

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Návrh a realizace kompaktní tyčové antény s využitím
dielektrik**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan HOŠEK
Osobní číslo: E10B0302P
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektronika a telekomunikace
Název tématu: Návrh a realizace kompaktní tyčové antény s využitím dielektrik
Zadávající katedra: Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Po nabytí potřebných znalostí z oboru anténních systémů navrhnete tyčovou anténu, ověříte její funkci v simulátoru pole, anténu zhotovíte a provedete diskuzi vlastností.

1. Seznamte se samostatně s podstatnými pojmy z teorie antén a zaměřte se na vyzařování z kruhového vlnovodu opatřeného dielektrickou tyčí.
2. Navrhnete tyčovou anténu. Pro prvotní posouzení návrhu využijte numerický simulátor pole.
3. Připravte vzorek antény a měřeními ověřte předpokládané vlastnosti.
4. Provedte zhodnocení tyčové antény z hlediska elektrických vlastností, rozměrů a ekonomiky případné výroby oproti jiným typům antén.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Mráz, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci tyčové antény s využitím dielektrik. Cílem práce je ověřit možnost použití dielektrika pro tvarování směrové charakteristiky antény, návrh tyčové antény, realizace antény, odměření jejich parametrů a následné porovnání s parametry předpokládanými. Návrh a simulace antény je realizována na základě teoretických poznatků v programu FEKO. V tomto programu je namodelováno několik variant antény s rozdílnými rozměry dielektrika pro nalezení optimálního tvaru. Na základě návrhu je provedena simulace antény a podle dosažených výsledků je provedena optimalizace parametrů antény. Optimalizovaná anténa je vyrobena pro ověření výsledků dosažených v simulaci. Výsledky simulace a měření jsou poté porovnány.

Klíčová slova

anténa, vlnovod, dielektrikum, konstanta šíření, vlnová délka, kritický kmitočet, impedanční přizpůsobení, zisk, směrová charakteristika, poměr stojatých vln, činitel odrazu

Abstract

This presented bachelors thesis is focused on design and realization a rod antenna using a dielectric. The main aim of this work is to verify the possibility of using dielectric for shaping antenna's radiation pattern, rod antenna design, its production, measurement of parameters and following comparison with presumed parameters. The antenna's design and simulation is implemented on the basis of theoretical knowledge in FEKO programme. In this programme are designed several kind of antennas with different sizes of dielectric for finding optimal shape. On the basis proposal is performed simulation of antenna and according to achieved results is performed optimization of antenna parameters. Optimized antenna is produced for verification the results achieved in the simulation. The results of simulation and measurement are compared.

Key words

antenna, waveguide, dielectric, propagation constant, wavelength, impedance matching, gain, radiation pattern, standing wave ratio, reflection coefficient

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 9.6.2014

Jméno příjmení

.....

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 CÍL PRÁCE	10
2 TEORETICKÝ ROZBOR	10
2.1 TEORETICKÝ ROZBOR VLNOVODU	10
2.2 TEORETICKÝ ROZBOR NAPÁJEČE	13
2.3 TEORETICKÝ ROZBOR DIELEKTRIKA	14
3 NÁVRH ANTÉNY	15
3.1 VÝPOČET VLNOVODU	15
3.2 VÝPOČET NAPÁJENÍ	16
4 OVĚŘENÍ VYUŽITÍ A OPTIMALIZACE DIELEKTRIKA	17
5 OVĚŘENÍ NÁVRHU SIMULACÍ	22
5.1 OPTIMALIZACE NAPÁJENÍ	22
6 REALIZACE ANTÉNY	24
6.1 REALIZACE KOVOVÉHO VLNOVODU	24
6.2 REALIZACE DIELEKTRIKA	24
6.3 REALIZACE NAPÁJEČE	25
6.4 KOMPLETACE ANTÉNY	26
7 MĚŘENÍ ANTÉNY	27
7.1 POROVNÁNÍ SIMULACE S MĚŘENÍM	28
8 ZÁVĚR	33

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci tyčové antény s využitím dielektrik. Práce je tvořena několika kapitolami, mezi které patří teoretický rozbor návrhu, který definuje základní vlastnosti a vztahy pro návrh tyčové antény. Další kapitolou je již samotný návrh antény. V této části jsou vypočítány rozměry základních částí antény.

Následuje kapitola, ve které je ověřena oprávněnost využití dielektrika. Ověření je provedeno experimentem, kdy je vytvořena anténa bez dielektrika a s použitím dielektrika. Tyto dvě antény jsou simulovány v programu FEKO a jsou porovnány jejich vyzařovací charakteristiky. Po ověření následuje návrh optimálního tvaru dielektrika pro dosažení zvýšené směrovosti antény. Po navržnutí antény jsou ověřeny její vlastnosti v programu FEKO.

Výsledky simulace slouží k zhodnocení návrhu a jsou použity k optimalizaci tyčové antény. Optimalizace antény je opět ověřena simulací. Simulací jsou ověřeny nejen směrové charakteristiky a dosažený zisk, ale i impedanční přizpůsobení antény. Po dosažení požadovaných parametrů, které byly stanoveny na začátku návrhu, je anténa vyrobena.

Výroba antény je popsána v samostatné kapitole, která obsahuje nejen popis výroby, ale jsou zde uvedeny důvody konkrétních postupů a popsány různé rady pro realizaci. Vyrobena anténa je následně změřena. Měření slouží pro ověření správnosti návrhu a postupu realizace.

Seznam symbolů

k	Konstanta šíření
E [V/m].....	Intenzita elektrického pole
H [H].....	Intenzita magnetického pole
ε	Permitivita vakua
μ [H/m].....	Permeabilita
c [m/s].....	Rychlost světla
λ [m].....	Vlnová délka
λ_v [m].....	Vlnová délka ve vlnovodu
λ_{ved} [m].....	Vlnová délka ve vedení
f_k [Hz].....	Kritická frekvence vlnovodu
a_{mn}	Kořen Besselovy funkce
c [m/s].....	Rychlost světla
$\sqrt{\Omega}$	Činitel
β	Fázová konstanta
l_k [m].....	Vzdálenost napájení od zadní stěny vlnovodu
h_k [m].....	Délka kolíku napájení
G [dB].....	Zisk
PSV	Poměr stojatých vln

1 Cíl práce

Cílem práce je z teoretických poznatků šíření vln ve vlnovodech vytvořit anténu. Při návrhu antény ověřit možnost použití dielektrik pro usměrnění vyzařovaného signálu. A z těchto poznatků vytvořit návrh, u kterého budou tyto poznatky aplikovány. Tento návrh ověřit simulací v programu FEKO a podle dosažených výsledků navrhnout úpravy pro optimalizaci parametrů antény. Cílem je v simulaci navrhnout anténu se ziskem větším než 10 dB, s co možno nejvyšší vyzařovací charakteristikou. Přizpůsobit anténu tak, aby hodnota činitele odrazu ρ byla menší než -10 dB a hodnota poměru stojatých vln PSV byla menší než 1,85. Při dosažení těchto výsledků, takto navrženou anténu vyrobit s parametry, které nebudou horší než 5% od výše navržených hodnot.

2 Teoretický rozbor

V této kapitole budou představeny základní vztahy pro návrh vlnovodu, které budou dále použity pro jeho výpočet.

2.1 Teoretický rozbor vlnovodu

Vlnovod je nejdůležitější část antény. Při návrhu vlnovodu se vychází z teorie šíření elektromagnetických vln ve vlnovodu. Ve vlnovodech se využívá šíření TE vln, které mají nulovou složku elektrického pole E_z a TM vln, které mají nulovou složku magnetického pole H_z . Při řešení se vychází z vlnové rovnice:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.1)$$

kde k je konstanta šíření a platí pro ní vztah:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \quad (2.2)$$

Takto zapsanou vlnovou rovnici je třeba převést do tvaru vyhovujícího pro řešení vlnovodu s kruhovým průřezem. Při uvažování vlastností vlnovodu a směru šíření vlny ve směru osy z můžeme psát intenzity pole ve tvaru:

$$E_z = E_{zp} e^{-jk_z z} \quad (2.3)$$

$$H_z = H_{zp} e^{-jk_z z} \quad (2.4)$$

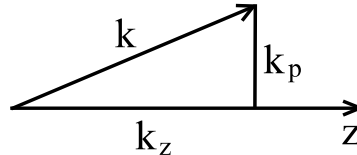
po dosazení intenzity elektrického pole do vlnové rovnice pro cylindrickou soustavu dostaneme po úpravě:

$$\frac{\partial^2 E_{zp}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_{zp}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_{zp}}{\partial \varphi^2} + k_p^2 E_{zp} = 0 \quad (2.5)$$

analogicky dosazením intenzity magnetického pole:

$$\frac{\partial^2 H_{zp}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{zp}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_{zp}}{\partial \varphi^2} + k_p^2 H_{zp} = 0 \quad (2.6)$$

kde k_p je příčná konstanta šíření. Obrázek (2.1) ukazuje vztah mezi konstantami k , k_z , k_p .



Obr. 2.1 Vztah konstant šíření

Vztah mezi konstantami je:

$$k = k_p^2 + k_z^2 \quad (2.7)$$

pokud nemá být vlna tlumena, při vedení bezetrátovým vlnovodem, musí být konstanta k_z reálná.

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_p^2} \quad (2.7)$$

Aby tato podmínka byla splněna, musí platit nerovnost $k \geq k_p$. Z této podmínky dostáváme při dosazení rovnice (2.2) do rovnice (2.7) důležitý vztah:

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} > k_p \quad (2.8)$$

po úpravě rovnice (2.8) získáme rovnici pro výpočet kritického kmitočtu f_k .

$$f > \frac{c_0}{2\pi \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} k_p \quad (2.9)$$

$$f_k = \frac{c_0}{2\pi \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} k_p \quad (2.10)$$

Z rovnic (2.9) a (2.10) vyplývá, že frekvence vlny, má-li být vedena ve vlnovodu, musí být větší než kritický kmitočet f_k . Zbývá určit konstantu k_p , kterou získáme vyřešením vlnové rovnice. Řešením vlnové rovnice (2.6), přejde na Besselovu rovnici, ze které získáme její kořeny. Řešení této rovnice není předmětem této práce a tak je zde uveden pouze výsledek, který je důležitý pro návrh vlnovodu. Řešením získáme kořeny rovnice, které označíme a_{mn} , kde index m značí řád Besselovy rovnice 1. druhu a n značí pořadí kořene.

Pro TM vidy:

$$k_p = \frac{a_{mn}}{r} \quad (2.11)$$

Pro TE vidy:

$$k_p = \frac{a'_{mn}}{r} \quad (2.12)$$

kde r je poloměr vlnovodu. [1]

Dominantním videm, tedy videm s nejnižším mezním kmitočtem a nejmenší příčnou konstantou šíření k_p , je vid TE_{11} s kořenem Besselovy funkce $a'_{11} = 1,841$. Nejbližší vyšším videm je vid TM_{01} s kořenem Besselovy funkce $a_{01} = 2,405$.

Po dosazení k_p pro vid TE_{11} do rovnice (2.10) dostaneme pro zadaný poloměr r nejnižší možnou frekvenci, kdy se ještě bude vlnovodem šířit vlna TE. Dosazením k_p pro vid TM_{01} do rovnice (2.10) dostaneme nejvyšší možnou frekvenci, kdy se bude vlnovodem šířit pouze dominantní vid. Z toho vyplývá šířka pásma vlnovodu $\Delta f = f_k^{TM_{01}} - f_k^{TE_{11}}$. Z rovnice (2.10) se vypočte poloměr vlnovodu.

Zbývá určit délku vlnovodu, která odpovídá jedné vlnové délce vlny ve vlnovodu, která ovšem není stejná jako vlnová délka ve volném prostoru. Délka vlny ve vlnovodu vychází větší než délka vlny ve volném prostoru. K výpočtu vlnové délky ve vlnovodu, tedy délky samotného vlnovodu použijeme tento vztah:

$$\lambda_v = \frac{2\pi}{k_z} = \frac{2\pi}{k\sqrt{\Omega}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\Omega}} \quad (2.13)$$

kde $\sqrt{\Omega}$ je činitel zkrácení:

$$\sqrt{\Omega} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_k}{f}\right)^2} \quad (2.14)$$

a λ je vlnová délka vlny ve volném prostředí s parametry, které jsou uvnitř vlnovodu, tedy s konkrétním dielektrikem, které bude použito při výrobě. Proto musíme znát již při návrhu materiály, které budou použity při konstrukci antény.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.15)$$

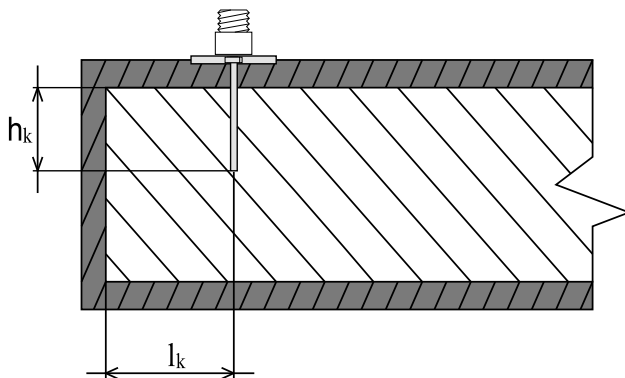
Kde β je fázová konstanta, kterou pro dielektrikum, které je ve vlnovodu vyjádříme tímto způsobem: [1], [2]

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad (2.16)$$

2.2 Teoretický rozbor napáječe

Existuje několik způsobů, jak vybudit signál ve vlnovodu. Pro napájení antény bylo zvoleno buzení proudovou sondou, které patří mezi nejpoužívanější. Buzení je realizováno koaxiálním kabelem, jehož střední vodič je zasunut do vlnovodu.

Je důležité anténu s napájením impedančně přizpůsobit, aby nedocházelo k odrazu signálu a vzniku stojatých vln na vedení. Impedanční přizpůsobení se provádí pomocí impedančního transformátoru, který představuje naše proudová sonda v literatuře označovaná jako kapacitní kolík. Jak název napovídá, takto realizovaný impedanční transformátor kompenzuje pouze induktivní složku imaginární impedance antény.



Obr. 2.2 Napájení vlnovodu-proudová sonda

Pro impedanční přizpůsobení je třeba použít impedanční transformátor s minimálně dvěma nezávisle nastavitelnými parametry, pro kapacitní kolík tedy změny vzdálenosti napájecího kolíku od zadní stěny vlnovodu, kde vzdálenost l_k by měla být čtvrtinou vlnové délky ve vlnovodu a změnou hloubky zasunutí napájecího kolíku h_k , která by měla odpovídat čtvrtině vlnové délky v přívodním kabelu. V našem případě tedy v koaxiálním kabelu.

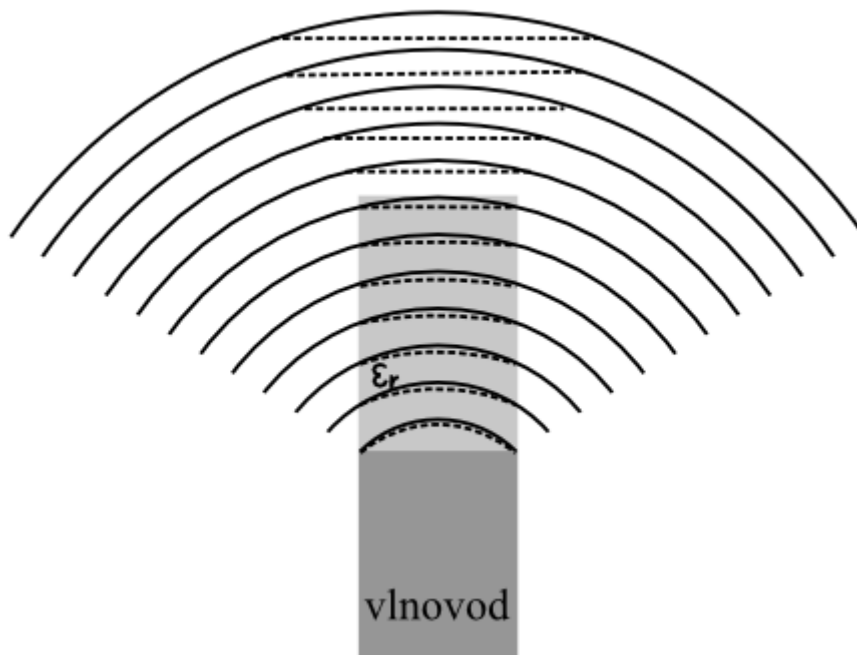
$$l_k = \frac{\lambda_v}{4} \quad (2.17)$$

$$h_k = \frac{\lambda_{ved}}{4} \quad (2.18)$$

Vlnová délka λ_v se vypočte pomocí rovnice (2.13) a λ_{ved} se vypočte pomocí rovnice (2.15). Při výpočtu musíme uvažovat materiálové vlastnosti vlnovodu a koaxiálního vedení. Jedná se hlavně o relativní permitivitu použitého dielektrika. [3], [4], [5]

2.3 Teoretický rozbor dielektrika

Do vlnovodu bylo vloženo dielektrikum, které formuje tvar vyzařovací charakteristiky. Využívá se větší relativní permitivity ϵ_r , než má vzduch a tedy pomalejšímu šíření signálu tímto dielektrikem než v okolním prostředí, které tvoří vzduch. Díky tomu se dosáhne postupného narovnávání vlnoplochy, a proto se dosáhne užšího vyzařovacího svazku, než by vzniklo bez použití dielektrika. Na obrázku 2.3 je znázorněn princip, kterého se využívá pro získání směrovosti.



Obr. 2.3 Princip zpomalení šíření vlny v dielektriku

Délka a tvar dielektrika bude zvolen podle výsledků v programu FEKO. Tvar byl optimalizován pro co nejužší vyzařovací diagram s největším možným ziskem. Podle použitého dielektrika se bude měnit samotný tvar dielektrika. Délka dielektrika závisí na použitém materiálu, pokud se použije materiál s větší relativní permitivitou, dojde k narovnání vlnoplochy dříve a použité dielektrikum může být kratší. Záleží na konkrétních požadavcích na konstrukci antény. Použité dielektrikum by mělo mít co nejmenší ztrátový činitel $tg(\delta)$. Hodnoty ztrátového činitele by měly být mnohem menší než jedna, aby nedocházelo k útlumu signálu průchodem dielektrika. Běžně se používají dielektrika s hodnotou ztrátového činitele kolem 10^{-4} . Opět čím menší hodnota tím lepší vlastnosti antény.

3 Návrh antény

Výpočet vlnovodu vychází z výše uvedeného teoretického návrhu. Jak je z některých vztahů pro návrh patrné, je třeba v tuto chvíli zvolit materiály, které budou použity při realizaci antény. Ze zvolených materiálů je nejdůležitější právě požitá dielektrikum, které ovlivní délku vlnovodu, umístění napájení.

3.1 Výpočet vlnovodu

Pro návrh vlnovodu byla zvolena frekvence 2,4 GHz. Pro tuto frekvenci vychází poloměr vlnovodu 26 mm. Jako dielektrikum byl použit PE s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,3$. Nejprve byla vypočtena frekvence vidu TE_{11} :

$$f_k^{TE_{11}} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \cdot \frac{a'_{11}}{r} = \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi\sqrt{2,3}} \cdot \frac{1,841}{0,026} = 2,229 \text{ GHz}$$

tím je stanovena dolní mezní frekvence antény. Stejným způsobem se vypočte frekvence vidu TM_{01} , která určí horní mezní frekvenci pro jednovidový přenos signálu anténou:

$$f_k^{TM_{01}} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \cdot \frac{a'_{11}}{r} = \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi\sqrt{2,3}} \cdot \frac{2,405}{0,026} = 2,912 \text{ GHz}$$

Frekvenční pásmo vlnovodu pro jednovidový mód vyšlo:

$$\Delta f = f_k^{TM_{01}} - f_k^{TE_{11}} = 2,851 \cdot 10^9 - 2,182 \cdot 10^9 = 683 \text{ MHz}$$

Jak je vidět zvolená frekvence 2,4 GHz se nachází ve frekvenčním pásmu vlnovodu. Zvolený poloměr je tedy správný. Délku vlnovodu určíme z rovnice (2.13), do které dosadíme rovnici (2.14), (2.15) a (2.16).

$$\begin{aligned}\lambda_v &= \frac{2\pi}{k_z} = \frac{2\pi}{k\sqrt{\Omega}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\Omega}} = \frac{\frac{2\pi}{\beta}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_k}{f}\right)^2}} = \frac{\frac{2\pi}{\omega \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_k}{f}\right)^2}} = \\ &= \frac{2\pi}{\frac{2\pi \cdot 2,4 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot 2,3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{2,229 \cdot 10^9}{2,4 \cdot 10^9}\right)^2}}} = 222,185 \text{ mm}\end{aligned}$$

Délka vlnovodu bude 222 mm.

3.2 Výpočet napájení

Výpočet l_k , tedy vzdálenosti napájení od zadní stěny vlnovodu. Hodnota vlnové délky ve vlnovodu je spočítána v kapitole 2.1 Výpočet vlnovodu a tuto hodnotu použijeme.

$$l_k = \frac{\lambda_v}{4} = \frac{222}{4} = 55,5 \text{ mm}$$

Pro výpočet h_k vlnové délky vlny v přívodním kabelu je třeba nejdříve vypočíst fázovou konstantu β , kterou získáme vypočtením rovnice (2.16), kterou dosadíme do rovnice (2.15) a následně do rovnice (2.18)

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} = 2 \cdot \pi \cdot 2,4 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{8,8542 \cdot 10^{-9} \cdot 2,4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 77,925$$

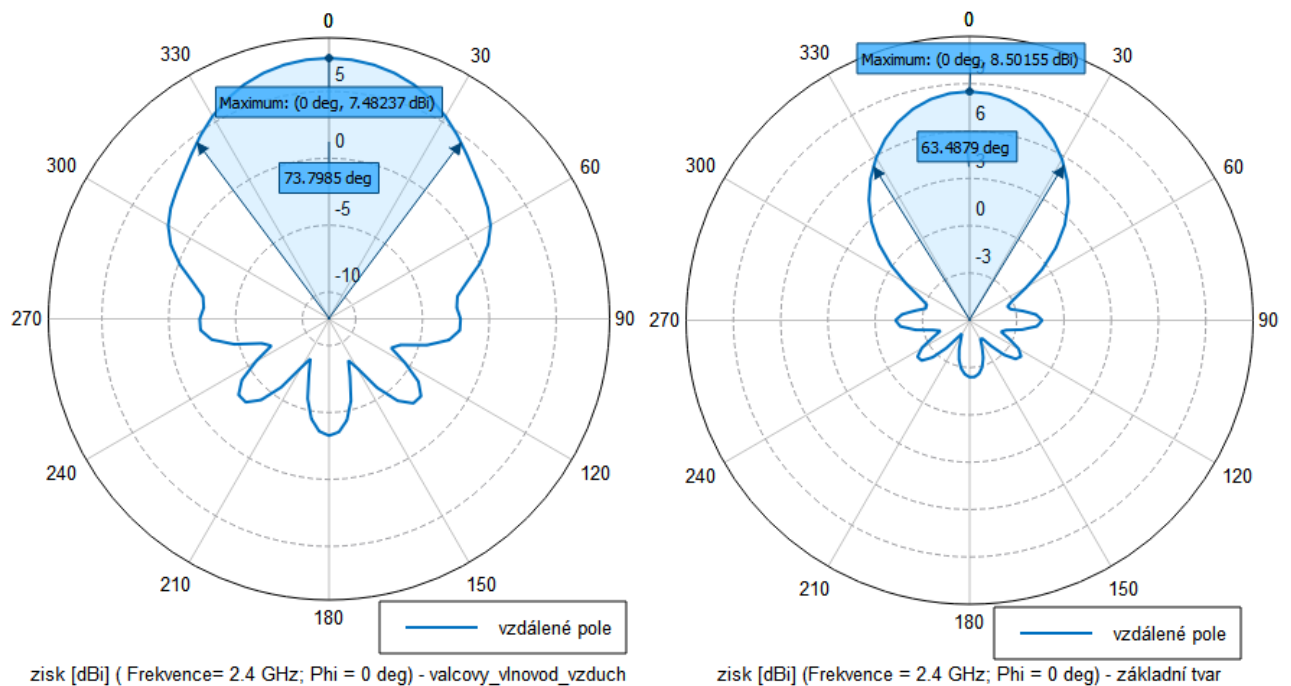
$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{77,925} = 80,63 \text{ mm}$$

$$h_k = \frac{\lambda_{ved}}{4} = 20,2 \text{ mm}$$

4 Ověření využití a optimalizace dielektrika

Pro návrh vlnovodu je stěžejní ověření teoretických předpokladů použití dielektrika pro usměrnění vyzařování signálu. Pro ověření využijeme jednoduchý pokus. V programu FEKO vytvoříme anténu bez použití dielektrika a anténu s dielektrikem. Z programu postFEKO získáme simulaci parametrů obou antén a vzájemně porovnáme jejich vyzařovací charakteristiky.

Ze simulace vyplynulo zajímavé zjištění. Při použití dielektrika o stejné délce jako má vlnovod, je vyzařovací úhel pro pokles signálu o 3dBi horší než bez použití dielektrika. Konkrétně $73,5^\circ$ bez dielektrika oproti $124,7^\circ$ s dielektrikem. Avšak při prodlužování délky dielektrika se situace otočí. Na obrázku 4.1 je vyzařovací diagram kruhového vlnovodu bez použití dielektrika vlevo a s použitím dielektrika vpravo. Jak je z obrázku vidět použitím dielektrika se opravdu zlepši směrové vlastnosti antény. Vzhledem k tomu se dá vyvodit závěr, že použití dielektrika má smysl, ale je třeba zjistit optimální tvar.



Obr. 4.1 Vyzařovací charakteristika antén bez dielektrika a s dielektrikem

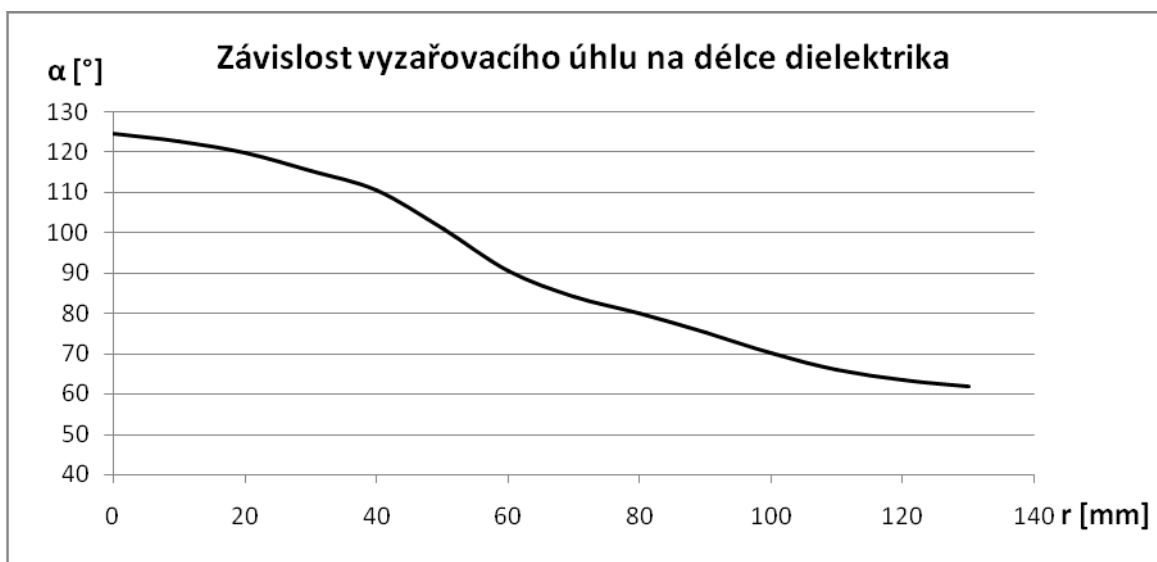
Určování optimálního tvaru dielektrika mělo dvě fáze:

- Zjištění optimální délky
- Zjištění optimální šířky

Graf 4.1 znázorňuje, jak se měnil zisk antény s délkou dielektrika. Zvětšování zisku při zvětšování délky dielektrika má jednoduché vysvětlení. Větší část signálu se, z důvodu rovnání vlnoplochy šíří daným směrem. Pokud se ovšem bude dielektrikum stále prodlužovat i když už se dosáhlo vyrovnání vlnoplochy, začne se projevovat útlum signálu dielektrikem. Délku dielektrika má tedy smysl prodlužovat, dokud se navýšení zisku nevyrovná zvětšení útlumu. Graf 4.2 znázorňuje, jak se měnila směrovost antény s délkou dielektrika. Jak již bylo zmíněno dříve, jsou parametry spolu závislé.

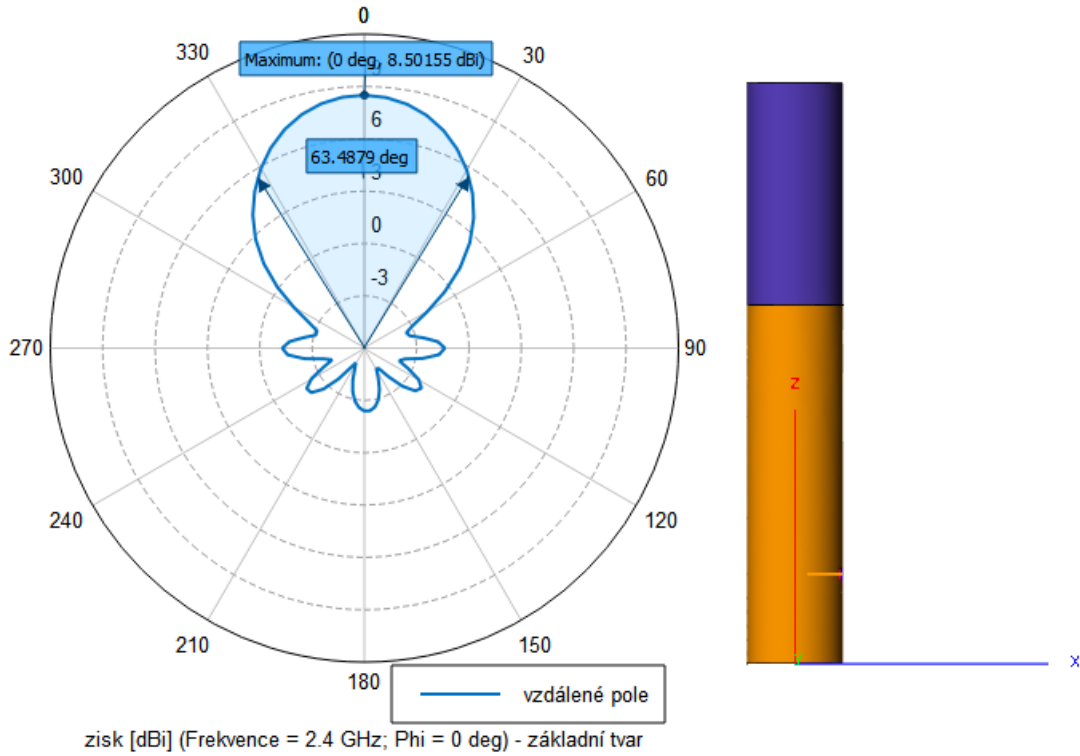


Graf 4.1 Závislost zisku antény na délce dielektrika

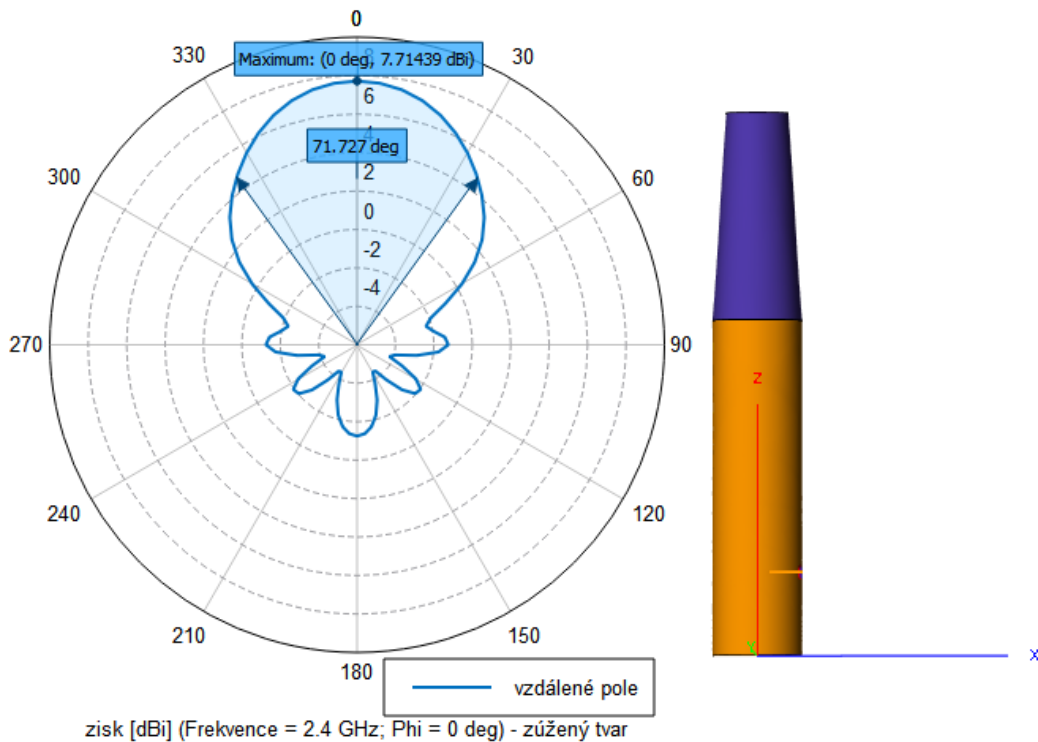


Graf 4.2 Závislost vyzařovacího úhlu na délce dielektrika

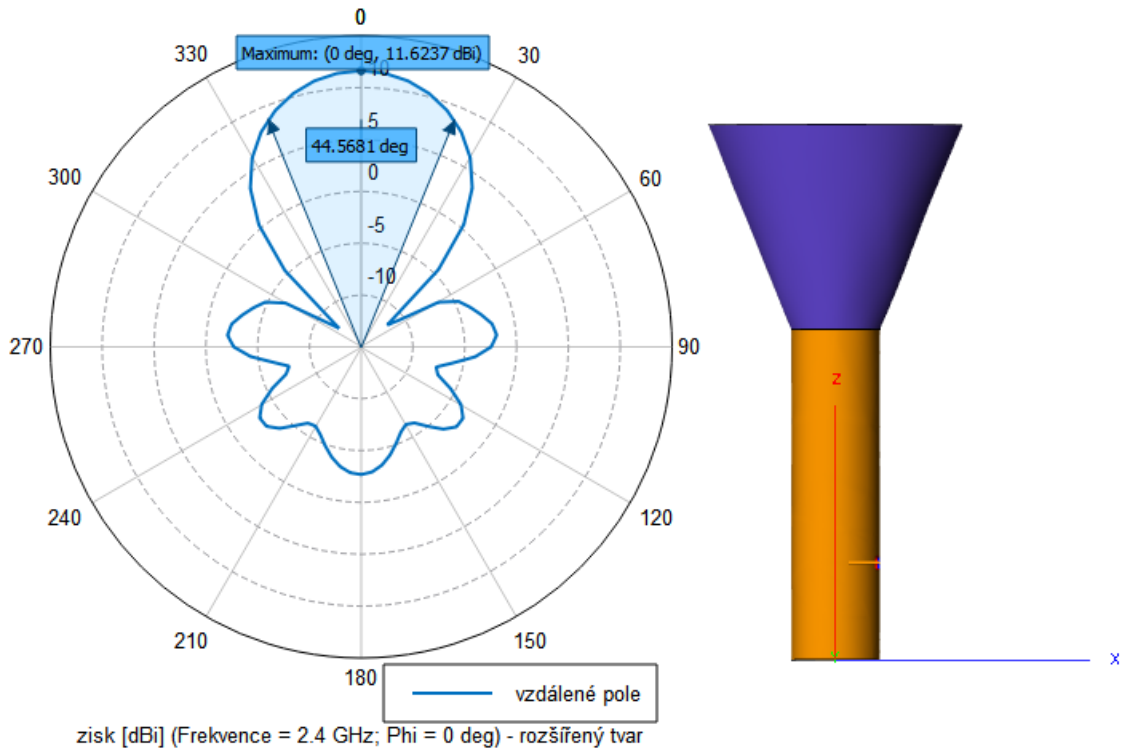
Zatím se měnila jenom délka dielektrika. Vyzařovací charakteristika se ovšem bude měnit, pokud se bude měnit šířka dielektrika. Níže je výsledek malého experimentu, pro zjištění, jak se s šířkou dielektrika mění vyzařovací charakteristika antény.



Obr. 4.2 Vyzařovací diagram pro základní tvar ($r = 26$ mm)

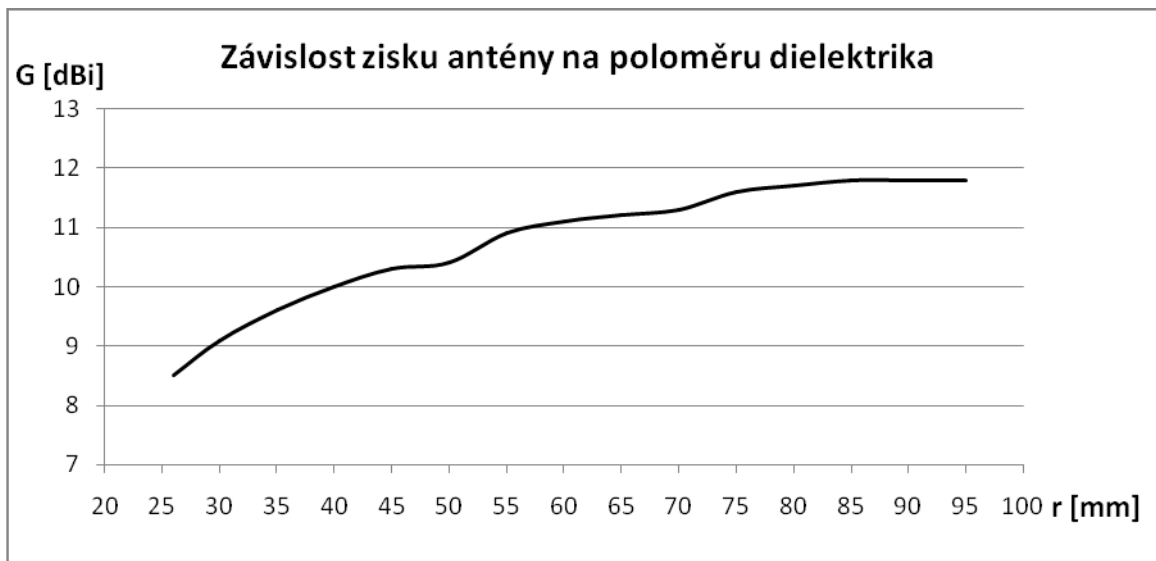


Obr. 4.3 Vyzařovací diagram pro zúžení ($r = 18$ mm)

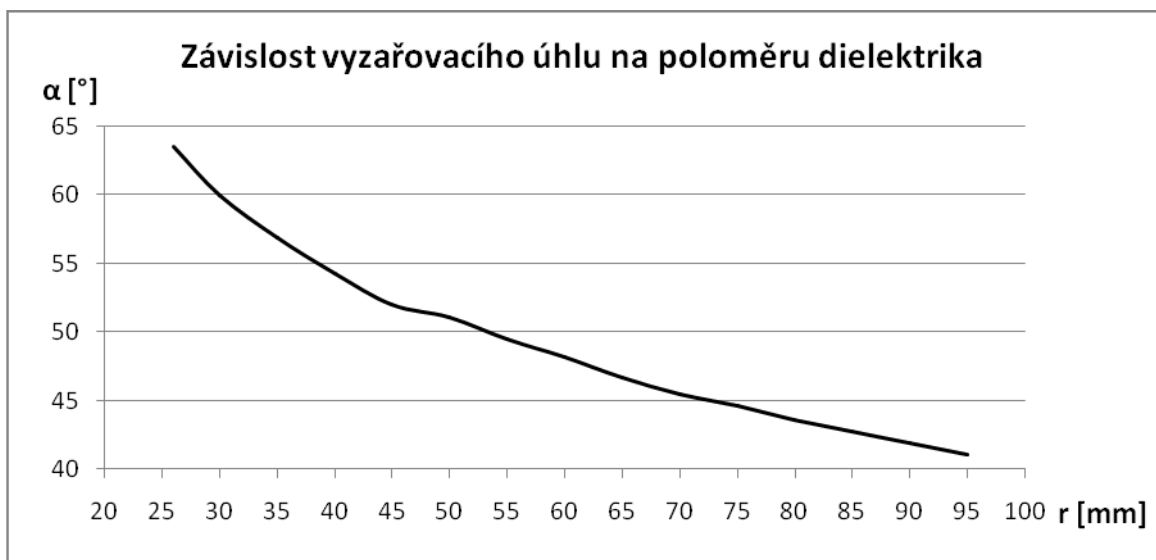
Obr. 4.4 vyzařovací diagram pro rozšířený tvar ($r = 75$ mm)

Vyzařovací charakteristiky byly sledovány v programu PostFEKO, který slouží jako výstup programu CadFEKO, kde se realizuje návrh antény. Tento experiment je realizován pro délku dielektrika 120 mm. Jak je vidět na obrázku 4.2, tedy s poloměrem dielektrika 26 mm po celé délce stejným, nabývá vyzařovací diagram maxima v 8,5 dBi a vyzařovací úhel je 63,5°. Jsou to tedy výchozí parametry antény, které budeme měnit. Při postupném zúžení dielektrika na 18 mm poklesne zisk na 7,71 dBi a vyzařovací úhel vzroste na 71,73°. Situaci vystihuje obrázek 4.3. Oba parametry se zhoršily a můžeme tedy vyvodit závěr, že zúžením dielektrika se nedosáhne lepších parametrů. Lepších parametrů se dosáhne postupným rozšířením dielektrika na 75 mm, jak vystihuje obrázek 4.4, kdy vzroste zisk na 11,61dBi a poklesne vyzařovací úhel na 44,60°.

Z grafu 4.3 a 4.4 je vidět, že od poloměru 75 mm se zisk už téměř nezvětšuje. Tato hodnota byla tedy zvolena za optimální z hlediska výkonu.



Graf 4.3 Závislost zisku antény na poloměru dielektrika



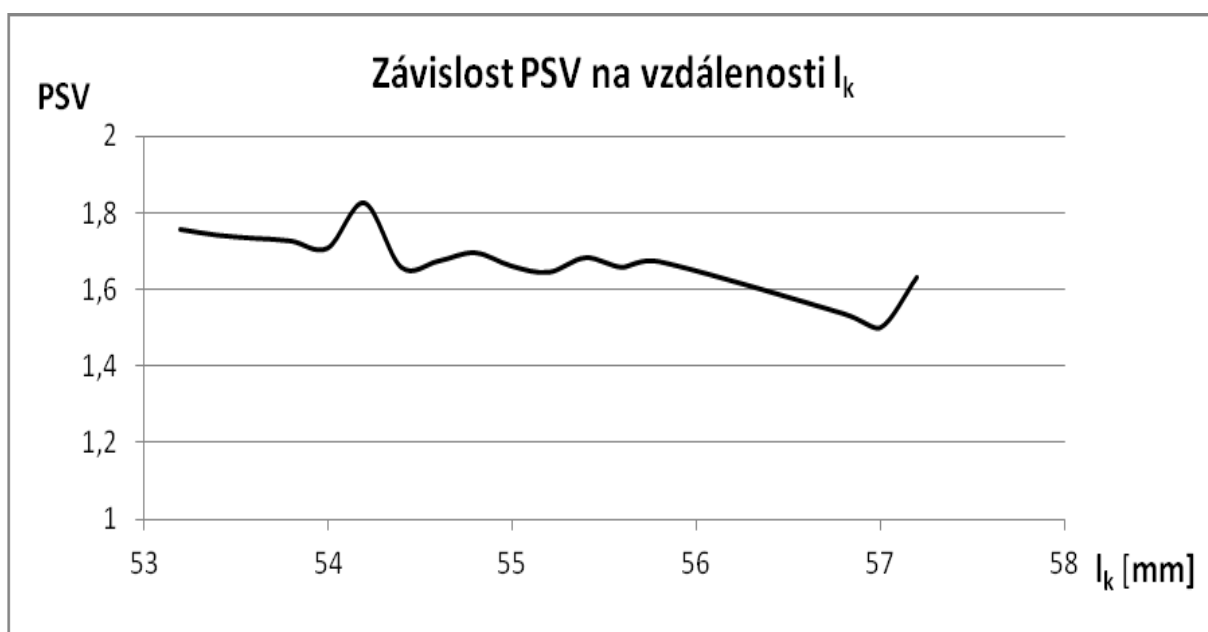
Graf 4.4 Závislost vyzařovacího úhlu na poloměru dielektrika

5 Ověření návrhu simulací

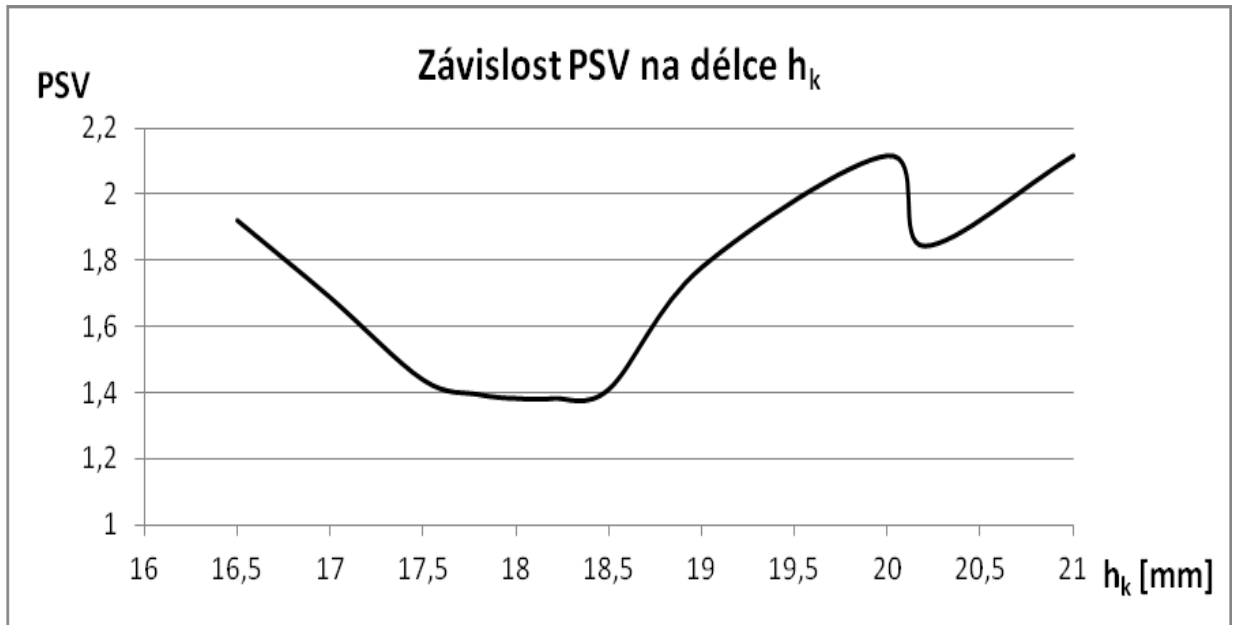
Takto vypočtené rozměry antény a napájení byly ověřeny simulací v programu FEKO. Je třeba dodat, že pro simulaci bylo použito dielektrikum již optimalizovaného tvaru. Ze simulace vyplývá, že teoretické předpoklady pro vlnovod jsou správné. Problém, který simulace ukázala, byl v impedančním přizpůsobení. Hodnota poměru stojatých vln PSV byla rovna 1,976. Tato hodnota nespĺňuje požadovanou hodnotu, která má být menší než 1,85. Z tohoto důvodu je třeba se vrátit k návrhu a pokusit se optimalizovat impedanční přizpůsobení antény. Optimalizace napáječe opět probíhala v programu FEKO postupným měněním rozměrů l_k a h_k .

5.1 Optimalizace napájení

Ačkoliv optimální délka l_k ani hloubka h_k přesně neodpovídají vypočteným hodnotám, jsou to ideální vstupní hodnoty pro následnou optimalizaci. Průběh optimalizace lze vyčíst z grafů 5.1 a 5.2. Při postupném ladění napájení byl sledován poměr stojatých vln PSV. Z grafu 5.1 a 5.2 je vidět, že PSV klesá do $l_k = 57$ mm a $h_k = 18,2$ mm. Tyto hodnoty jsou tedy optimalizovanými a pro tyto hodnoty dosahuje PSV hodnoty 1,48. Tato hodnota již splňuje vstupní požadavek. S takto optimalizovanými hodnotami se anténa vyrobí.



Graf 5.1 Závislost PSV na vzdálenosti napájecího kolíku od zadní stěny vlnovodu



Graf 5.2 Závislost PSV na hloubce zasunutí napájecího kolíku

6 Realizace antény

Pro realizaci vlnovodu byla za materiál zvolena hliníková trubka. Z výpočtu vlnovodu plyne, že požadovaný poloměr je $r = 26$ mm. Tento poloměr je brán jako vnitřní poloměr trubky, jedná se o pevný rozměr, podle kterého se musí vybrat konkrétní trubka. Tloušťka stěny trubky může být libovolná. Tento rozměr má vliv na jiné parametry, které již nesouvisí s funkcí antény. Jedná se hlavně o celkovou hmotnost antény a výrobní cenu. Hmotnost antény tloušťka stěny zásadně neovlivní, hlavní podíl na hmotnosti má použité dielektrikum. Cena při snaze stlačit náklady co nejnižší již může mít svoji váhu. Je tu však ještě jedna konstrukční záležitost, na kterou je třeba myslet již při výběru trubky. A tou je nutnost připevnit konektor napájení na trubku. Pokud se tedy zvolí příliš slabá trubka, bude se muset v místě připojení konektoru navařit destička. Toto řešení má několik nevýhod. První je samotné navaření destičky, kdy vzniká problém dokonale vyvařit místo mezi destičkou a trubkou. Pokud by se to nepodařilo, vzniklo by místo s jinými materiálovými vlastnostmi a mohlo by dojít k zhoršení přenosových parametrů jako je činitel odrazu a vznik stojatého vlnění. Druhá nevýhoda je nárůst nákladů. Jako lepší řešení se tedy jeví použít silnější stěnu trubky a v místě připojení konektoru vyfrézovat nebo vybrousit rovnou plošku. Samotné vyfrézování není v době CNC strojů problém. Přitom není třeba frézovat moc. Zůstane tedy dostatek materiálu pro připevnění konektoru šroubkem.

6.1 Realizace kovového vlnovodu

Realizace kovového vlnovodu má 3 části:

1. Zařízení trubky na požadovaný rozměr.

Z hlediska preciznosti je lepší říznout trubku o něco delší a nechat zarovnat na požadovaný rozměr na soustruhu nebo na fréze.

2. Vyfrézování plošky pro připevnění konektoru.
3. Zavaření dna trubky.

6.2 Realizace dielektrika

Jako dielektrikum byl zvolen polyetylen s $\varepsilon_r = 2,3$. Rozměr podle, kterého je třeba objednat dielektrikum, udává vrchní poloměr trychtýře, ten je $r = 75$ mm. Není ideální, že většinu dielektrika je třeba obrobit, konkrétně z $r = 75$ mm na $r = 26$ mm. Vzniká tak velké množství odpadu a nepříznivě narůstá cena za materiál. Zároveň je to velmi pracné a náročné

na čas, jelikož je třeba brát minimální šponu, aby se polyetylen nepřehřál. Je velmi důležité obrobit polyetylen na správný rozměr, kdy o úspěchu rozhodují desetinky milimetru. Pokud by totiž byl průměr moc silný, nedostaneme dielektrikum do vlnovodu a pokud by bylo moc tenké, ve vlnovodu by nedrželo a vypadávalo by.

Pro výrobu většího počtu antén by bylo dobré vymyslet jiný postup při výrobě dielektrika. Jako jeden možný se jeví objednat dielektrikum na dvě části. Jednu část by tvořilo dielektrikum ve vlnovodu a druhou část dielektrikum vně antény. Polyetylenové tyče se dělají v průměrech po 5 mm, tudíž by se objednala část do vlnovodu s průměrem 55 mm a část na trychtýř s průměrem 150 mm a následně by se tyto dvě části svařily. Udává se, že polyetylen je dobře svařitelný. Pokud by se toto řešení ověřilo jako možné, značně by ušetřilo náklady na výrobu dielektrika.

Postup výroby byl následující:

1. Zarovnání délky v soustruhu
2. Postupné obrobení na požadovaný průměr vlnovodu
3. Obrobení trychtýře

6.3 Realizace napáječe

Konektor pro připojení koaxiálního kabelu byl zvolen typ SMA F PP. Ke konektoru bylo třeba připájet kus měděného drátku, tak aby výsledná délka kolíku byla 21,5 mm. Jak je vidět na obrázku 2.2, tento rozměr vznikl přičtením šířky stěny trubky po vyfrézování plošky, která byla 3,5 mm k optimalizované hloubce zasunutí $h_k = 18$ mm. Samotný kus drátku bylo třeba nejdříve na okraji zbrousit, aby se mohl zasunout do dutinky na kolíku konektoru.

Postup výroby byl následující:

1. Zbroušení drátku na rozměr pro zasunutí do dutinky.
Tento úkon je do značné míry stylem pokus, omyl. Průměr drátku 1,3 mm je nutno zbrousit asi na třetinu.
2. Připájení drátku ke konektoru.
Po zasunutí drátku a připájení je třeba zkontrolovat, zda není drátek mimo osu, případně je třeba drátek přepájet a srovnat.
3. Následně je třeba zbrousit délku drátku na požadovaný celkový rozměr 21,5 mm.
Zaříznutím drátku na požadovaný rozměr před zbroušením a připájením ke konektoru není ideální, jelikož není jisté, zda se povede zbroušení. Jistější je zbrousit délku drátku až po připájení, kdy měříme již celkovou hloubku kolíku.

Bod 1, který je asi nejvíce náročný na preciznost by se dal odstranit použitím tenké měděné trubičky. Potom by se trubička nasunula na kolík konektoru. Zároveň by se tím odstranil problém s vyosením drátku. V tomto případě je potřeba předělat v modelu antény kolík napájení a znovu optimalizovat umístění napájení. Další možností je použití jiného typu konektoru.

6.4 Kompletace antény

Kompletace antény není příliš složitá, je však náročná na přesnost. Dielektrická část musí být v kovovém vlnovodu natěsno. Největší problém je ve vyvrtání otvoru pro napájecí kolík. Je nutná přesně vyměřit střed a správnou délku od zadní stěny. Je přesnější odměřit vzdálenost otvoru od horní hrany vlnovodu. Z důvodu navaření dna vlnovodu by odměřený úsek nemusel být přesný. Vrtání otvoru je nutné vrtat na strojní vrtačce, nikoliv vrtačkou v ruce. Vyvrtaný otvor strojní vrtačkou bude kolmý k vlnovodu a nehrozí tedy nebezpečí šikmého vrtání. Další výhodou je snížení rizika zalomení vrtáku ve vlnovodu. Jelikož je průměr drátku 1,3 mm, vrták je velmi tenký a vrtáním vrtačkou v ruce by se už při mírném ohnutí mohl zlomit. Vyvrtáním správné hloubky zajistilo odměření vrtáku v upínací hlavě. Díru je třeba několikrát protáhnout, aby v ní nezůstaly špony a konektor se zasunul celý. Po zasunutí kolíku do vlnovodu, se vyvrtaly díry pro uchycení konektoru pomocí šroubků.

7 Měření antény

Vyrobená anténa byla odměřena v bezodrazové komoře, kterou má fakulta k dispozici, pro ověření teoretických parametrů získaných programem FEKO. Bezodrazová komora je pro potřeby měření vybavena točnou se stojanem pro měřenou anténu, dalšími typy antén a vektorovým síťovým analyzátozem ZVB8.

Měření antény se skládalo z několika měření:

1. měření impedančního přizpůsobení
 - měření činitele odrazu
 - měření PSV (poměr stojatých vln)
2. měření směrových charakteristik
3. měření zisku
4. měření zisku metodou 3 antén

Nejdříve se změřil činitel odrazu ρ . Před samotným měřením bylo potřeba vektorový síťový analyzátor ZVB8 zkalibrovat. Činitel odrazu udává velikost odraženého signálu, což znamená výkonovou ztrátu. Může se nabývat hodnot od 0 do 1, kdy hodnota 1 značí, že se všechen signál odráží zpět a hodnota 0 naopak, že všechen signál projde do antény, kterou je následně vyzářen. Pokud E_p nazveme postupnou vlnou a E_r vlnou odraženou, potom činitel odrazu $\rho = E_r/E_p$. Velmi často je také udáván v decibelech. Přepočtení na decibely je následovný $\rho = 20 \log(E_r/E_p)$ [dB]. [5]

Dalším měřením bylo měření PSV, program FEKO má jako jeden z výstupů VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), obě tyto značení znamenají to samé. Stojaté vlny vznikají na vedení odrazem signálu od konce vedení a jeho vrácením zpět ke zdroji, kde se vlna odražená sčítá s vlnou postupnou. Poměr stojatých vln PSV pro ztrátové vedení se počítá v místě odrazu z činitele odrazu následujícím způsobem $PSV = (1 + \rho)/(1 - \rho)$. Z výpočtu lze vypočítat, že PSV může nabýt hodnot od 1 do ∞ , kde hodnota ∞ značí, že se všechen signál odráží zpět a hodnota 1, že naopak všechen signál projde do antény a nedochází k žádnému odrazu a tedy ani vzniku stojatých vln. [6]

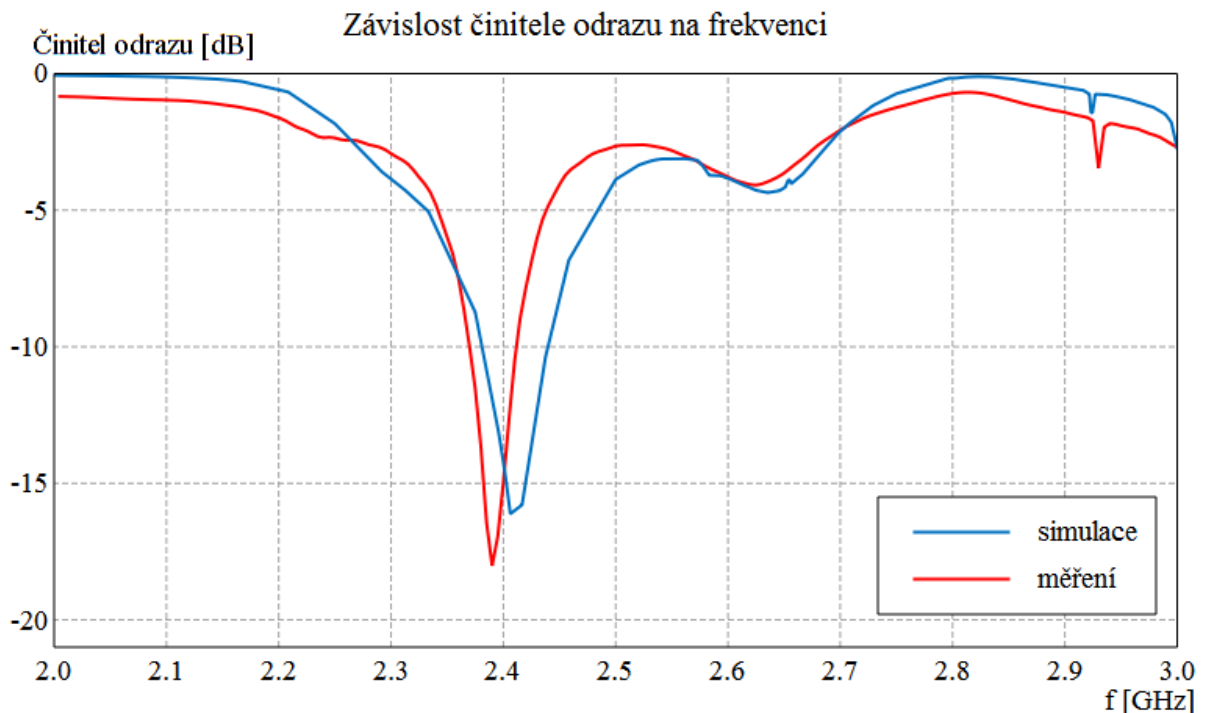
Měření směrových charakteristik se provádí v bezodrazové komoře, kde se připevní měřená anténa na točnu před ozařovací anténu, do stejné výšky s nulovým azimutem. Měření se většinou provádí ve dvou rovinách E a H. Při měření se měřená anténa postupně otáčí a

ozařuje měřenou anténou. Jelikož bezodrazová komora není dokonale bezodrazová, provádí se měření v konkrétních časových úsecích, kdy na anténu dopadá signál, ale ještě se nestihne odrazit od zadní stěny. Výstupem tohoto měření jsou dvě směrové charakteristiky v rovině E a v rovině H. [7]

Zisk antény lze měřit dvěma způsoby, první způsob měření je porovnáním s normálem, anténou kalibrovanou na určitý zisk. Pokud není k dispozici anténa s přesně známým ziskem, lze měřit zisk pomocí vzájemného měření tří antén, kdy se změří přenosy mezi anténami. Měřením se získají tři rovnice o třech neznámých, z kterých se dopočte zisk měřené antény. [7]

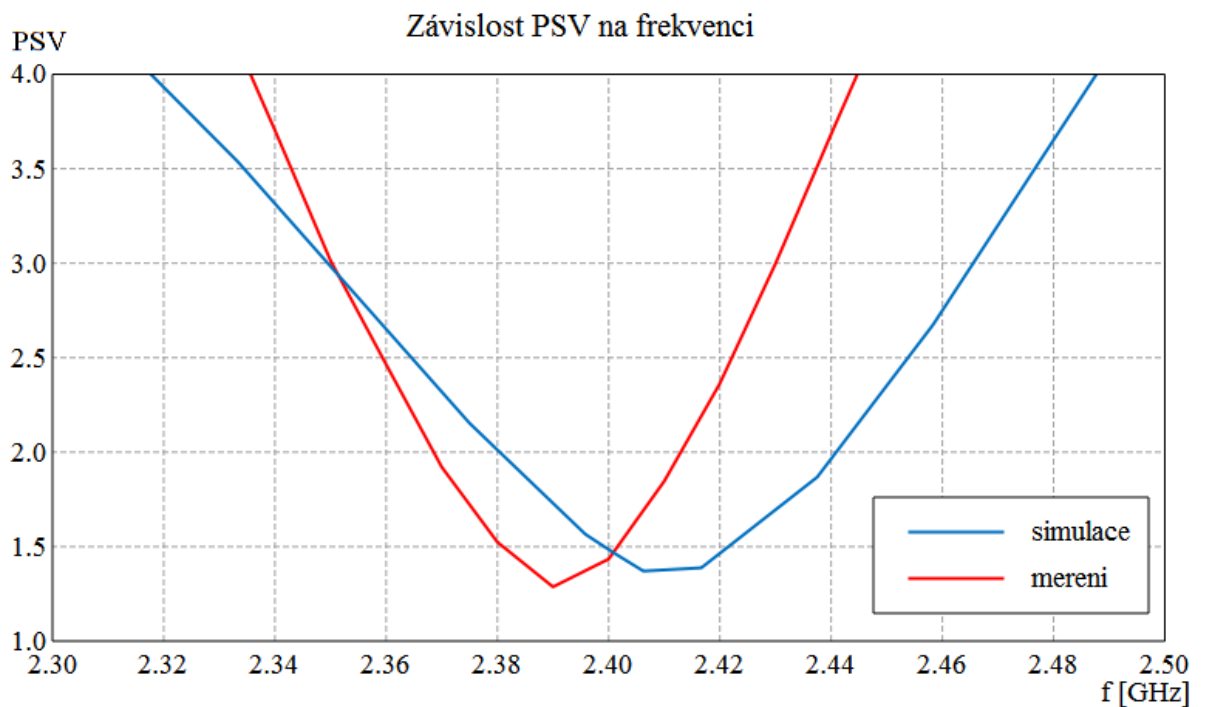
7.1 Porovnání simulace s měřením

Prvním měřeným parametrem byl činitel odrazu ρ . Výsledek je vidět na obrázku 7.1. Cílem bylo navrhnout anténu s činitelem odrazu $\rho \leq -10$ dB, jak je vidět, tento cíl byl splněn. Měřením zjištěná hodnota činitele odrazu ρ je menší než -10 dB pro pásmo $\Delta f = 2,37 \div 2,41$ GHz, simulací zjištěné pásmo je $\Delta f = 2,38 \div 2,44$ GHz. Tento rozdíl je pravděpodobně způsobený nepatrně odlišnou hodnotou relativní permitivity použitého dielektrika. Pro frekvenci 2,4 GHz nabývá hodnoty $\rho = -14,5$ dB, tato hodnota je shodná se simulovanou.



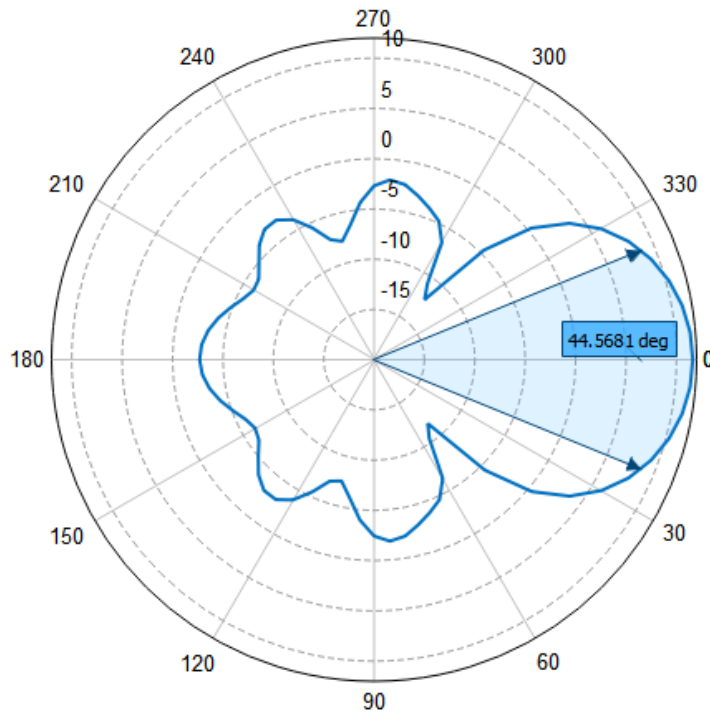
Obr. 7.1 Porovnání činitele odrazu na frekvenci

Dalším měřením bylo měření poměru stojatých vln PSV. Výsledek je znázorněn na obrázku 7.2. Z obrázku je vidět, že naměřená i simulovaná hodnota PSV pro frekvenci 2,4 GHz je menší než 1,5, cílem bylo navrhnout anténu, tak aby byl poměr stojatých vln menší než 1,85. Konkrétně je naměřená hodnota PSV = 1,45 a simulovaná hodnota je PSV = 1,48. Měřením zjištěná hodnota PSV je menší než 1,85 pro pásmo $\Delta f = 2,37 \div 2,41$ GHz, simulací zjištěné pásmo je $\Delta f = 2,38 \div 2,44$ GHz. Pásmo je shodné jako pro činitel zkreslení, to je dáno tím, že PSV vychází z činitele odrazu.

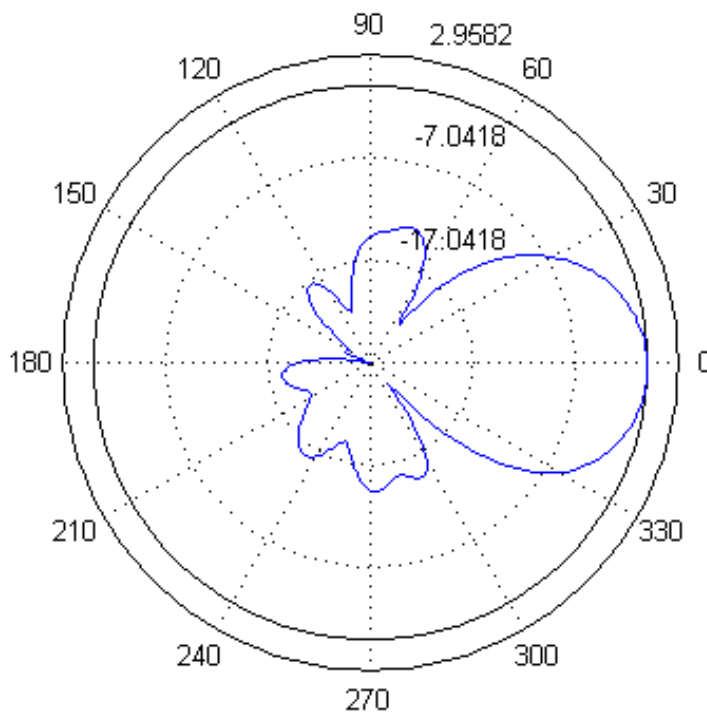


Obr. 7.2 Porovnání PSV na frekvenci

Při měření směrových charakteristik se sledovala šířka svazku hlavního laloku pro pokles na poloviční výkon. Ve směrové charakteristice je to úhel mezi dvěma body pro pokles o 3 dB. Směrová charakteristika pro rovinu E je ze simulace vidět na obrázku 7.3 a na obrázku 7.4 je vidět její ověření měřením. Jak je vidět na obrázku 7.3 a 7.4, ze simulace vyšel úhel $44,57^\circ$ a při měření 45° . Šířky svazků jsou si tedy rovny. Pokud budeme sledovat potlačení zpětného příjmu, potom se při měření dosáhne lepší hodnoty potlačení 20,23 dB oproti původním 14,61 dB ze simulace. Potlačení vedlejších svazků vyšlo opět téměř stejné 13,49 dB při simulaci a 13,33 při měření. Může se tedy konstatovat, že změřená směrová charakteristika odpovídá směrové charakteristice získané ze simulace.



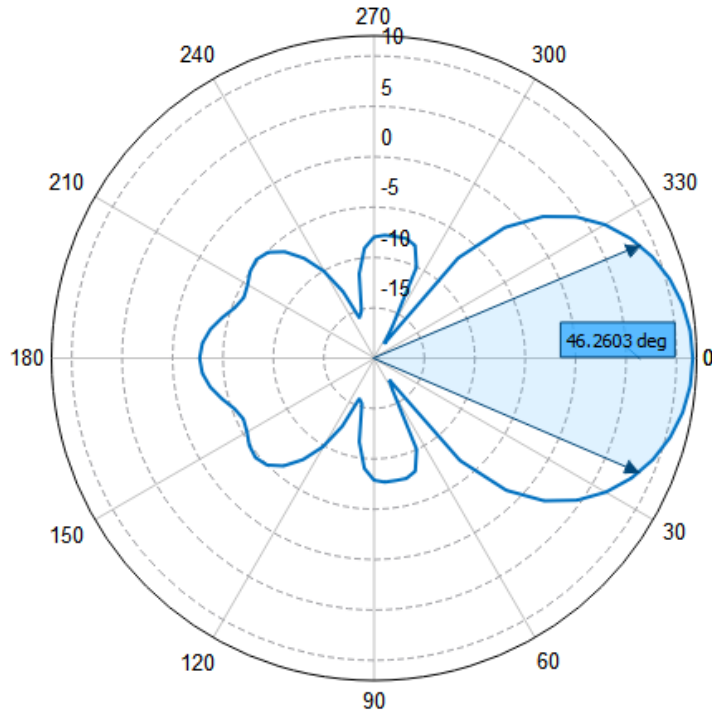
Obr. 7.3 Směrová charakteristika v rovině E – simulace



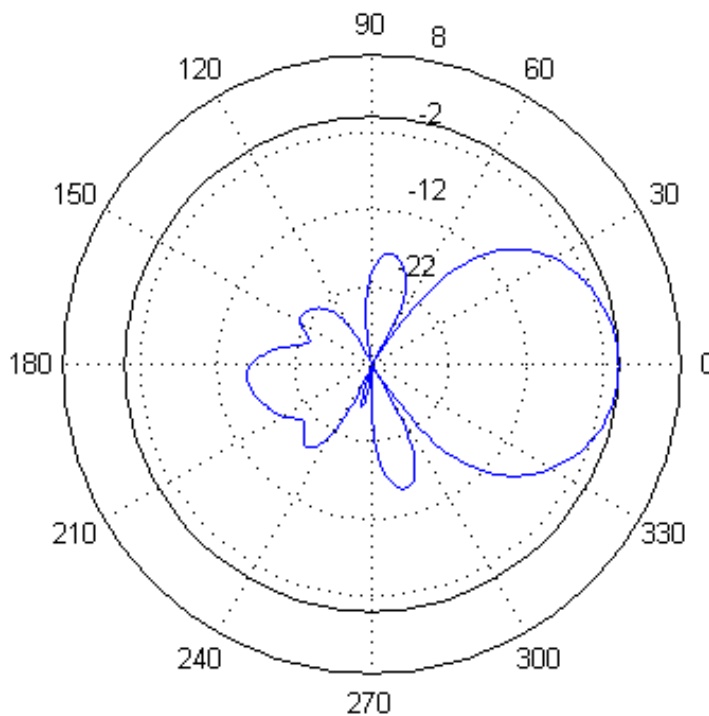
Obr.7.4 Směrová charakteristika v rovině E – měření

Druhá zobrazená rovina je rovina H. Směrová charakteristika pro rovinu H je ze simulace vidět na obrázku 7.5 a na obrázku 7.6 je vidět její ověření měřením. Jak je vidět na obrázku 7.5 a 7.6, ze simulace vyšel úhel $46,26^\circ$ a při měření 48° . Šířky svazků jsou si tedy téměř rovny. Pokud budeme sledovat potlačení zpětného příjmu, potom se při měření dosáhlo lepší

hodnoty potlačení 16,28 dB oproti původním 14,61 dB ze simulace. Potlačení vedlejších svazků vyšlo 19,31 dB při simulaci a 15,37 dB při měření. Může se tedy opět konstatovat, že změřená směrová charakteristika odpovídá směrové charakteristice získané ze simulace.

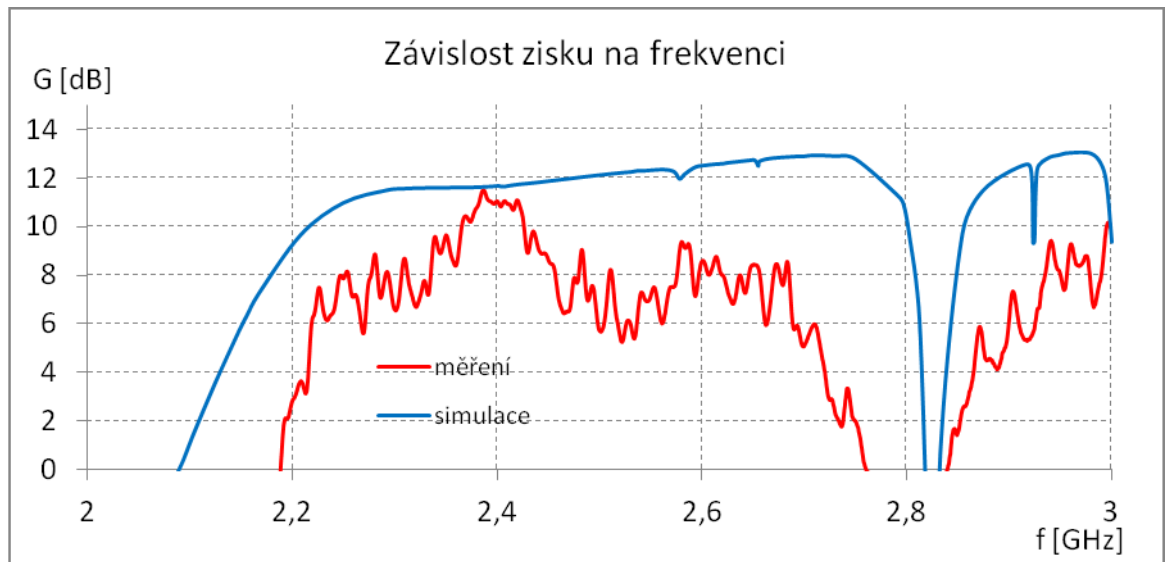


Obr. 7.5. Směrová charakteristika v rovině H – simulace



Obr. 7.6 Směrová charakteristika v rovině H – měření

Cílem bylo vytvořit anténu se ziskem $G \geq 10$ dB. Z obrázku 7.7 je vidět, že i tento požadavek byl splněn. Konkrétně naměřená hodnota $G = 11,5$ dB a simulovaná hodnota je $G = 11,7$ dB. Měřením zjištěná hodnota zisku je vyšší než 10 dB pro pásmo $\Delta f = 2,34 \div 2,43$ GHz.



Obr. 7.7 Závislost maximálního výkonového zisku na frekvenci

8 Závěr

V této práci jsem se zabýval návrhem kompaktní tyčové antény s využitím dielektrik. Při návrhu jsem vycházel z teorie šíření vln ve vlnovodech. Po analytickém výpočtu rozměrů antény jsem přešel k simulaci antény v programu FEKO. Tato simulace ukázala, že výpočty umístění napájení a délky napájecího kolíku jsou nepřesné a je nutná jejich optimalizace pro lepší impedanční přizpůsobení antény. Optimalizací umístění napájení a délky napájecího kolíku se dosáhlo lepšího impedančního přizpůsobení.

Po vyrobení antény následovalo měření, které mělo ověřit výsledky získané simulací a správnost postupu realizace antény. Směrové charakteristiky antény odpovídají simulaci, zisk na frekvenci 2,4 GHz dosahuje nejvyšší hodnoty a hodnota také odpovídá simulaci. Impedanční přizpůsobení antény se podařilo optimalizovat a dosáhnout tak lepší hodnoty činitele odrazu a poměru stojatých vln. Díky tomu byly splněny poslední požadavky na anténu, které byly stanoveny před začátkem návrhu. Mírným nedostatkem je, že se nepodařilo vyladit hodnoty činitele zkreslení a poměru stojatých vln na minimum právě pro zvolenou frekvenci 2,4 GHz. Průběhy jsou navíc mezi sebou posunuty, což může být způsobeno nepatrně odlišnou hodnotou relativní permitivity použitého dielektrika. Pro odstranění tohoto nedostatku by bylo nutné předem změřit hodnotu relativní permitivity použitého dielektrika.

Jedním z cílů této práce, bylo ověření možnosti použití dielektrika jako konstrukčního prvku, který bude tvarovat vyzářený signál do prostoru. Výsledkem je, že dielektrikum opravdu může fungovat jako prvek, který tvaruje vyzařování vlny do prostoru.

Použití dielektrika má však své výhody i nevýhody. Pro neoptimalizovaný tvar může zhoršit vyzařovací vlastnosti antény a to podstatně. Další nevýhodou dielektrika je jeho pořizovací cena, která zvyšuje celkovou cenu antény.

Dielektrikum má však i své výhody. Při použití optimalizovaného tvaru, se dosáhne lepších vyzařovacích vlastností, kterých by se jinak nedosáhlo. Při poloměru dielektrika 75mm dosahuje anténa nejlepších vyzařovacích parametrů. Tato anténa je ovšem značně finančně nákladná oproti jiným anténám na trhu. Pro snížení nákladů, je možné použít menší poloměr dielektrika. Jak je vidět z grafu 4.3 od poloměru 55 mm se již vyzařovací parametry antény téměř nezlepšují a tento rozměr se jeví jako nejlepší z hlediska cena/výkon. Pro porovnání, cena metrové tyče PE s poloměrem 55 mm se pohybuje kolem 3000 Kč, zatímco s poloměrem 75 mm stojí kolem 5500 Kč.

Použití takto koncipovaných antén vidím především ve vyšších frekvencích, kde jsou ceny antén vyšší. Při zvyšující se frekvenci se zároveň zmenšují rozměry antény a díky tomu se zmenší i průměr použitého dielektrika, tím opět klesne pořizovací cena.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] NOVOTNÝ, Karel. Teorie elektromagnetického pole II. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-01554-8
- [2] RAIDA, Zbyněk. Multimediální učebnice – Vlnovody. [online]. Brno, 2010 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z:
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/cz/3-1-A.pdf>
- [3] ŠIKL, Tomáš. Modelování dielektrických vlnovodů. [online]. Brno, 2009 [cit. 2014-4-1]. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/2917/Sikl_Tomas_BP_Modelovani_dielektricky_vlnovodu.pdf. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ing. Michal POKORNÝ
- [4] WADE, Paul. Rectangular Waveguide to Coax Transition Design. w1ghz.org [online]. ©2006. Dostupné z:
http://www.w1ghz.org/QEX/Rectangular_Waveguide_to_Coax_Transition_Design.pdf
- [5] VRBA, Jan. Úvod do mikrovlnné techniky. Praha: České vysoké učení technické, 2007. ISBN 978-80-01-03670-9
- [6] DUssoft computers. Konstrukce SWR-metru. dusoft.cz [online]. ©2009-2012. [cit.2014-05-20]. Dostupné z:
<http://www.dusoft.cz/PMR/SWR/SWR.htm>
- [7] MAZÁNEK M., P. PECHÁČ. Šíření elektromagnetických vln a antény. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03032-5