovaná elektromagnetická pole. Absence vodivého materiálu v dielektriku také zaručuje nízké ohmické ztráty. Na vysokých frekvencích mohou rezonátory dosahovat velmi kompaktních rozměrů a snižovat tím náklady na materiál a dobu výroby.[1]

Mimo to jsou takové antény schopné vykazovat velmi příznivé hodnoty směrovosti a osového poměru, pro případy křížové nebo kruhové polarizace.[2]

Návrhy rezonátorů byly v rámci zadání vytvořeny a simulovány v CST Studio Suite.[3] Jedná se o sofistikovaný nástroj, který umí provádět dynamické simulace EM pole, ve kterém se nachází boolovskou logikou slučovaná prostorová primitiva, kterým jsou přiděleny vlastnosti materiálu, ze kterého mají být vyrobena. Simulované prostředí je tvořeno prostorem s definovanými hranicemi.[3]

Tato práce vznikla v rámci experimentu s novým materiálem, Preperm ABS1200, o kterém nejsou doposud dostupné žádné studie, jeho vlastnosti jsou udávány pouze výrobcem a to dost málo detailně. Pro zpracování materiálu výrobce určuje pokyny pro tlakový tisk do formy, ale nikoliv pro FDM. Jedná se tedy o první zkušenost, při které se tento materiál bude ukládat po vrstvách oproti zamýšlené aplikaci.

Materiál Preperm ABS1200 ve formě plastového filamentu o průměru 1,75mm byl vybrán a dodán vedoucím práce. Tento filament byl následně tištěn FDM tiskárnou Průša3D i3 MK3S+ s polykarbonátovým krytem.[4]

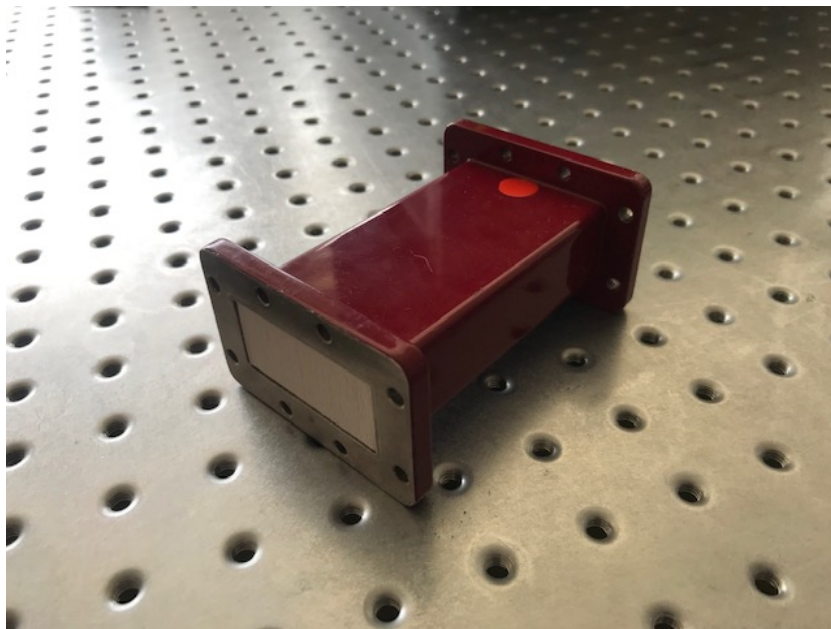


## Kapitola 2

### Dielektrický rezonátor

Dielektrický rezonátor je zařízení používané v elektromagnetické teorii a v praktických aplikacích jako část elektrotechnických a elektronických systémů. Jeho účelem je udržovat elektromagnetické vlny v ohraničeném prostoru pomocí odrazů od dielektrických hranic rezonátoru a nebo přímo ovlivňovat okolní elektromagnetické pole svým vybuzeným polem. Vhodnou volbou geometrie rezonátoru je možné například budit pole s lineární nebo kruhovou polarizací.

Základní tvar rezonátoru je kvádr. Jeho rozložení pole a jiné vlastnosti lze dohledat v literatuře, např. [1] Jeho hlavní vlastností je podpora různých rezonančních módů elektromagnetického pole. Módy jsou charakterizovány specifickou frekvencí, polarizací a rozložením pole v rezonátoru.



**Obrázek 2.1:** Kvádrový rezonátor ve vlnovodu R48

Kvádrový rezonátor může být uzavřený, což znamená, že má dielektrické hranice na všech stranách, nebo otevřený, kdy má alespoň jednu otevřenou

stranu.

Frekvence rezonance kvádrového rezonátoru závisí na jeho geometrii, velikosti a vlastnostech použitého dielektrického materiálu. Design rezonátoru je často optimalizován tak, aby dosáhl maximální účinnosti v určitém frekvenčním pásmu.

Kvádrové rezonátory se používají v různých aplikacích, včetně mikrovlnných a optických systémů, filtrů, senzorů a rezonančních obvodů. Jsou důležitým prvkem v moderní elektrotechnice a elektronice, který umožňuje manipulaci s elektromagnetickými vlnami a jejich využití pro různé účely.

Dalším základním tvarem je válec, který je v této práci využit. Válcové rezonátory se využívají v různých aplikacích. Jsou hojně používány v mikrovlnné technologii, jako jsou mikrovlnné oscilátory, filtry, zesilovače a detektory. Také se uplatňují v optických komunikacích, kde slouží jako optické rezonátory pro manipulaci s optickými vlnami.

Válcové rezonátory mají výhodu kompaktního designu a dobře definovaných rezonančních módů, což umožňuje jejich přesnou a efektivní integraci do různých zařízení.

Frekvence rezonance válcového rezonátoru závisí na jeho geometrii, délce, poloměru a vlastnostech použitého dielektrického materiálu. Optimální design rezonátoru se volí tak, aby odpovídal požadovanému frekvenčnímu pásmu a dosáhl maximální účinnosti a splnil požadavky na tvar pole, jeho polarizaci, atd.

Rezonátorové antény jsou od klasických rezonátorů odlišeny požadavky, zatímco rezonátor by měl mít vysoký faktor  $Q$ , anténa by jej měla mít malý, aby měla větší šířku pásma a vyzařovala pole.

## Kapitola 3

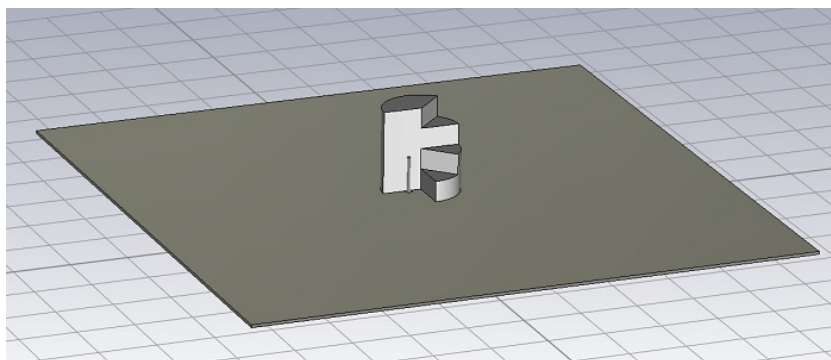
### Návrh dielektrické rezonátorové antény

Pro návrh rezonátoru je nutné vytvořit projekt v CST Studio Suite. Tento projekt je možné vytvořit z šablony navržené pro tvorbu antény v pásmu milimetrových vln. Zaměříme se na frekvence od 3 GHz do 6 GHz. Této šabloně je nutné nastavit pracovní oblast (časová nebo frekvenční), základní jednotky, rozsah frekvencí pro simulace, monitory a jejich sledovanou frekvenci. Tím získáme základní scénu vhodnou pro návrh dielektrického rezonátoru. Pro seznámení se s problematikou DRA je tedy takové prostředí velmi vhodné.

Rezonátor je tvořen prostorovými primitivami, která jsou definována parametricky a sčítána boolovskými operacemi. Tím je možné vytvořit téměř libovolnou geometrii.[2][5] Volba geometrie přímo ovlivňuje tvar EM pole, které rezonátor vyzařuje po excitaci elektrickým proudem. Zaměřením tohoto projektu jsou rezonátory generující kruhovou polarizaci EM vlny.

Ještě než bude dávat smysl simulovat rezonátor v prostředí, je nutné vytvořit napájecí port. Ten může být mikropáskový, koaxiální, atd. V tomto projektu je užíván koaxiální přívod. Ten je vnitřním vodičem v přímém kontaktu s povrchem rezonátoru a pláštěm se dotýká vodivé desky, kterou simulujeme jako perfektní vodič o dané tloušťce.

Konkrétně níže zobrazený model modifikovaného cylindrického rezonátoru je optimalizovaný pro frekvenci  $f_r = 4.8$  GHz, má desku o tloušťce 1 mm, délky stran 30 cm, poloměr rezonátoru  $r = 26.816$  mm a výšku  $h = 28.66$  mm.



**Obrázek 3.1:** Model vodivé desky a koaxiálního konektoru v CST Studio Suite

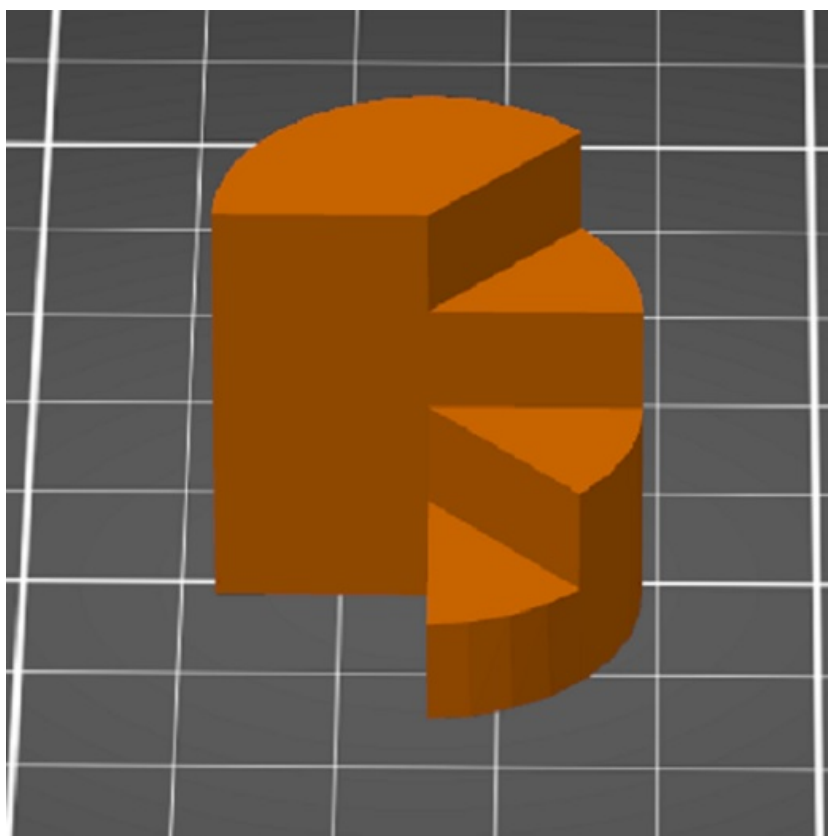
Jakmile je takto připravená scéna, je třeba správně navrhnout parametrické

rozměry. CST Studio Suite má pro takové výpočty nástroj Optimizer, který sám pomocí vybraného algoritmu a uživatelem nastavených hranic nalezne ideální hodnoty jednotlivých parametrů, jmenovitě vzdálenost konektoru od středu rezonátoru, délka přívodního vodiče, výška a průměr rezonátoru a provede analýzu EM pole. Nutno podotknout, že tento výpočet je značně náročný na výpočetní výkon.

### 3.1 Modifikovaný cylindrický rezonátor

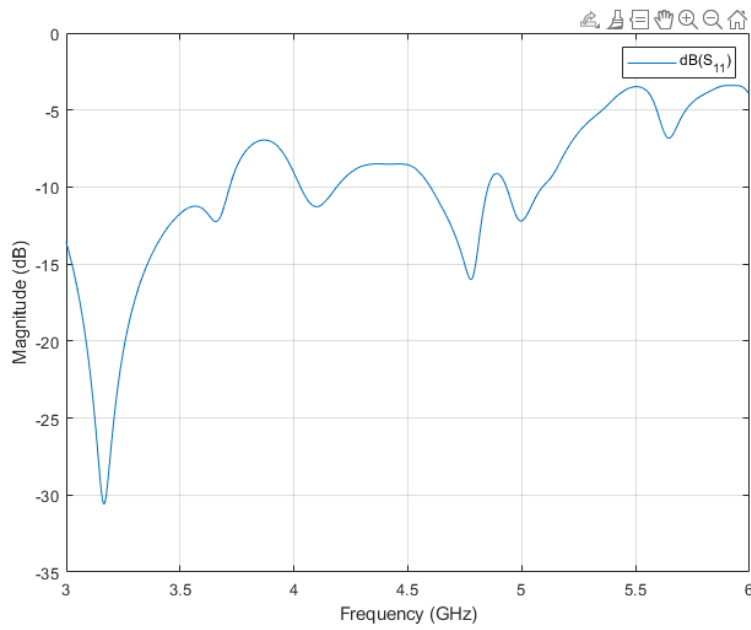
První návrh je tvořen válcem se středem spodní podstavy v počátku souřadnicové soustavy. Z tohoto válce je následně odstraněn jeho objem v 1. oktantu. Dále z tohoto válce odstraníme 3 postupně zvětšující se části tak, aby každá odebrala 1/4 výšky válce ve 2. a 3. oktantu s krokem 45°. Tím vznikne tvar nápadně podobný točitému schodišti.[2]

Výsledné rozměry rezonátoru byly vygenerovány simulacemi. Pro frekvenci 4,35 GHz odpovídá průměr 26.82 mm a výška 28.66 mm.

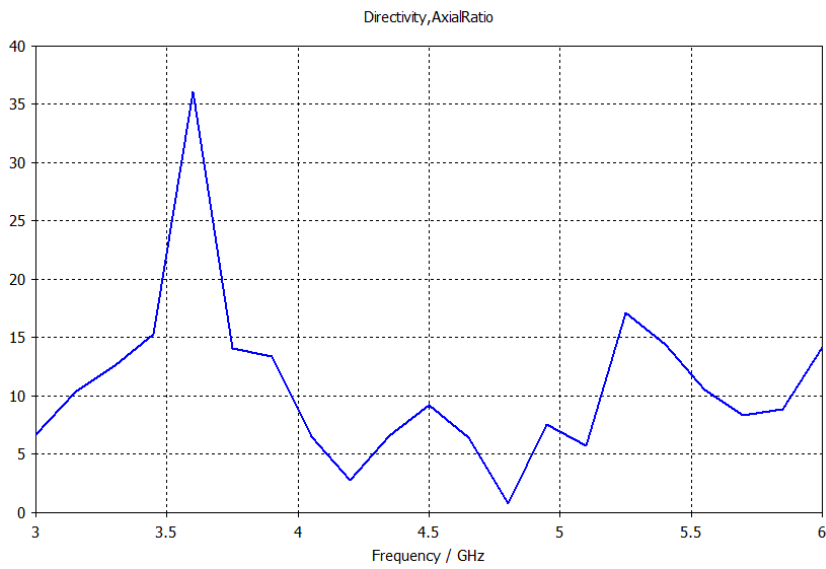


**Obrázek 3.2:** Model cylindrického rezonátoru

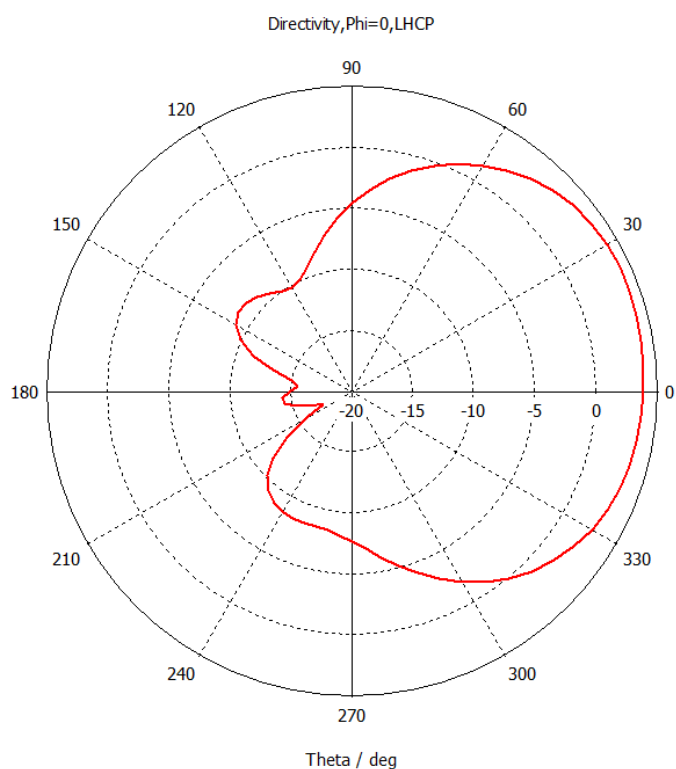
Simulováním optimalizovaného rezonátoru získáme grafy vyjadřující jeho směrovost v ose Z, osový poměr a vyzářovací charakteristiku.



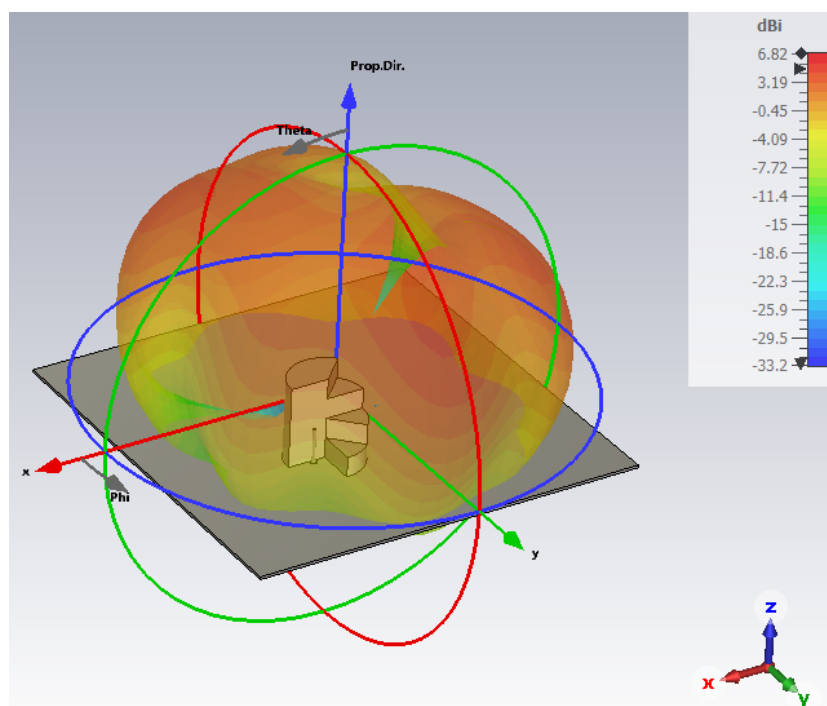
Obrázek 3.3: Graf S-parametrů cylindrického rezonátoru



Obrázek 3.4: Osový poměr rezonátoru ve směru osy Z

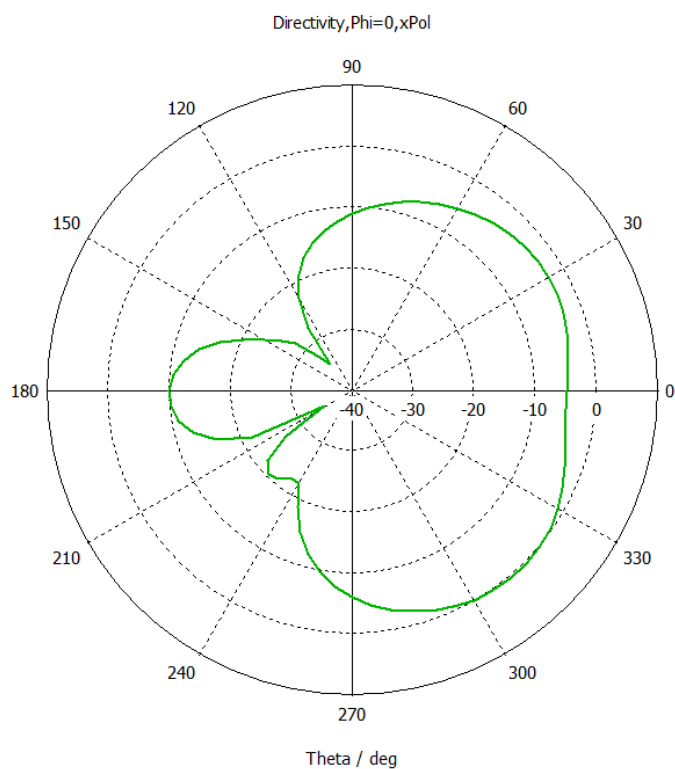


Obrázek 3.5: Vyzařovací charakteristika v rovině  $\Phi = 0$ , LHCP, 4,35 GHz

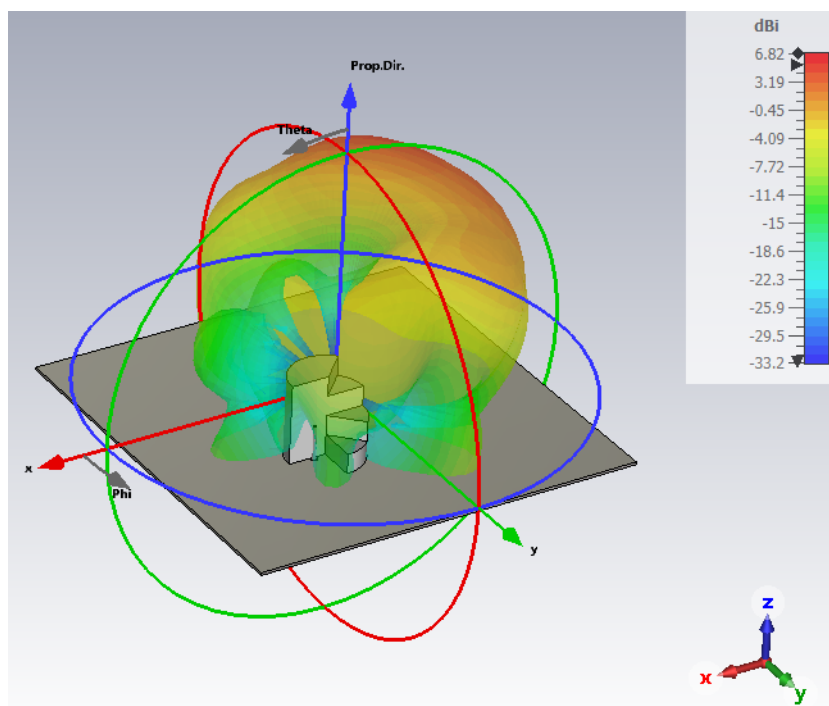


Obrázek 3.6: Graf prostorové vyzařovací charakteristiky LHCP, 4,35 GHz





Obrázek 3.7: Vyzařovací charakteristika v rovině  $\Phi = 0$ , xPol, 4,35 GHz



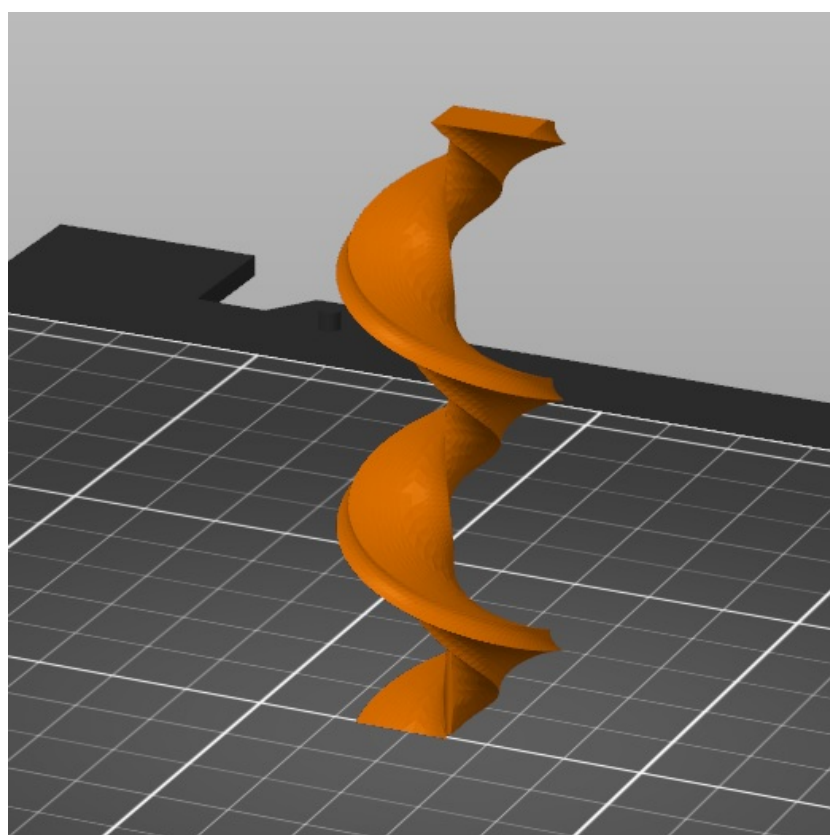
Obrázek 3.8: Graf prostorové vyzařovací charakteristiky xPol, 4,35 GHz

## 3.2 Šroubovicovitý rezonátor

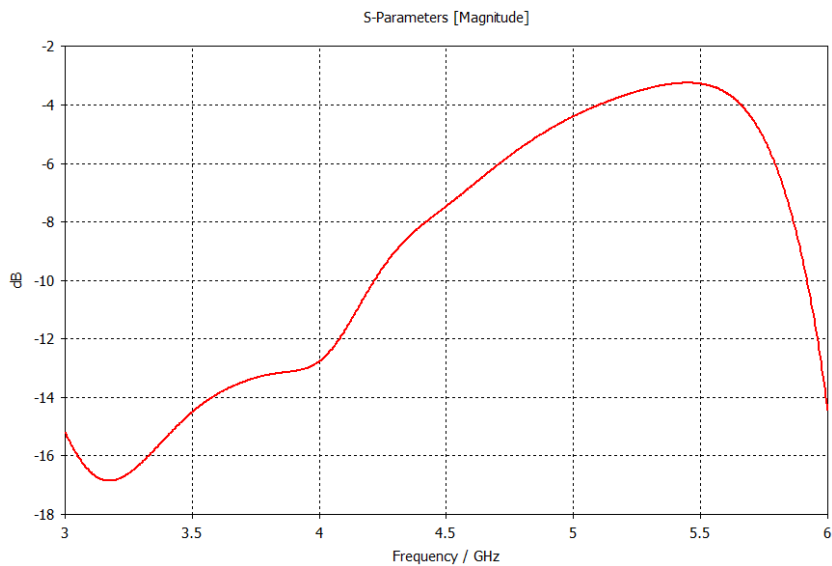
Druhý návrh je tvořen opsanou šroubovicí s podstavou obdélníku. Tím vzniká tvar podobný vrtáku. Koaxiální přívod je ve středu opisované šroubovice a jeho objem je z rezonátoru odebrán. Tím je v přímém kontaktu s povrchem rezonátoru.

Inspirací pro tento nápad byl vrták, u kterého by generování kruhové polarizace mělo být téměř přirozené.

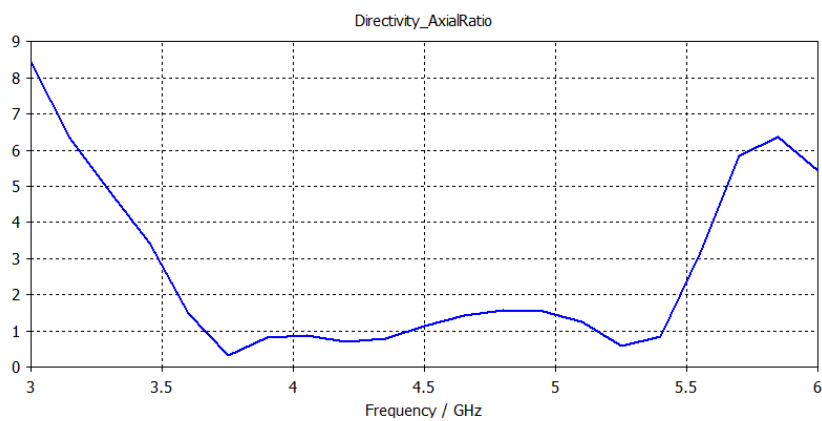
Pro frekvenci 3,75 GHz odpovídá délka podstavy 12 mm, šířka 6 mm a výška 80 mm. Stoupání vývrty je jedna otáčka na 40 mm výšky.



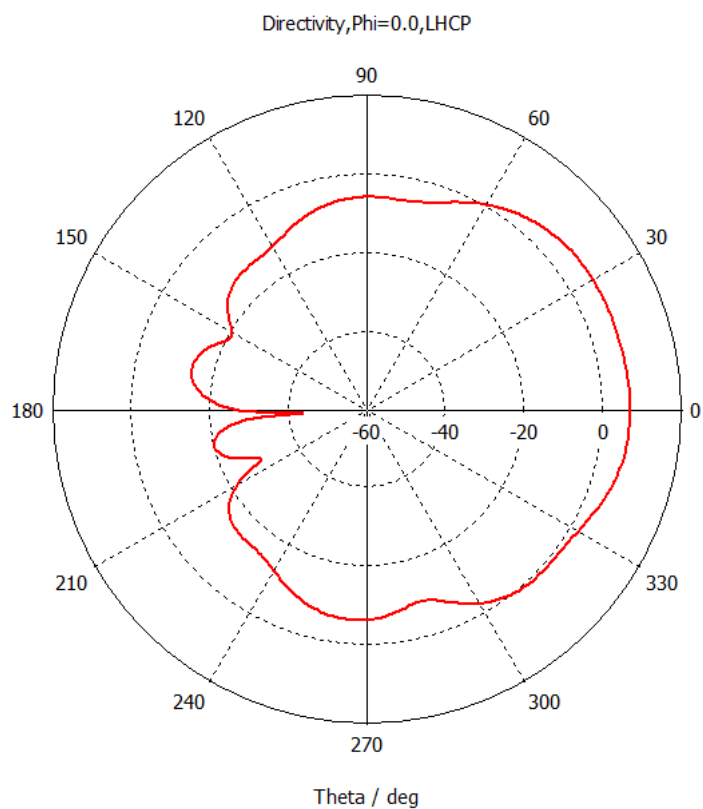
**Obrázek 3.9:** Model šroubovicovitého rezonátoru



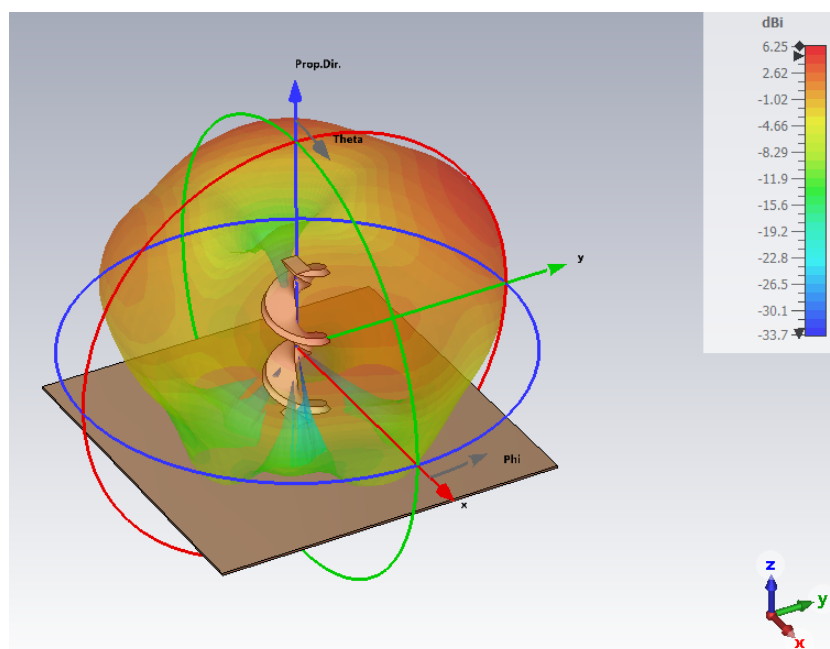
Obrázek 3.10: Graf S-parametrů šroubovicového rezonátoru



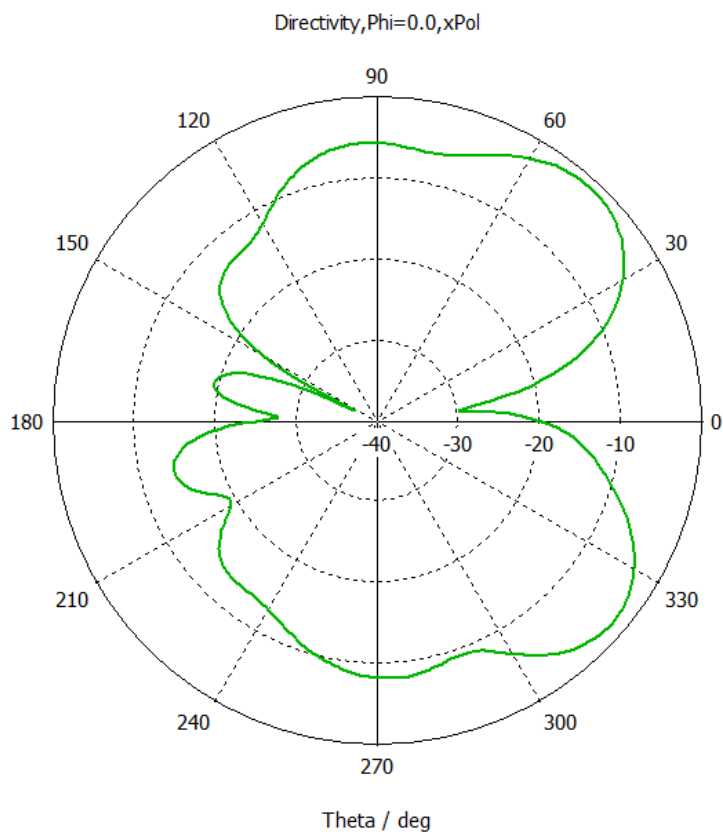
Obrázek 3.11: Osový poměr rezonátoru ve směru osy Z



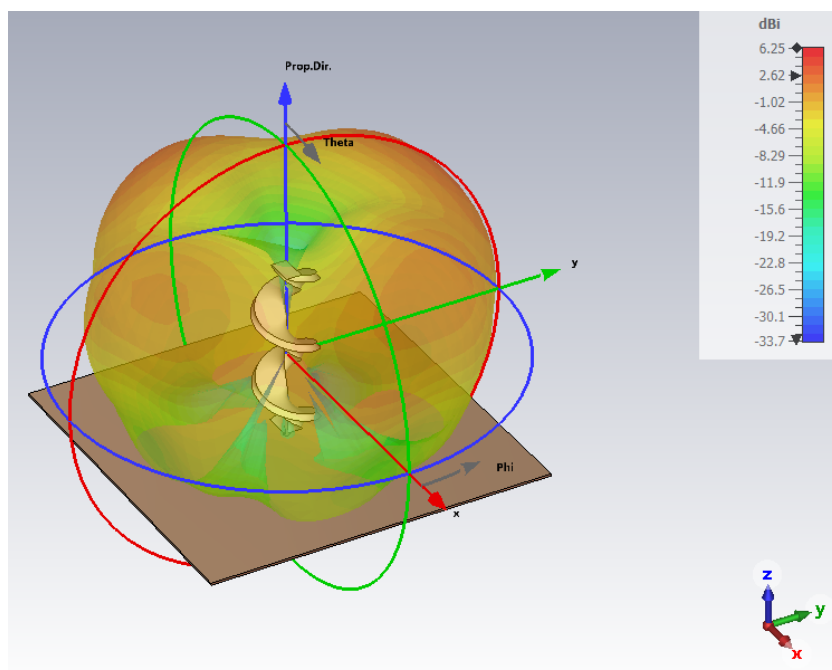
Obrázek 3.12: Vyzařovací charakteristika v rovině Phi = 0, LHCP, 3,75 GHz



Obrázek 3.13: Farfield graf šroubovicového rezonátoru, LHCP, 3,75 GHz



Obrázek 3.14: Vyzářovací charakteristika v rovině  $\Phi = 0$ , xPol, 3,75 GHz



Obrázek 3.15: Farfield graf šroubovicitého rezonátoru, xPol, 3,75 GHz

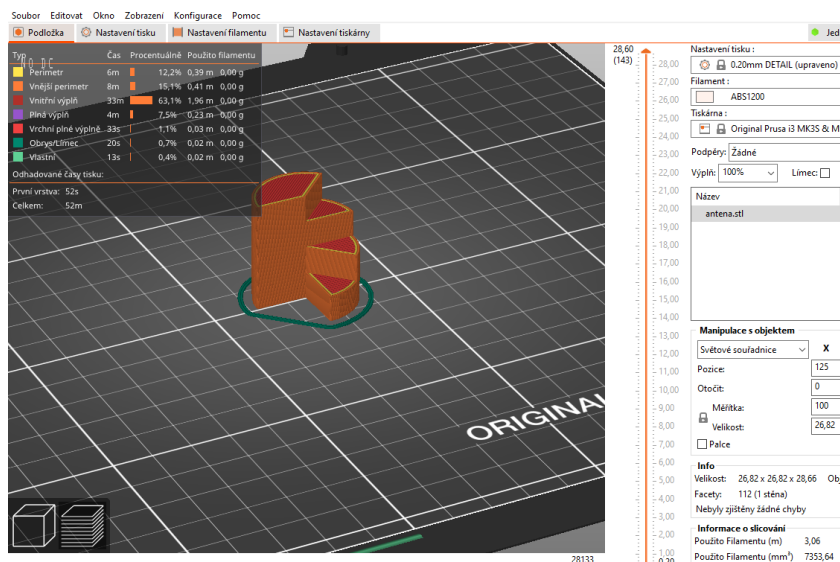


## Kapitola 4

### Tisk rezonátorů

FDM tisk funguje na principu planární litografie. Materiál se ve vrstvách nanáší na tiskovou podložku. Extrudér se pohybuje v osách X a Z, podložka se pohybuje v ose Y. Instrukce pro tiskárnu jsou ve formátu G-Code, který je tvořen sadou kódů, které řídicí jednotka tiskárny provádí postupně.

Tyto instrukce generuje Slicer, což je program, který prostorový model "nařeže" na jednotlivé vrstvy podle aktuálního profilu tisku a materiálu, zkontroluje celistvost modelu a převede celý proces do G-Code. Ve Sliceru je možné zvolit umístění modelu na tiskové podložce, upravovat jednotlivé kroky tiskárny, dynamicky měnit rychlosti a teploty během tisku. Některé Slicery podporují tisk z více materiálů nebo více extrudérů.



Obrázek 4.1: Model rezonátoru v PrusaSliceru

Pro mnohé modely FDM tiskáren existují přednastavené profily nastavení tisku, které jsou dodávány výrobcem, nebo vytvořeny komunitou uživatelů. To samé platí pro běžně používané materiály. Pro nové nebo neobvyklé materiály je třeba takový profil vytvořit a nebo upravit stávající.

Pro tiskárny Original Prusa je výrobcem dodáván program PrusaSlicer, který má předinstalované profily jednotlivých modelů tiskáren a materiálů. Navíc umožňuje importovat a vytvářet nové profily.

## 4.1 Rozdíly ABS1200 oproti běžným filamentům pro FDM

Narozdíl od běžných materiálů je Preperm ABS1200 unikátní svými příměsemi a elektrickými vlastnostmi.

Výrobce uvádí hodnotu dielektrické konstanty  $\epsilon_{sr} = 12$  a disipační faktor  $\tan(\delta) = 2.9 \times 10^{-3}$  pro frekvenci 2.4 GHz.

Obyčejné ABS je poměrně pevný a pružný materiál, ale podléhá teplotní roztažnosti. ABS1200 je oproti tomu křehký a měkký, což samo o sobě způsobuje problémy během extruze. Vlivem teplotní roztažnosti se odlepjuje od tiskové podložky, praská a kvůli příměsím zanáší trysku. Dochází tak k nekvalitním nebo nedokončeným tiskům. Je tedy nutné vytvořit nový profil, který by odstranil vzniklé problémy.

Další vlastnost tohoto materiálu je cena, kde se cívka s 1,5 kg pohybuje kolem € 800. Jedná se tedy o velmi drahý filament (běžné 1 kg cívky se pohybují v rámci 300 - 600 Kč).



Obrázek 4.2: Dielektrický filament Preperm ABS1200



## 4.2 Nastavení tisku

Problémy plynoucí z vlastností materiálu se dají odstraňovat úpravami nastavení tiskárny. Proto bude nutné snížit rychlost tisku, zajistit konstantní průtok materiálu extrudérem, stabilitu okolního prostředí tiskárny a vylepšit adhezi k podložce.

Také je třeba vzít v úvahu vnitřní geometrii rezonátoru v případě, že není nastavena 100% výplň. S nižší procentuální výplní začne klesat také permitivita materiálu.[7]

Pro tyto návrhy bude připadat v úvahu pouze 100% výplň.

	ABS	ABS1200	PETG
Tryska	230	220	210
Podložka	80	65	60

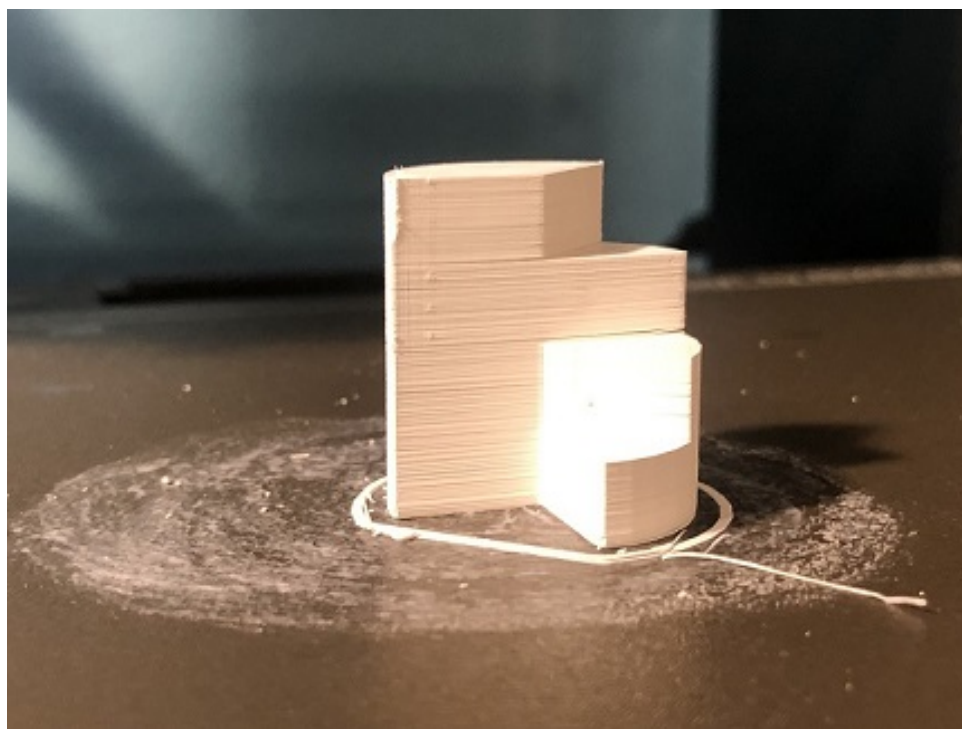
**Tabulka 4.1:** Materiály a doporučené hodnoty teplot

Během tisku se projevují další problémy, mimo jiné delaminace vrstev, lámání částí vrtev a zanášení trysky.



**Obrázek 4.3:** Problémy vzniklé během tisku

Nicméně se s upraveným nastavením tisku dokončil tisk prvního návrhu rezonátoru. Druhý návrh nikoliv.



Obrázek 4.4: Vytisknutý cylindrický rezonátor

### 4.3 Modifikace tiskárny

Pro zvýšení kvality tisku je nutné na tiskárně provést změny podložky a trysky.

Původní podložka je tvořena ocelovým plátem se zrnitým povrchem s vrstvou PEI.[8] Ta se jeví jako dostatečná pro materiály nepodléhající velké teplotní roztažnosti. Pro materiály ABS, ASA, ABS-T a podobné již nedostačuje, výtisk se často odlepí, částečně nebo celý, čímž je tisk zničen. Proto je třeba podložku nahradit jiným povrchem, který má vyšší adhezi. Vhodnou náhradou je lepidlo na papír Kores, které i náročnější materiály udrží po dobu tisku přilepené. Nevýhodou oproti PEI je zanechávání stop na první tištěné vrstvě a její nedokonalosti.

Průměr trysky zásadně mění proces tisku. Díky většímu otvoru je možné materiál tisknout s větším průtokem materiálu, sníží se tak zanášení trysky příměsí materiálu a podstatně se zrychlí celý tisk. Nevýhodou je ztráta rozlišení tisku.

Některé materiály nejsou uspůsobeny velkým průtokům, což může vést k nepravidelné extruzi nebo k obroušení filamentu.

Po provedení těchto úprav je kvalita tisku stále nedostatečná. Proto bylo nutné snížit velikosti tištěných ploch, což vede k vyšší vnitřní

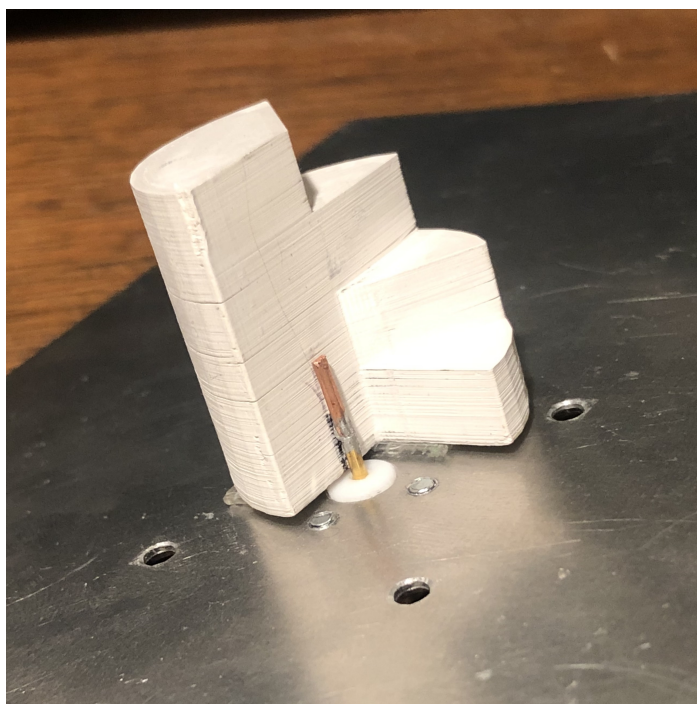
Vrstva	Tryska 0.4mm	Tryska 0.6mm
0.2 mm	59 min	40 min
0.3 mm	32 min	27 min
0.4 mm	-	21 min

**Tabulka 4.2:** Velikosti trysek, výšky vrstev a rychlosti tisku

teplotě výtisku, ale také to omezuje velikost jednotlivých výtisků. Velké objekty je nutné dělit na menší kusy a po tisku je lepit k sobě. Lepení ABS je možné pomocí acetonu, který ABS rozpouští.

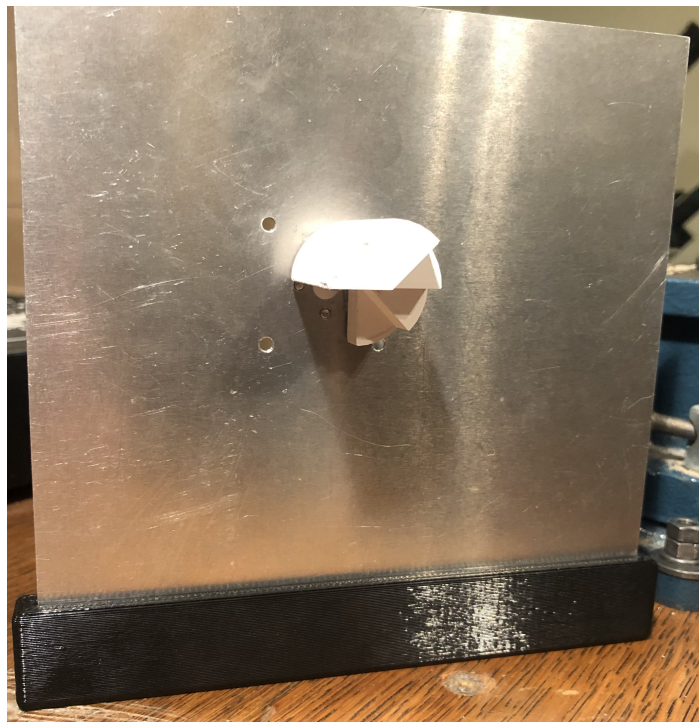
## 4.4 Konstrukce antény

Po odstranění problémů s tiskem a samotným tiskem byla anténa připravena na sestavení. Rezonátor byl k desce připevněn pomocí oboustranné lepicí pásky a umístěn mimo střed konektoru podle simulace.



**Obrázek 4.5:** Anténa připevněná k desce

Délka vodiče, který prochází deskou a posun rezonátoru od středu byl stanoven simulacemi v CST, stejně jako rozměry rezonátoru. Pro měření bylo třeba vytvořit držák, pro připevnění antény na otočnou platformu v bezodrazové místnosti.

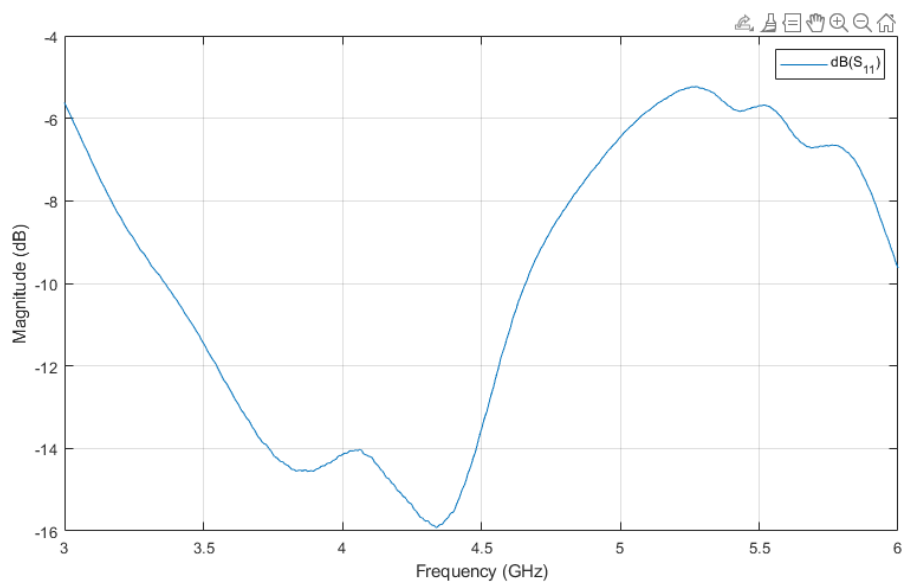


**Obrázek 4.6:** Anténa s držákem

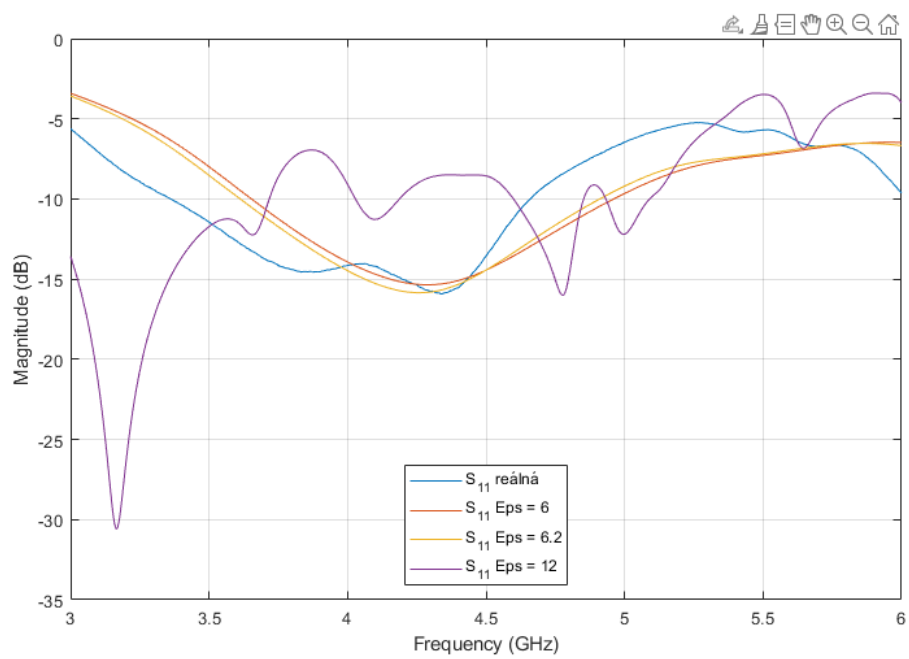
## Kapitola 5

### Měření vlastností antény

Samotné měření se odhrálo v bezodrazové místnosti na katedře elektromagnetického pole. Měření S-parametrů antény ukázalo, že zkonstruovaná anténa má odlišné vlastnosti oproti simulaci. Přizpůsobení antény, které v simulaci ukazovalo na provozní frekvenci 4.8 GHz, je nyní posunuté do pásma 4.2 - 4.4 GHz.



Obrázek 5.1: S-parametry změřené antény

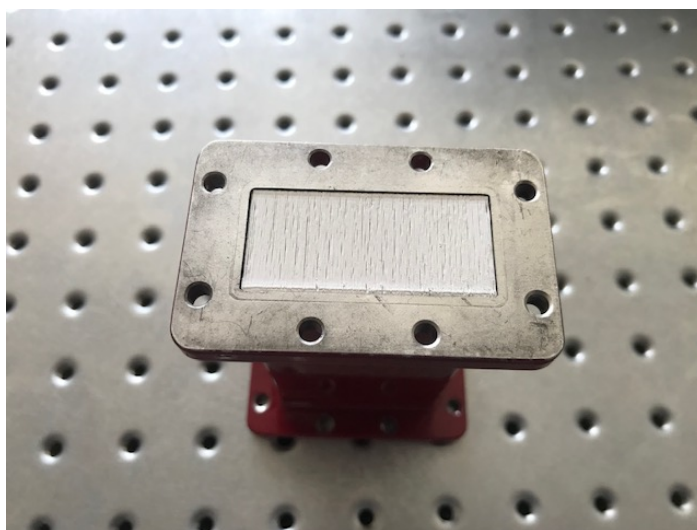


**Obrázek 5.2:** Porovnání S-parametrů antény a simulace

## 5.1 Měření reálné hodnoty permitivity materiálu

Jelikož se liší přizpůsobení antény od simulace, je nutné stanovit reálnou hodnotu permitivity rezonátoru.

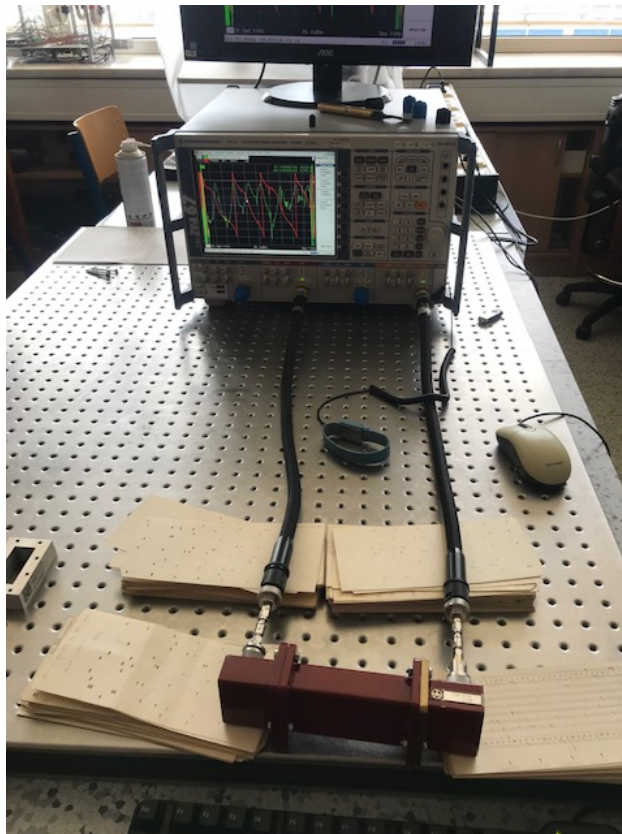
Pro měření byly vytištěny kvádry o rozměrech 47,55 mm x 22,15 mm s délkami 20 a 100 mm. Tyto kvádry byly nastaveny na 100% výplň. Kvůli obtížím s tiskem, o kterých je zmínka výše v textu, byl delší z kvádrů tištěn na 3 kusy a chemicky lepen pomocí acetonu. Tyto kvádry byly následně vloženy do vlnovodu R48. Na spektrálním analyzátoru byly následně změřeny rozprostřené parametry, zejména S21. Měření bylo provedeno v rámci doporučených frekvencí pro tento vlnovod, specificky 3-6 GHz.



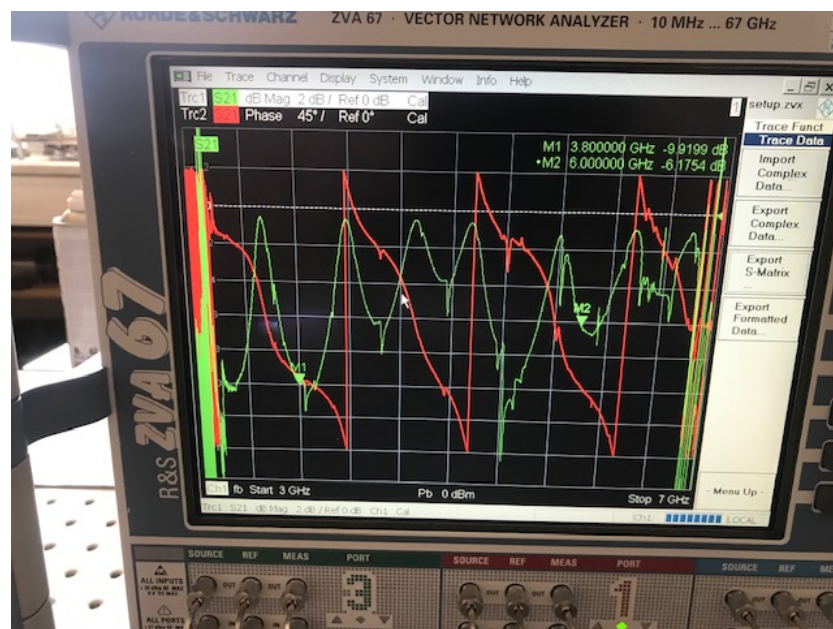
**Obrázek 5.3:** Vlnovod naplněný materiálem ABS1200

Výsledkem měření jsou rozprostřené parametry každého z měřených materiálů. Následně byly provedeny simulace s-parametrů v širokém rozsahu permitivit ve vlnovodu R48 a byla hledána nejlepší shoda v komplexní rovině s měřením. Po porovnání naměřených dat je nejpravděpodobnější, že skutečná hodnota permitivity je blízko 6.2 namísto původně očekávaných 12. Na vině jsou vzduchové mikrobubliny v tištěném materiálu a samotné nedokonalé spojené vrstvy.

## 5. Měření vlastností antény

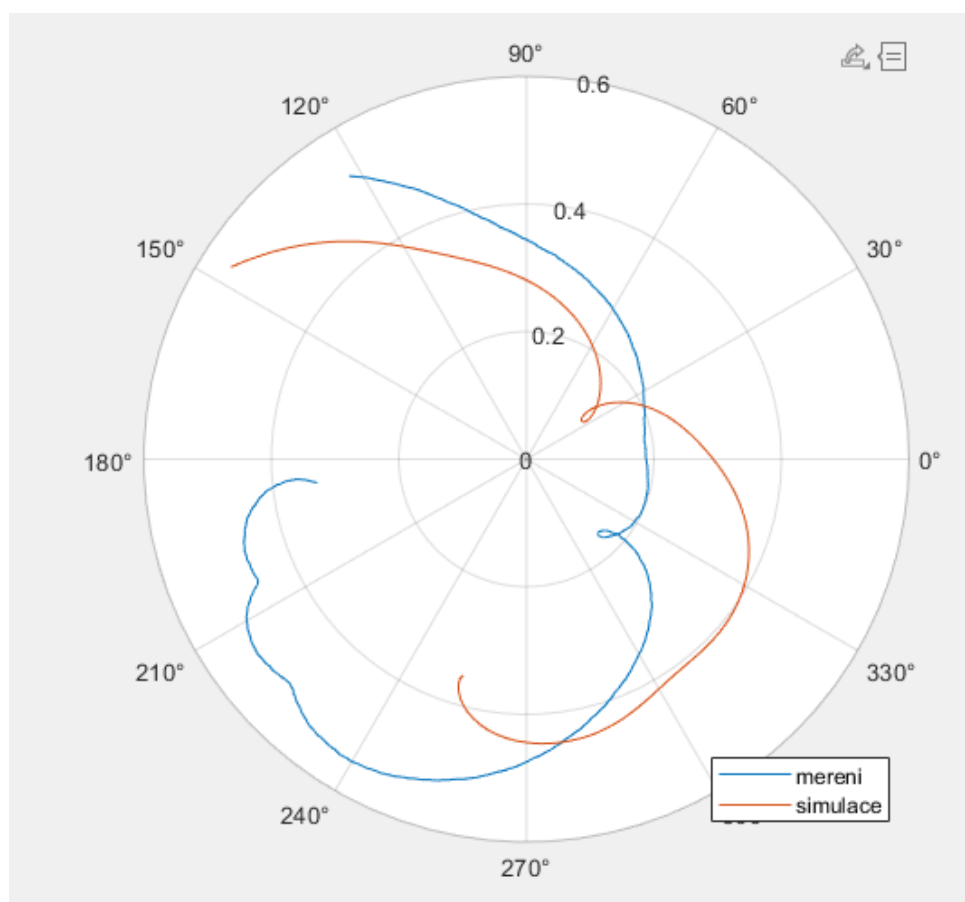


Obrázek 5.4: Měření permitivity



Obrázek 5.5: Detail měření

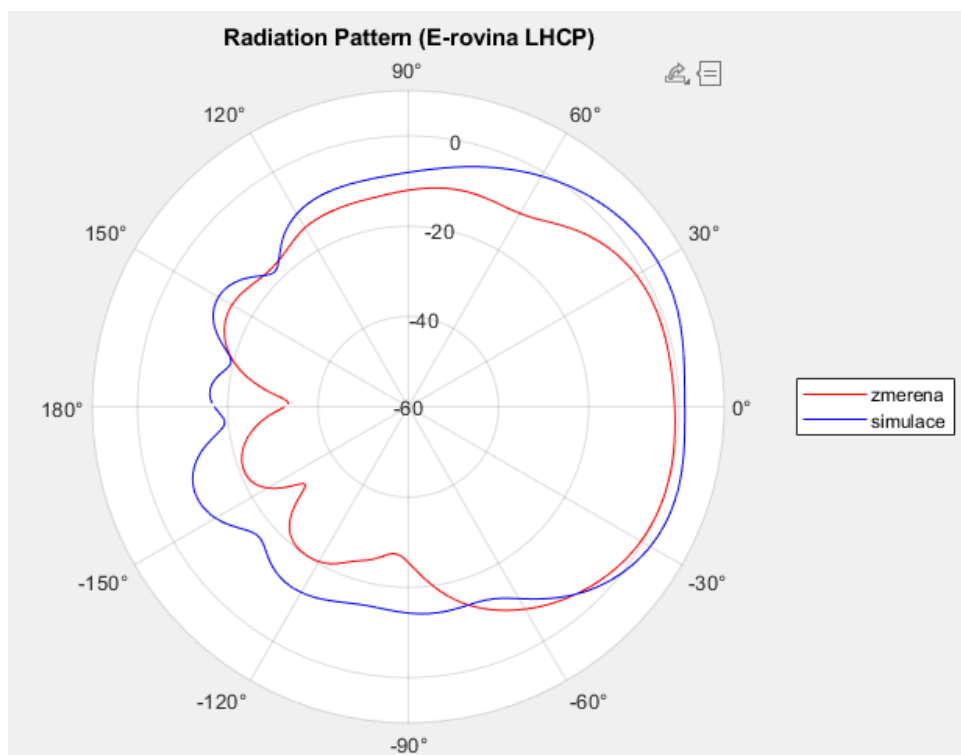




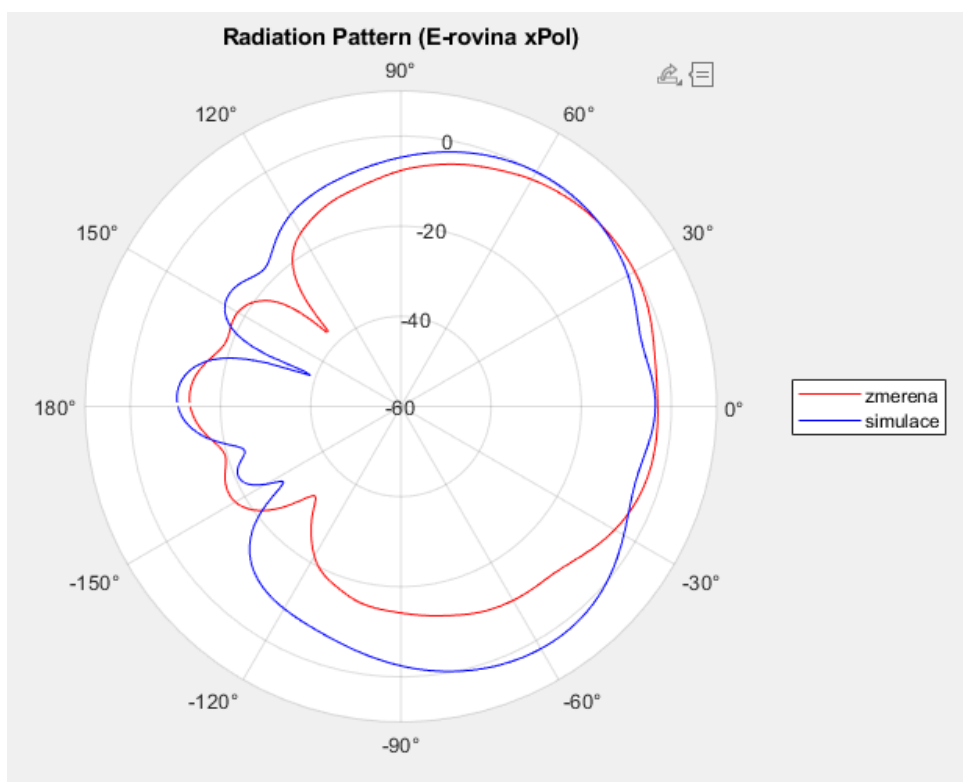
**Obrázek 5.6:** Nejlepší shoda měření se simulacemi

## 5.2 Měření vyzařovací charakteristiky

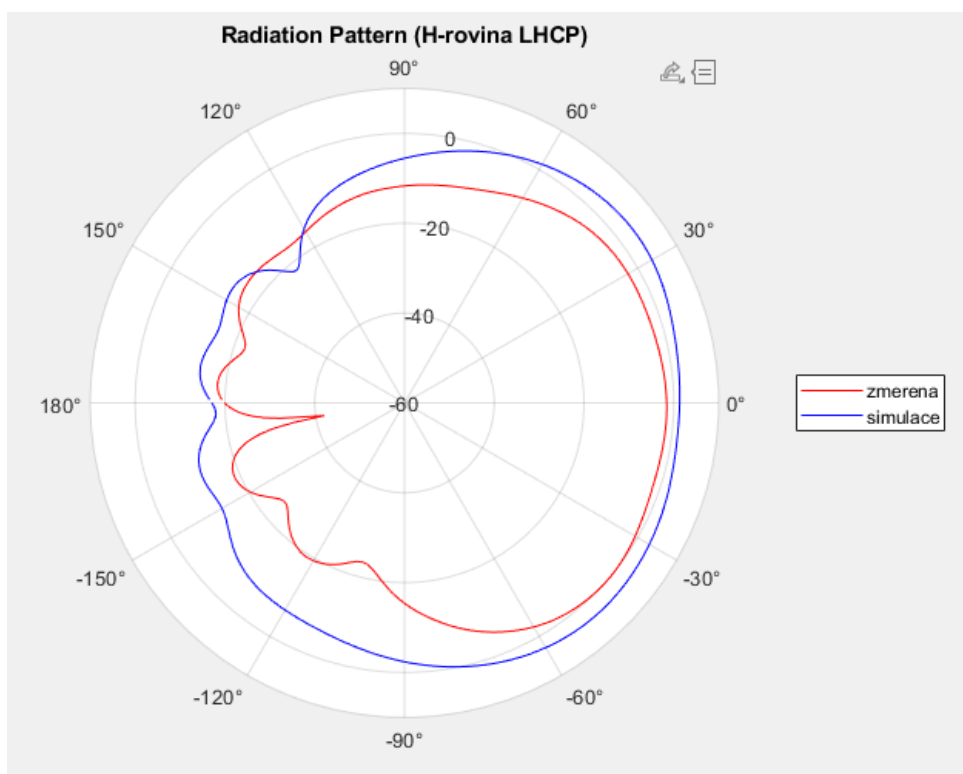
Vyzařovací charakteristika sestavené antény se také liší od simulací. Nicméně je ale zřejmé, že tvar pole je velmi podobný a pole samotné je trochu tlumené.



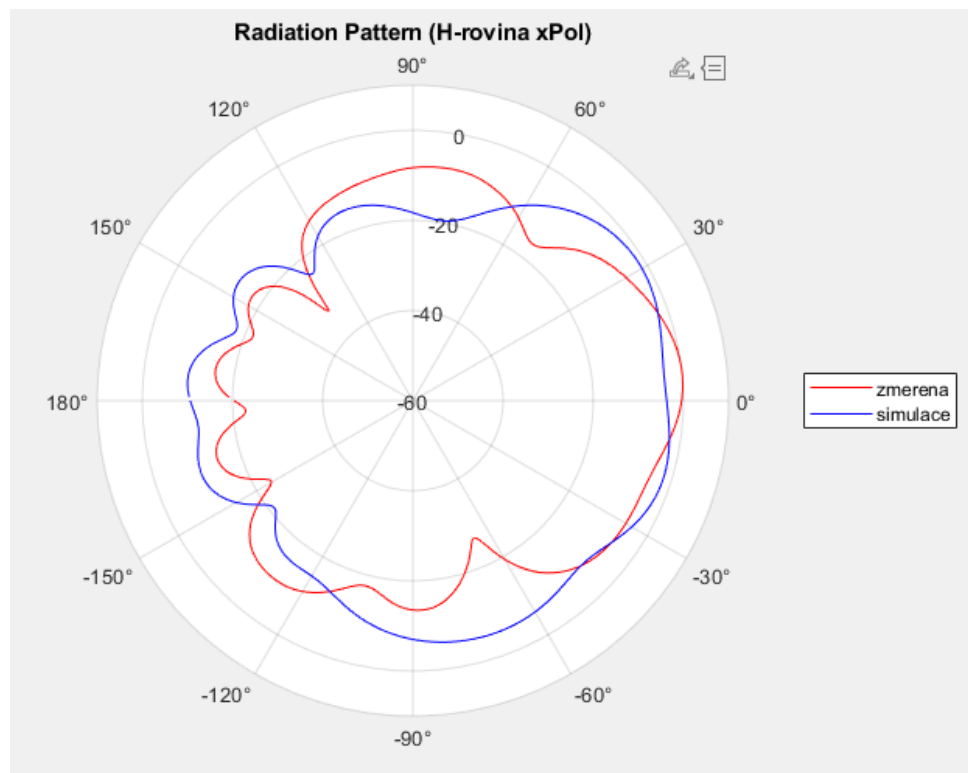
**Obrázek 5.7:** Vyzařovací charakteristika E-rovina LHCP, 4,35 GHz



**Obrázek 5.8:** Vyzařovací charakteristika E-rovina xPol, 4,35 GHz



**Obrázek 5.9:** Vyzařovací charakteristika H-rovina LHCP, 4,35 GHz



**Obrázek 5.10:** Vyzařovací charakteristika H-rovina xPol, 4,35 GHz



## Kapitola 6

### Závěr

V práci je popsán postup návrhu, simulace a výroby dvou dielektrických rezonátorových antén. Navrhování takového rezonátoru je v prostředí CST Studio Suite velmi uživatelsky pohodlné. Modelování rozměrů rezonátoru je prováděno téměř automaticky, byť je náročné na výpočetní výkon, kvůli počtu operací. Simulování antény je velmi rychlé, poskytuje detailní informace o tvaru a vlastnostech EM pole, které dielektrická rezonátorová anténa vyzařuje. Tisk takového rezonátoru z exotického materiálu je naopak složitý a vyžaduje mnoho pokusů, které jsou často časově a materiálově náročné, kvůli zvolené technologii FDM tiskárny a mechanickým vlastnostem materiálu. Nicméně tisk antény a vlnovodů je možný, ale jeho kvalita je nekonzistentní.

Na vině je nepředvídatelná permitivita, která se ve vrstveném materiálu chová nestandardně a produkuje velmi rozdílné elektrické vlastnosti oproti homogenním materiálům. Další faktor, který přímo ovlivňuje kvalitu výtisků, je tiskové prostředí. Vzduchem vyplněný prostor okolo tiskárny rozhodně nemá konzistentní teplotu narozdíl od tiskové formy, do které je materiál určen.





## Literatura

- [1] MUKHERJEE, Biswajeet a Monika CHAUHAN. Dielectric Resonator Antennas [online]. 1. USA: Artech House, 2022. ISBN 978-1-63081-870-8.
- [2] RAD, Majedehsadat, Nastouh NIKKHAH, Bijan ZAKERI a Mohammad YAZDI. Wideband Dielectric Resonator Antenna With Dual Circular Polarization. IEEE Transactions on Antennas and Propagation [online]. 2022, 70(1), 714-719 [cit. 2023-01-17]. ISSN 0018-926X. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.2021.3098516
- [3] CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [4] 3D tiskárna Original Průša i3 MK3S+. [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [5] CHOWDHURY, Rakesh a Raghvendra Kumar CHAUDHARY. An Approach to Generate Circular Polarization in a Modified Cylindrical-Shaped Dielectric Resonator Antenna Using PMC Boundary Approximation. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters [online]. 2018, 17(9), 1727-1731 [cit. 2023-01-16]. ISSN 1536-1225. Dostupné z: doi:10.1109/LAWP.2018.2864819
- [6] CHOWDHURY, R. a R. K. CHAUDHARY. A new Technique to Generate Circular Polarization in Periodically Deformed Rectangular Dielectric Resonator Antenna using PMC Boundary Approximation. In: 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC) [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 1-4 [cit. 2023-01-17]. ISBN 978-908-25987-5-9. Dostupné z: doi:10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738171
- [7] HUANG, Jin, Shengjian Jammy CHEN, Zhenghui XUE, Withawat WITTHAYACHUMNANKUL a Christophe FUMEAUX. Impact of Infill Pattern on 3D Printed Dielectric Resonator Antennas. In: 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 233-235 [cit. 2023-01-17]. ISBN 978-1-5386-5648-8. Dostupné z: doi:10.1109/APCAP.2018.8538296

- [8] Polyetherimid. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyetherimide>