



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## TRYCHTÝŘOVÁ HŘEBENOVÁ ANTÉNA PRO MĚŘENÍ EMC

DOUBLE-RIDGE WAVEGUIDE HORN ANTENNA FOR EMC MEASUREMENTS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Martincová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Mikulášek, Ph.D.

BRNO 2018



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**  
Ústav radioelektroniky

**Studentka:** Bc. Kateřina Martincová

**ID:** 164608

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Trychtýřová hřebenová anténa pro měření EMC

#### POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznamte s funkcí trychtýřových hřebenových antén využívaných pro měření elektromagnetické kompatibility. Pro pásmo 800 MHz až 10 GHz navrhnete a modelujete trychtýřovou hřebenovou anténu pomocí elektromagnetického simulátoru. Zaměřte se získání optimálního impedančního přizpůsobení na vstupu antény a na maximální potlačení bočních laloků směrové charakteristiky. Interpretujte dosažené výsledky a zhodnoťte využití této antény pro měření EMC.

Navrženou anténu vyrobte ve dvou vyhotoveních. Změřte vlastnosti vyrobených antén a diskutujte dosažené výsledky s výsledky získanými modelováním antény na počítači.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MILIGAN, T.A. Modern Antenna Design. New Jersey: John Willey & Sons, 2005.
- [2] MACNAMARA, T. Handbook of antennas for EMC. Boston: Artech House, 1995.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 17.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Mikulášek, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem a následnou realizací hřebenové trychtýřové antény pro měření elektromagnetické kompatibility. Nejprve se zaměřuje na obecnou teorii antén, poté se více soustředí na trychtýřové antény a jejich návrh. Druhá část se zabývá popisem výroby antény a srovnáním simulovaných výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Anténa, vlnovod, vlnovod H, trychtýřová anténa, hřebenová trychtýřová anténa, EMC měření

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the design and realization of a horn antenna for electromagnetic compatibility measurement. First it focuses on general theory of antennas, than it focuses more on horn antennas and their design. Second part deals with description of antenna realization and comparison of simulated results.

## **KEYWORDS**

Antenna, waveguide, H waveguide, horn antenna, ridged horn antenna, EMC measurement

MARTINCOVÁ, K. Trychtýřová hřebenová anténa pro měření EMC. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Mikulášek, Ph.D..

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Trychtýřová hřebenová anténa pro měření EMC jsem vypracovala 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 neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma 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: **17. května 2018**

.....

(podpis autora)

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Mikuláškov, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.*

**V Brně dne: 17. května 2018**

.....  
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

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>ix</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teorie antén</b>	<b>2</b>
1.1 Základní parametry antén .....	4
1.2 Vlnovody a teorie šíření vlny ve vlnovodu.....	7
1.3 Trychtýřové antény .....	10
1.3.1 Typy trychtýřů .....	10
1.3.2 Trychtýřová hřebenová anténa.....	11
<b>2 Rozbor návrhu trychtýřové antény</b>	<b>13</b>
2.1 Návrh vlnovodu .....	13
2.2 Návrh přechodu koaxiální vedení – vlnovod „H“ .....	15
2.3 Návrh trychtýře .....	16
<b>3 Návrh antény pro pásmo 0,8 – 10 GHz</b>	<b>19</b>
3.1 Výpočet vlnovodu.....	19
3.2 Výpočet přechodu koaxiální vedení – vlnovod „H“.....	20
3.3 Výpočet trychtýře .....	20
3.4 Výsledky simulace základní struktury .....	21
<b>4 Modifikace antény</b>	<b>28</b>
4.1 Konečná struktura antény .....	30
<b>5 Výroba antény</b>	<b>37</b>
5.1 Vliv nepřesnosti rozměrů na parametry antény .....	39
<b>6 Srovnání výsledků</b>	<b>42</b>
<b>Závěr</b>	<b>46</b>
<b>Literatura</b>	<b>47</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>48</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Anténa a princip šíření [1].....	2
Obrázek 2: Náhradní schéma anténního vedení [1].....	3
Obrázek 3: Směrová charakteristika [3] .....	4
Obrázek 4: Osový poměr .....	6
Obrázek 5: Šířka pásma [3] .....	6
Obrázek 6: Vlnovod obdélníkového, kruhového a průřezu typu H.....	8
Obrázek 7: Obdélníkový vlnovod [11] .....	8
Obrázek 8: Šíření vlny ve vlnovodu [4].....	9
Obrázek 9: Rozložení pole pro různé vidy TE ve vlnovodu obdélníkového tvaru [5].....	9
Obrázek 10: Trychtýřová anténa.....	10
Obrázek 11: Typy trychtýřů [1] .....	11
Obrázek 12: Anténa se dvěma a čtyřmi hřebeny [7, 8] .....	12
Obrázek 13: Návrh obdélníkového vlnovodu .....	14
Obrázek 14: Návrh vlnovodu průřezu "H" .....	15
Obrázek 15: Napájení pomocí koaxiální sondy .....	15
Obrázek 16: Napájecí část se zkosenými díly .....	16
Obrázek 17: Přejechod koaxiální vedení - vlnovod H.....	16
Obrázek 18: Tabulka hodnot PELe [3] .....	17
Obrázek 19: Geometrie trychtýře antény [3] .....	18
Obrázek 20: Rozložení elektrického pole v obdélníkovém vlnovodu a vlnovodu H.....	19
Obrázek 21: Návrh rezonanční štěrbině .....	20
Obrázek 22: Základní struktura antény.....	23
Obrázek 23: Činitel odrazu na vstupu základní struktury antény .....	23
Obrázek 24: PSV základní struktury antény .....	24
Obrázek 25: Vyzařovací diagramy v rovině E základní struktury.....	25
Obrázek 26: Vyzařovací diagramy v rovině H základní struktury .....	26
Obrázek 27: Zisk antény základní struktury .....	27
Obrázek 28: Struktura antény bez bočních stěn trychtýře .....	28
Obrázek 29: Struktura antény se zaoblenými rohy .....	29
Obrázek 30: Srovnání S11 antény bez bočních stěn a s kulatými rohy .....	29

Obrázek 31: Srovnání zisku struktury bez bočnic a se zakulacenými rohy.....	30
Obrázek 32: Výsledná struktura antény.....	30
Obrázek 33: Příčný řez anténou.....	31
Obrázek 34: Činitel odrazu výsledné struktury antény.....	33
Obrázek 35: Poměr stojatých vln výsledné struktury.....	33
Obrázek 36: Závislost zisku na frekvenci výsledné struktury antény.....	34
Obrázek 37: Směrové charakteristiky v rovině E výsledné struktury antény.....	35
Obrázek 38: Směrové charakteristiky v rovině H výsledné struktury antény.....	36
Obrázek 39: Zasunutí koaxiální sondy do hřebenů.....	37
Obrázek 40: Horní část trychtýře s vlnovodem.....	38
Obrázek 41: Propojení zadní části antény.....	38
Obrázek 42: Podélný řez zadní částí antény (horní pohled).....	39
Obrázek 43: Vliv změny parametru H.....	39
Obrázek 44: Vliv změny parametru $b_2$ .....	40
Obrázek 45: Vliv změny parametru $d$ .....	40
Obrázek 46: Vliv změny parametru $poz\_koax$ .....	41
Obrázek 47: Trychtýř se stěnou vlnovodu.....	42
Obrázek 48: Vyrobený hřeben.....	43
Obrázek 49: Ohnutý trychtýř s přiloženým hřebenem.....	43
Obrázek 50: Srovnání S11 pro Time domain solver a Frequency domain solver.....	44
Obrázek 51: Srovnání PSV pro Time domain solver a Frequency domain solver.....	45
Obrázek 52: Srovnání zisku pro Time domain solver a Frequency domain solver.....	45

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Kmitočtová pásma [2] .....	3
Tabulka 2: Rozměry hřebene .....	21
Tabulka 3: Hodnoty parametrů základní struktury antény .....	22
Tabulka 4: Zisk antény základní struktury pro dané kmitočty .....	27
Tabulka 5: Konečné hodnoty parametrů antény .....	32

# ÚVOD

Cílem této práce je navrhnout anténu pro EMC měření. Anténa by měla pracovat v kmitočtovém pásmu od frekvence 800 MHz do 10 GHz. Pro návrh byla zvolena hřebenová trychtýřová anténa a to z několika důvodů. Jedná se o široký frekvenční rozsah a tento typ antény je velmi širokopásmový. Dalším důvodem je výkonové zatížení antény a v neposlední řadě také robustnost konstrukce.

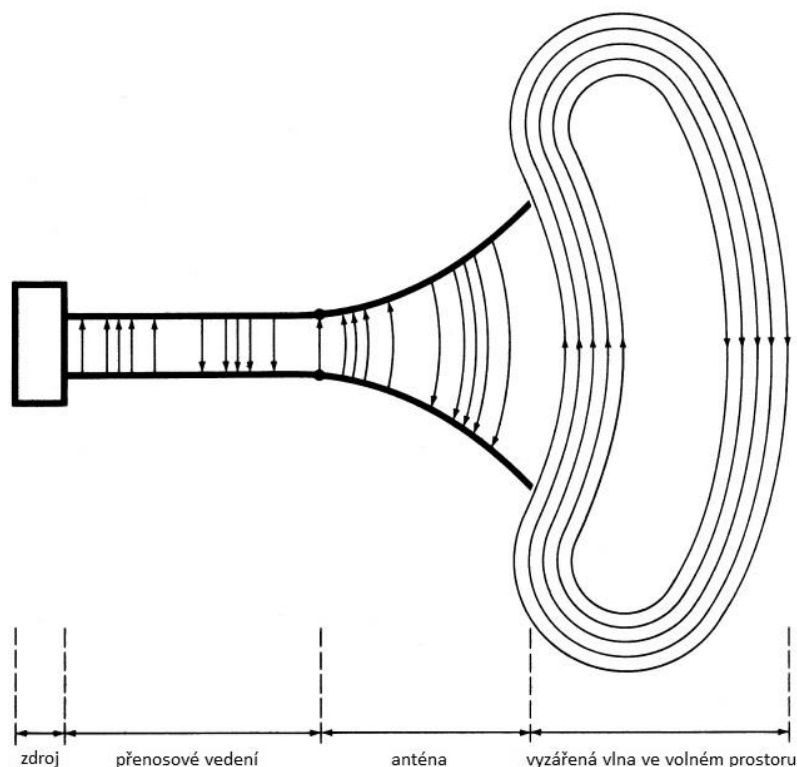
Práce je rozdělena do několika kapitol. První kapitola se zabývá teorií antén. Nejdříve popisuje obecně antény a jejich parametry, poté se zaměřuje na vlnovody a jakým způsobem se v nich šíří vlny a nakonec se zabývá trychtýřovými anténami. Následující kapitola se teoreticky zaměřuje na návrh dané antény. Ve třetí kapitole už se daná anténa prakticky navrhuje. Popisuje návrh vlnovodu, přechodu z koaxiálního vedení na vlnovod, trychtýře a hřebenů. V následující kapitole jsou uvedeny jednotlivé modifikace antény, které byly použity při návrhu. Pátá kapitola rozebírá postup při výrobě antény. Poslední kapitola se zabývá srovnáním výsledných parametrů získaných simulacemi antény různými elektromagnetickými řešiči.

# 1 TEORIE ANTÉN

V následující kapitole bude nejdříve obecně popsána anténa, její parametry a bude stručně vysvětlena teorie šíření vlny. Poté se text bude více zaměřovat na konkrétní typ antén a to trychtýřové antény, druhy trychtýřových antén a jejich modifikace, jejich vlastnosti a využití.

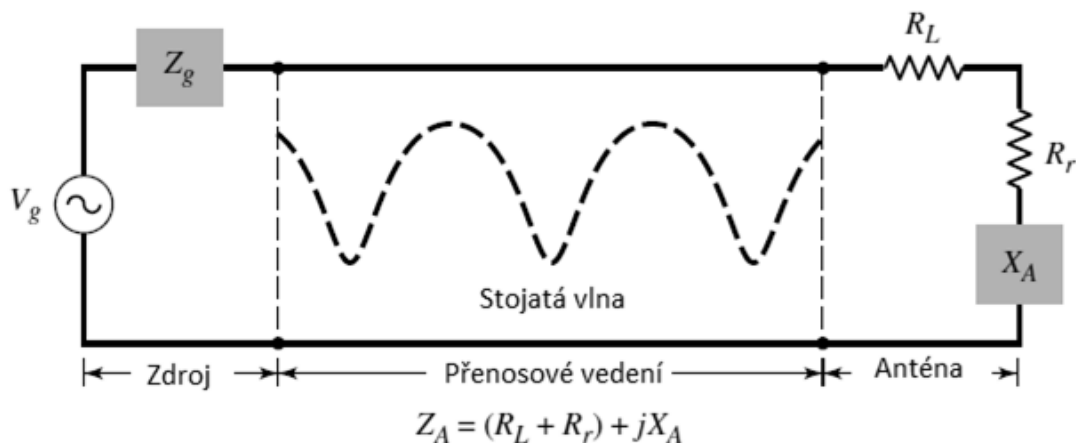
Anténa je přechodová struktura mezi vedením a volným prostorem. Je to zařízení, které je schopné vyzařovat a přijímat rádiové vlny. Podle toho, jestli anténa rádiové vlny přijímá nebo vyzařuje je lze rozdělit na přijímací a vysílací antény. Jejich vlastnosti bývají ale kvůli dodržení principu recipacity stejné.

Na obrázku 1 lze vidět strukturu obecné antény, která se skládá z několika částí: zdroje, přenosového vedení a antény. Signály z radiofrekvenčního vysílače jsou pomocí přenosového vedení přivedeny až k anténě, která je vysílá jako elektromagnetické vlny do volného prostoru.



Obrázek 1: Anténa a princip šíření [1]

Přenosové vedení antény lze také nahradit následujícím obvodem, který je znázorněn na obrázku Obrázek 2. Zdroj je nahrazen ideálním generátorem, přenosové vedení je nahrazeno vedením o charakteristické impedanci  $Z_C$  a anténa je reprezentována zátěží  $Z_A$ . Vstupní impedanci  $Z_A$  lze charakterizovat následujícími parametry:  $R_L$  představuje vodivé a dielektrické ztráty způsobené konstrukcí antény,  $R_r$  znázorňuje ztráty způsobené vyzařováním antény a  $X_A$  se používá k představě imaginární části impedance spojené s vyzařováním antény [1].



Obrázek 2: Náhradní schéma anténního vedení [1]

Existují různé druhy antén, které lze různě dělit do skupin. První způsob členění antén je podle typu konstrukce, příkladem mohou být antény drátové, mikropáskové, reflektorové nebo antény aperturové. Dále je možné antény rozdělit na širokopásmové nebo úzkopásmové podle toho, jakou mají šířku pracovního pásma. V neposlední řadě lze také rozlišit antény podle typu vyzařovací charakteristiky. Antény mohou být navrženy tak, aby vysílaly a přijímaly radiové vlny ve všech směrech stejně, pak se jedná o všesměrové antény. Antény také mohou přijímat a vysílat radiové vlny přednostně v určitém směru, pak se jedná o směrové antény.

Pro různě velké vlny jsou typické různé druhy antén. Trychtýřové antény, o kterých pojednává tato práce, jsou typicky používané na kmitočtech v řádu jednotek a desítek GHz. Přehled kmitočtových pásem a jednotlivých zástupců je uveden v tabulce 1.

Tabulka 1: Kmitočtová pásma [2]

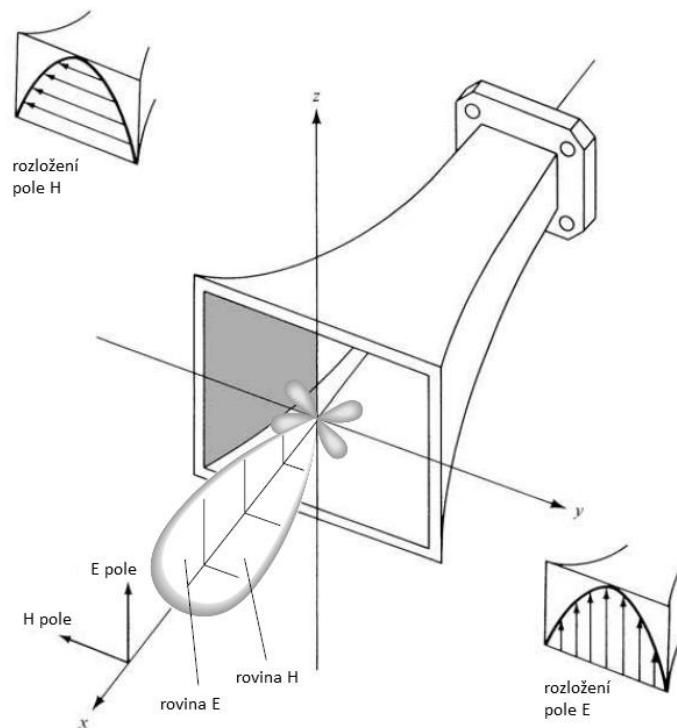
Kmitočtový rozsah	Vlnová délka	Označení	Antény
3-30 kHz	100-10 km	VLF	Drátové antény
30-300 kHz	10-1 km	LF	Magnetické smyčkové antény
300-3000 kHz	1000-100 m	MF	Smyčkové, dipólové antény
3-30 MHz	100-10 m	HF	Logaritmicko-periodické antény, vertikální prutové antény
30-300 MHz	10-1 m	VHF	Prutové, Yagiho antény
300-3000 MHz	100-10 cm	UHF	Yagiho, patch antény
3-30 GHz	10-1 cm	SHF	Parabolické, trychtýřové, patch a štěrbinové antény
30-300 GHz	10-1 mm	EHF	Parabolické, trychtýřové, štěrbinové antény

## 1.1 Základní parametry antén

Existují různé parametry, jakými lze charakterizovat anténu. Tyto parametry jsou nezbytné pro popis vlastností antén. V této kapitole jsou uvedeny základní z těchto parametrů.

### *Vyzařovací charakteristika*

Vyzařovací charakteristika je definována jako matematická funkce nebo grafická reprezentace směrových vlastností antény vztahované k souřadnicím v prostoru (obrázek 3). Vyzařovací charakteristika popisuje důležité vlastnosti antény jako je hustota toku energie, intenzita záření, intenzita pole, směrovost, fáze nebo polarizaci.



Obrázek 3: Směrová charakteristika [3]

Jednotlivé části vyzařovací charakteristiky jsou označovány jako laloky. Lalok je část záření, které je ohraničené oblastmi relativně slabé intenzity záření. Lze je rozdělit na hlavní a vedlejší, které mohou být také rozděleny na boční a zadní laloky. Hlavní lalok označuje směr obsahující maximum záření. Boční lalok je kterýkoliv jiný než hlavní lalok. Zadní lalok směřuje opačným směrem než hlavní lalok, svírá tedy s hlavním lalokem úhel přesně  $180^\circ$ . Boční laloky obvykle představují záření v nežádoucím směru, je tedy úkolem je minimalizovat.

Vyzařovací charakteristika může být znázorněna v trojrozměrném grafu, častěji se ale znázorňuje ve 2D v hlavních rovinách E a H, jelikož dvojrozměrné zobrazení je lepší pro představu velikosti vyzařovací charakteristiky a jejich laloků.

### *Směrnost*

Směrnost je definována jako poměr intenzity vyzařování  $U$  v daném směru k intenzitě vyzařování referenční antény  $U_0$ . Pokud není dán směr vyzařování, uvažuje se ten směr, ve kterém je maximum intenzity záření. Jako referenční anténa se obvykle používá izotropní zářič, elementární dipól nebo půlvlnný dipól.

Místo počítání přesné hodnoty směrnosti se častěji využívá vyjádření pomocí směrové charakteristiky, která popisuje vlastnosti antény v různých směrech.

### *Zisk*

Zisk je dán poměrem výkonu na vstupu bezztrátové referenční antény ku výkonu na vstupu dané reálné antény za podmínky, že intenzita vyzařování obou antén je v daném směru a vzdálenosti shodná. Zisk lze vypočítat ze směrnosti a účinnosti antény.

$$G = \eta D, \quad (1.1)$$

kde  $\eta$  značí účinnost a  $D$  je směrnost dané antény. Zisk se obvykle udává v decibelech. Podle toho, k jakému referenčnímu zářiči je vztažen, rozlišujeme zisk izotropický (používají se jednotky dBi) a zisk vztažený k půlvlnnému dipólu (používají se jednotky dBd).

Mezi faktory ovlivňující zisk patří například impedanční přizpůsobení antény nebo materiálové ztráty antény.

### *Účinnost*

Celková účinnost antény bere v potaz ztráty na vstupu antény a ztráty uvnitř antény.

$$\eta = \eta_r \eta_c \eta_d \quad (1.2)$$

V předchozí rovnici označuje první člen účinnost vlivem nepřizpůsobení antény k napájení, druhý člen účinnost vlivem konečné vodivosti a třetí člen účinnost vlivem ztrát v dielektriku.

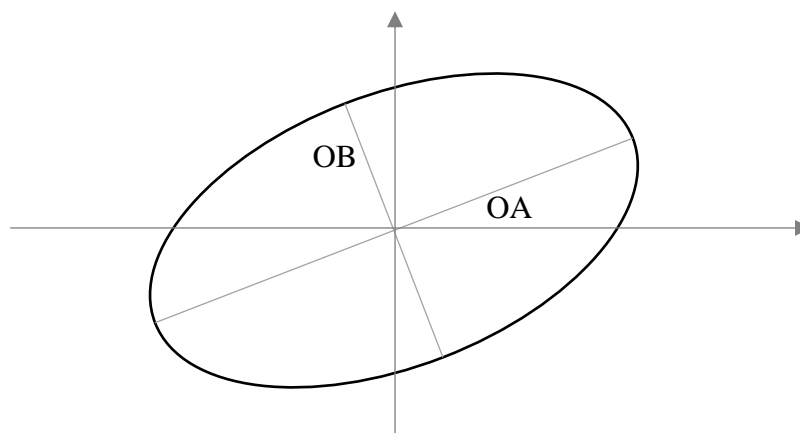
### *Polarizace*

Polarizace vyzářené vlny definuje polarizační vlastnosti antény v daném směru. Při určení typu polarizace je nutné promítnout koncový bod vektoru intenzity elektrického pole do roviny kolmé na směr šíření. Rozlišujeme tři typy polarizace: kruhovou, eliptickou a lineární. Typ polarizace lze určit pomocí osového poměru, který je dán následující rovnicí.

$$AR = \frac{OA}{OB} \quad (1.3)$$

Kde  $OA$  je délka hlavní osy a  $OB$  délka osy vedlejší (obrázek 4).



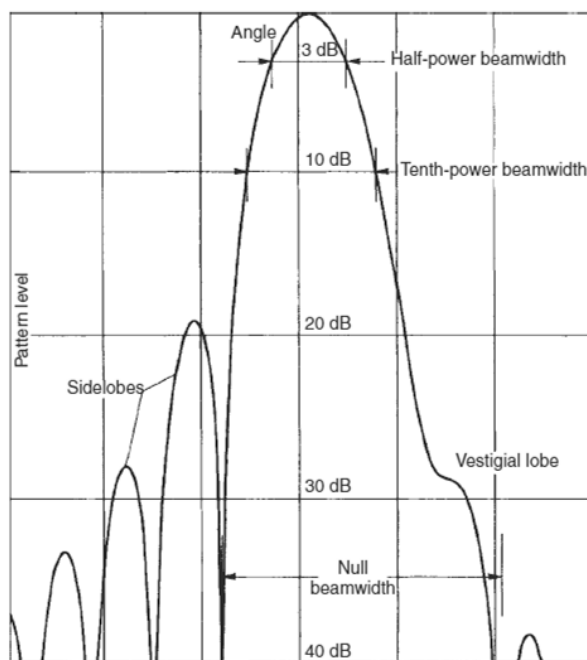


Obrázek 4: Osový poměr

Pokud je osový poměr roven 1, osy jsou stejně dlouhé a tudíž se jedná o kruhovou polarizaci.

### Šířka pásma

Se směrovou charakteristikou je spojen také pojem šířka pásma. Šířka pásma je dána frekvenčním intervalem, ve kterém anténa splňuje požadované vlastnosti. U širokopásmových antén je šířka pásma dána poměrem vrchní ke spodní frekvenci (např. 10:1 udává, že horní frekvence je desetkrát větší než spodní). U úzkopásmových antén jako procentuální odstup od střední frekvence. Obvykle udávaná šířka pásma je ta, kdy poklesne výkon dané antény na polovinu (tedy o 3 dB) oproti centrální frekvenci (tzv. HPBW), což lze vidět na obrázku 5.



Obrázek 5: Šířka pásma [3]

### *Impedance antény*

Impedance antény je dána poměrem napětí a proudu v daném místě antény. Nejčastěji je udávána vstupní impedance antény, tedy impedance v místě připojení antény na napáječ.

### *Impedanční přizpůsobení*

Impedanční přizpůsobení je stav, kdy je impedance antény shodná s impedancí zdroje. Impedanční přizpůsobení je nezbytné pro správnou funkci antény, protože tak nedochází k odrazům vlny zpět ke zdroji.

### *Činitel odrazu*

Činitel odrazu je dán poměrem napětí (na konci vedení) odražené vlny k napětí (na konci vedení) dopadající vlny.

### *Poměr stojatých vln (PSV)*

Poměr stojatých vln je dán poměrem napětí v maximumu ku napětí v minimumu stojaté vlny na vedení (platné jen pro bezztrátové vedení). Poměr stojatých vln lze také určit pomocí činitele odrazu:

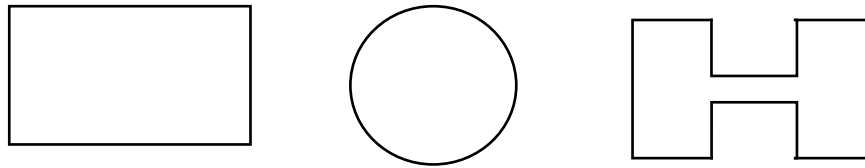
$$PSV = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (1.4)$$

V případě ideálního impedančního přizpůsobení je poměr stojatých vln roven 1. Za velmi dobré impedanční přizpůsobení se obecně považuje hodnota PSV do 1,5. Dobré impedanční přizpůsobení mají antény s hodnotou PSV < 1,5 až 2. Poměr stojatých vln se také často označuje anglickou zkratkou VSWR (Voltage standing wave ratio). [1, 3]

## **1.2 Vlnovody a teorie šíření vlny ve vlnovodu**

Vlnovody jsou přenosové struktury. Pro vlnovody je charakteristickým znakem to, že délka vlny je srovnatelná s rozměry vlnovodu. Vnitřní struktura vlnovodu je upravena pro co možná největší minimalizaci ztrát tak, že ji lze obvykle považovat za perfektní elektrický vodič.

Vlnovody mohou být různého průřezu, nejčastěji používaný je vlnovod obdélníkového průřezu nebo kruhový vlnovod (obrázek 6). Pokud požadujeme širší přenosové pásmo, lze obdélníkový vlnovod upravit. Danou úpravou vznikne tzv. vlnovod průřezu H, který se hojně využívá pro napájení širokopásmových antén, kterou může být například trychtýřové hřebenové antény. Vlnovody jsou použitelné až na vyšších kmitočtech (řádu gigahertzů) a to právě z toho důvodu, že na nižších kmitočtech by jejich rozměry byly příliš velké.



Obrázek 6: Vlnovod obdélníkového, kruhového a průřezu typu H

### *Obdélníkový vlnovod*

Jak již bylo řečeno, rozměry vlnovodu souvisí s vlnovou délkou vlny, která se daným vlnovodem šíří. Vlna se může vlnovodem přenášet až od určité frekvence, která se nazývá mezní frekvence. Pro vlnovod obdélníkového průřezu (obrázek 7) platí pro tuto frekvenci následující vztah dle [3]

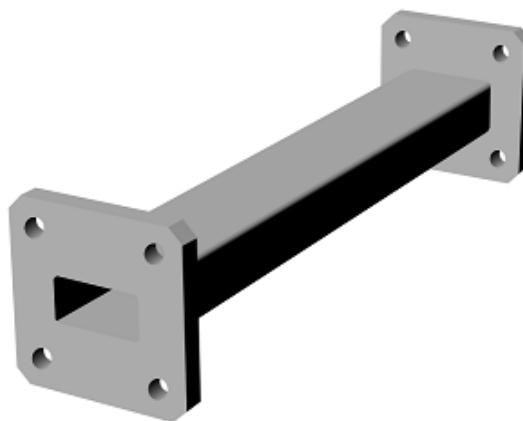
$$f_m = \frac{c}{2a}, \quad (1.4)$$

kde  $a$  je širší strana vlnovodu a  $c$  je rychlost světla ve vakuu.

Na vyšších kmitočtech může být uspořádání elektromagnetického pole jiné, tzn. mohou být vybudeny různé vidy. Jejich mezní frekvence jsou dány vztahem [3]

$$f_m = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (1.5)$$

kde  $a, b$  jsou rozměry vlnovodu a  $m, n$  pořadová čísla vidy. Většinou se ale požaduje, aby anténa pracovala v pásmu jednovidovosti. Při vybudení vyšších vidů se mohou vlny navzájem vyrušit, což má negativní vliv na přenos.

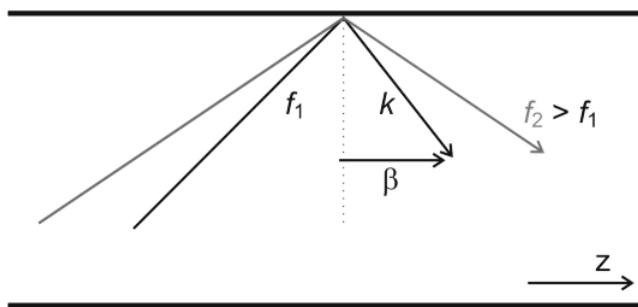


Obrázek 7: Obdélníkový vlnovod [11]

Šíření vlny ve vlnovodu lze popsat pomocí vektoru šíření  $k$ . Velikost vektoru šíření v obecném směru odpovídá rovnici [4]

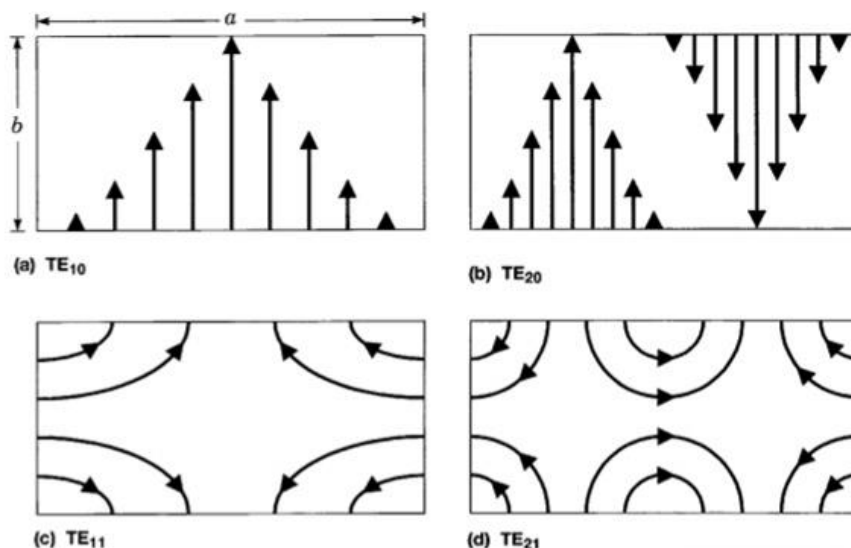
$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} , \quad (1.6)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence,  $\mu$  je permeabilita a  $\varepsilon$  je permitivita prostředí. Z tohoto vztahu je zřejmé, že pro různé frekvence bude vycházet různá hodnota vektoru  $k$ . Tato situace je znázorněna na obrázku 8.



Obrázek 8: Šíření vlny ve vlnovodu [4]

Pro příčný směr šíření je situace následující. Vlny ve vlnovodu lze rozdělit na transverzálně elektrické vlny a transverzálně magnetické vlny. Vlny transverzálně elektrické mají složky elektrického pole pouze ve směru kolmém ke směru šíření vlny. U vln transverzálně magnetických platí stejné pravidlo, jen se jedná o složku magnetického pole, která je kolmá ke směru šíření vlny. Na obrázku 9 lze vidět rozložení pole v obdélníkovém vlnovodu pro čtyři různé vidy transverzálně elektrické vlny.

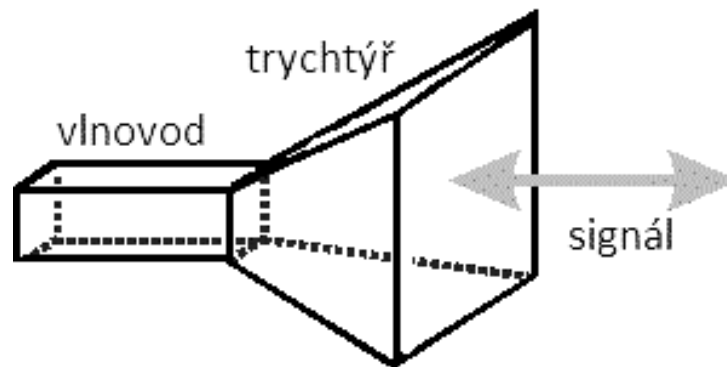


Obrázek 9: Rozložení pole pro různé vidy TE ve vlnovodu obdélníkového tvaru [5]

## 1.3 Trychtýřové antény

Trychtýřové antény patří do skupiny aperturových antén. Trychtýřové antény vznikají z vlnovodů a to tím způsobem, že se prodlouží ústí vlnovodu, jak lze vidět na obrázku 10. Prodloužením ústí vlnovodu totiž dochází k impedančnímu přizpůsobení napáječe (vlnovodu) a volného prostoru. Tyto antény připomínají svým vzhledem trychtýř, odtud je jejich název trychtýřové antény.

Trychtýřové antény byly známy již v historii. První zmínky o těchto anténách sahají už ke konci 19. století. Jedna taková anténa byla zkonstruována díky J. Ch. Bose, který experimentoval s bezdrátovými signály. Poté okolo roku 1936 podnikli mnoho experimentálních výzkumů Southworth a Barrow. Později následovala teoretická analýza trychtýřové antény (rok 1939) od Barrowa a Chu. Počátkem druhé světové války se trychtýřové antény rozmohly, neboť se začaly používat jako ozařovače radarových antén [6].



Obrázek 10: Trychtýřová anténa

Trychtýřové antény jsou typické pro pásmo jednotek až desítek gigahertzů, tedy pro pásma UHF, SHF a EHF. Zisk těchto antén může dosahovat hodnot až 25 dBi, typická hodnota se pohybuje mezi 10 – 20 dBi.

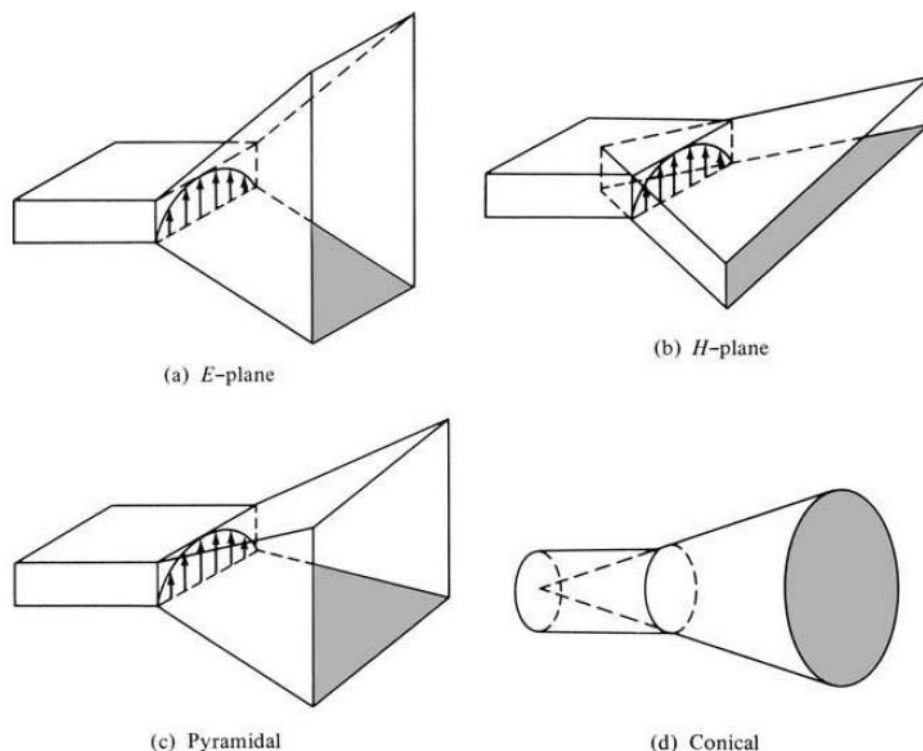
Tyto antény bývají typicky napájeny vlnovodem, ať už se jedná o vlnovod obdélníkový nebo kruhový. Při napájení koaxiální sondou lze dominantní vid v obdélníkovém vlnovodu vybudit nesymetrickou anténou, tzv. kolíkem, který má rezonanční délku rovnu čtvrtině vlnové délky. Koaxiální sonda je umístěna v maximu pole E.

Trychtýřové antény mají velmi nízké ztráty, proto je směrovost antény téměř shodná s jejím ziskem. Trychtýřové antény jsou široce využívány. Využití těchto antén je výhodné zejména kvůli jednoduché konstrukci, jejich univerzálnosti, směrovosti, snadnému vybudování vlny a velkému zisku. Trychtýřové antény mají široké využití. Často se využívají například jako ozařovače parabolických antén nebo mohou být využity samostatně (například pro měření EMC). Nevýhodou těchto antén může být fakt, že mají poměrně velké rozměry a tudíž i jejich hmotnost bývá vysoká. [1,3]

### 1.3.1 Typy trychtýřů

Existují různé tvary trychtýřů. Jednotlivé druhy trychtýřů jsou odlišeny tím, ve kterém směru je rozšířeno ústí vlnovodu. Trychtýře těchto antén mohou být rozšířeny

bud' v obou rovinách E i H, nebo pouze v jedné z rovin magnetické nebo elektrické intenzity. Směrová charakteristika v rovině E je mnohem užší při rozšíření trychtýře v rovině E než v rovině H. Pro směrovou charakteristiku v rovině H to platí obráceně: charakteristika je užší pro anténu s rozšířením trychtýře v rovině H. Trychtýřová anténa také může vzniknout rozšířením vlnovodu kruhového průřezu. Jednotlivé typy trychtýřů lze vidět na obrázku 11. Nejčastěji používaným typem je anténa pyramidová. Tato anténa má rozšířené ústí v obou rovinách intenzity E i H (obrázek 9c).



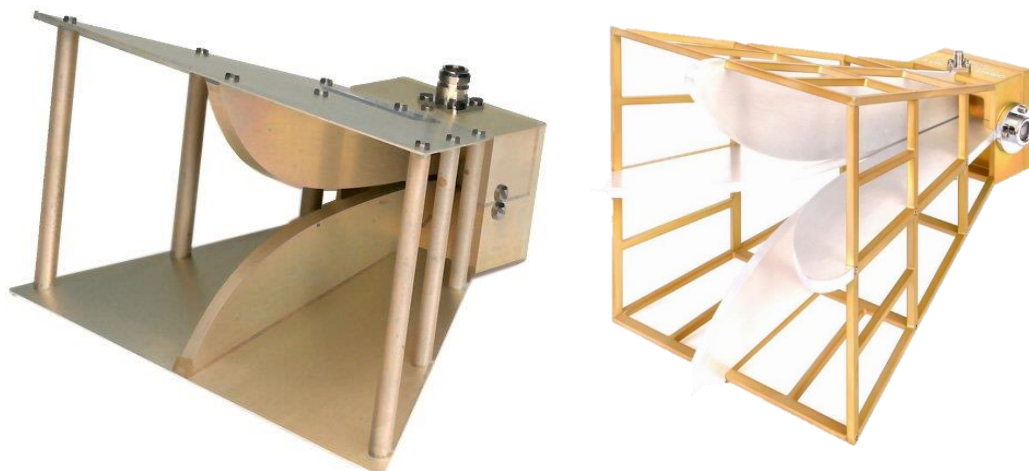
Obrázek 11: Typy trychtýřů [1]

Návrh trychtýřových antén vychází ze známých matematických vztahů, které jsou uvedeny v kapitole 2 Rozbor návrhu trychtýřové antény.

### 1.3.2 Trychtýřová hřebenová anténa

Jedním z typických zástupců širokopásmových antén jsou hřebenové trychtýřové antény (známé také pod anglickým názvem *ridged horn antennas*). U klasických trychtýřových antén je mezní délka vlny pro vid  $TE_{10}$  rovna dvojnásobku délky strany vlnovodu ( $\lambda_c = 2a$ ). Přidáním hřebene do trychtýřové antény dojde ke zvětšení šířky pásma, ve kterém anténa pracuje. Hřebeny ovlivňují mezní kmitočet a to tak, že jejich vložení do trychtýře dojde ke snížení mezního kmitočtu. Šířka pásma je rozšířena také díky potlačení vidu  $TE_{20}$ , tedy parametr MUB (maximum usable bandwidth) je dán poměrem mezní vlnové délky vidu  $TE_{10}$  k mezní vlnové délce vidu  $TE_{30}$ . Šířka frekvenčního pásma může být tedy i více než 12:1. Největší šířky pásma lze dosáhnout, pokud jsou hřebeny u vstupu antény co nejbliž u sebe, tzn. že mezera mezi hřebeny ve vlnovodu typu H je co nejmenší. Přidáním dvou hřebenů do antény vzniká vlnovod typu „H“ (DRHA – double ridged horn antenna). Další variantou je trychtýřová anténa se

čtyřmi hřebeny (Obrázek 122) [3].



Obrázek 12: Anténa se dvěma a čtyřmi hřebeny [7, 8]

## 2 ROZBOR NÁVRHU TRYCHTÝŘOVÉ ANTÉNY

Návrh trychtýřové antény je rozdělen do několika kroků. Prvním krokem je návrh vlnovodu, kde se do klasického obdélníkového vlnovodu přidají hřebeny, čímž vznikne vlnovod typu „H“. Dalším krokem je návrh přechodu z koaxiálního vedení na vlnovod. Pro dosažení impedančního přizpůsobení lze přechod řešit několika způsoby. Posledním krokem je návrh trychtýře a tvaru hřebenů. Nejprve se navrhne klasický trychtýř, do něhož jsou poté vloženy hřebeny.

### 2.1 Návrh vlnovodu

Nejdříve je nutné spočítat rozměry odpovídajícího obdélníkového vlnovodu  $a$ ,  $b$  (obrázek 13). Podle teorie o vlnovodech vycházíme z následující rovnice [3]:

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot \mu\epsilon} \cdot \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (2.1)$$

kde  $m$ ,  $n$  popisují daný vid  $TE_{mn}$ . Pro vid  $TE_{m0}$  vypadne jeden člen pod odmocninou a rovnice se tudíž zjednoduší do následujícího tvaru:

$$f_m = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}, \quad (2.2)$$

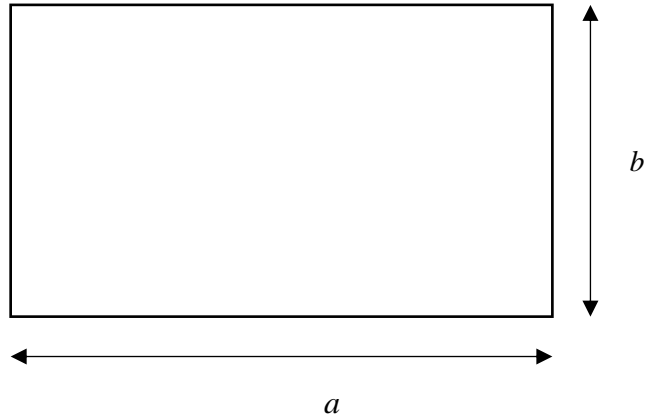
kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu. Upravením rovnice získáme rovnici pro výpočet strany  $a$  daného vlnovodu.

$$a = \frac{c \cdot m}{2 \cdot f_m} \quad (2.3)$$

Stranu  $b$  určíme z podmínky, že dvojnásobek její velikosti musí být menší než velikost strany  $a$ .

$$a > 2b \quad (2.4)$$





Obrázek 13: Návrh obdélníkového vlnovodu

Dalším krokem je umístění dvou hřebenů do známého obdélníkového vlnovodu. Tímto krokem vznikne vlnovod „H“ průřezu (obrázek 14). Jelikož bude vlnovod buzen ve svém středu, dojde k potlačení vidu  $TE_{20}$ . Pásmo jednovidovosti bude tedy od vidu  $TE_{10}$  do  $TE_{30}$ . Rozměry vlnovodu takového průřezu je možné určit následovně.

Pro určení mezní frekvence vidu  $TE_{10}$  a  $TE_{30}$  je použita následující rovnice [3]:

$$\frac{\tan(k_c s/2)}{\eta \cdot 0,5d} + k_c cC - \frac{\cot\left[\frac{k_c(a-s)}{2}\right]}{\eta b} = 0 \quad (2.5)$$

Admitanci v nekonečnu lze spočítat z následujícího vztahu [3].

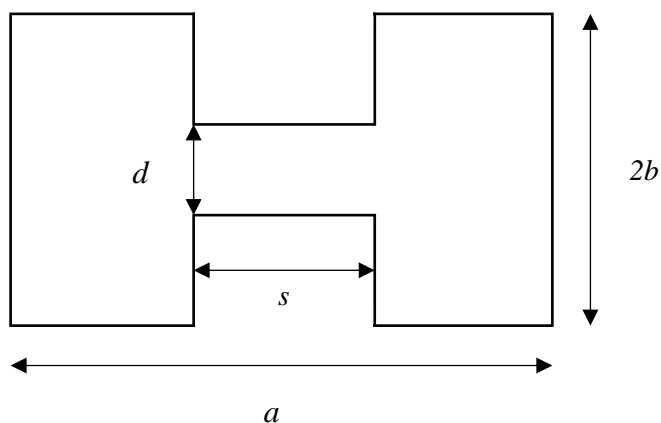
$$Y_\infty = \frac{1}{k\eta \cdot 0,5d} \left\{ \frac{ks}{4} + \sin\frac{ks}{4} + \frac{0,5d \cdot \cos(ks/2)^2}{b \cdot \sin(ka/2)^2} \cdot \left( \frac{ka}{4} - \sin\frac{ka}{4} \right) + \frac{d}{\lambda} \cdot \ln \left[ \csc\left(\frac{\pi \cdot 0,5d}{2b}\right) \cos\left(\frac{ks}{2}\right)^2 \right] \right\} \quad (2.6)$$

Impedance je poté rovna:

$$Z_\infty = \frac{1}{Y_\infty} \quad (2.7)$$

Pro různé frekvence  $f$  je pak charakteristická impedance v daném místě dána rovnicí [3]:

$$Z_0 = \frac{Z_\infty}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (2.8)$$

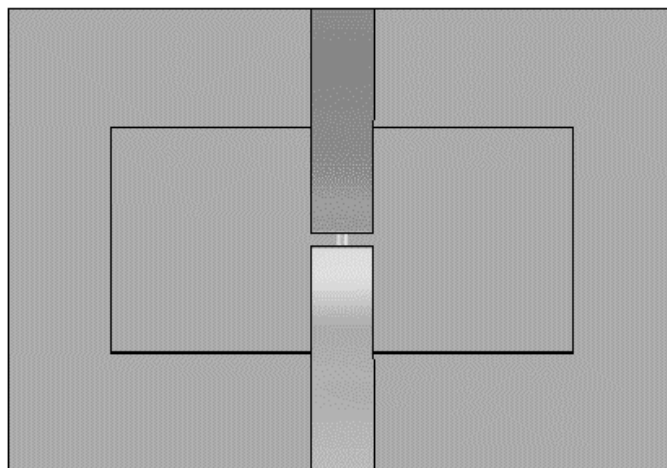


Obrázek 14: Návrh vlnovodu průřezu "H"

Určením parametrů  $s$  a  $d$  získáme dané rozměry vlnovodu. Jelikož požadujeme impedanční přizpůsobení ke koaxiálnímu vedení, hledáme takové rozměry, kdy se impedance bude blížit jeho hodnotě, tedy  $50 \Omega$  [3].

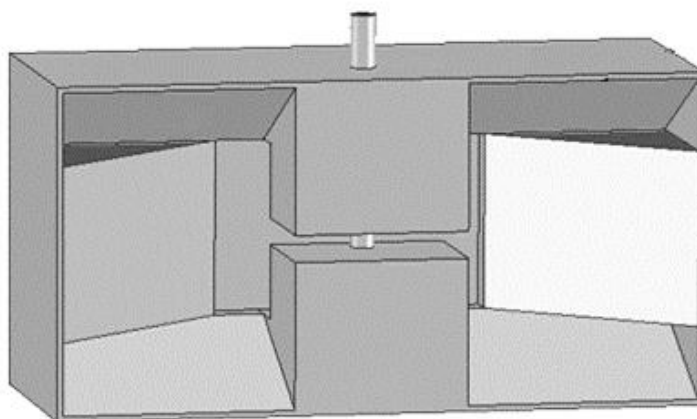
## 2.2 Návrh přechodu koaxiální vedení – vlnovod „H“

Jak již bylo řečeno, anténa bude napájena pomocí koaxiální sondy. Je tedy nutné navrhnout přechod z koaxiálního vedení na vlnovod. Na obrázku 15 je vidět, jak tento přechod vypadá.



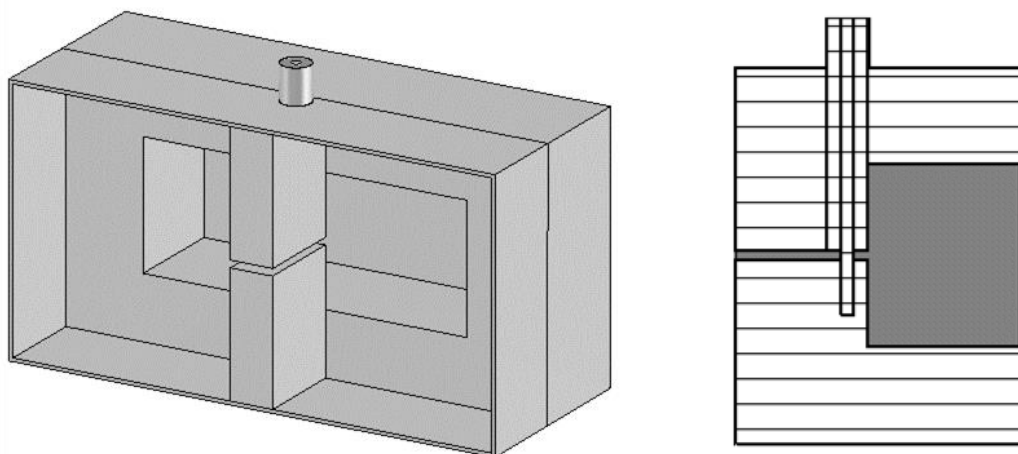
Obrázek 15: Napájení pomocí koaxiální sondy

Návrh napájecí části antény je možné řešit několika způsoby. Přechod z koaxiálního vedení na vlnovod se může skládat ze čtyř zkosných dílů. Tyto díly mohou být zkoseny buď pod stejným úhlem, nebo můžou být úhly zkosení různé (obrázek 16) [9].



Obrázek 16: Napájecí část se zkosenými díly

Další možností je použití výřezu (obrázek 17). Tento typ přechodu je snazší jak pro návrh, tak i pro následnou realizaci, jelikož obsahuje pouze kolmé plochy.



Obrázek 17: Přechod koaxiální vedení - vlnovod H

## 2.3 Návrh trychtýře

U návrhu trychtýře antény se postupuje tak, že se nejdříve navrhne trychtýř samotný a poté se do něj vloží hřebeny.

Trychtýř v koncovém místě má šířku  $W$  a výšku  $H$ . Délka trychtýře je  $L$  (obrázek 19). Rozměry apertury (šířku  $W$  a výšku  $H$ ) lze určit z následujících rovnic [3]

$$\frac{W}{\lambda} = 0,489 \sqrt{G} \quad (2.9)$$

$$\frac{H}{\lambda} = 0,332 \sqrt{G} \quad (2.10)$$

Parametr  $R_h$  lze určit z následujícího vztahu

$$\frac{R_h}{\lambda} = 0,0746 G \quad (2.11)$$

Délku trychtýře je poté možné určit dosazením známých parametrů do rovnice

$$L = \frac{W - a}{W} \sqrt{R_h^2 - \frac{W^2}{4}} \quad (2.12)$$

$R_e$  lze dopočítat z následujícího vztahu.

$$R_e = \frac{H}{H - b} \sqrt{L^2 + \frac{(H - b)^2}{4}} \quad (2.13)$$

Nyní je potřeba určit zisk, který se porovná s požadovaným ziskem.

$$G_{actual} = 10 \log \frac{4\pi HW}{\lambda^2} - ATL - PEL_h - PEL_e, \quad (2.14)$$

kde  $ATL = 0,91$  dB a  $PEL_h = 1,14$  dB pro  $S_h = 0,4$ .  $S_e$  se vypočte z rovnice

$$S_e = \frac{H^2}{8\lambda R_e} \quad (2.15)$$

Pomocí tohoto výpočtu se poté určí z tabulky hodnota  $PEL_e$  (obrázek 18).

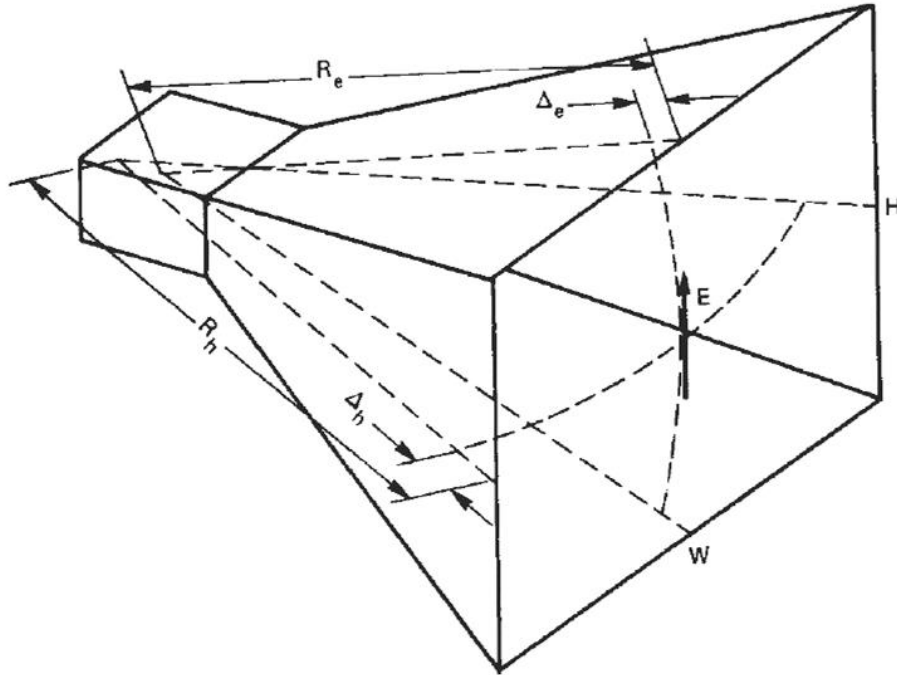
Cycles, $S$	Uniform	Cosine	Cosine <sup>2</sup>	Cosine <sup>2</sup> + 19.9-dB Pedestal
0.05	0.04	0.02	0.01	0.02
0.10	0.15	0.07	0.04	0.07
0.15	0.34	0.16	0.09	0.16
0.20	0.62	0.29	0.16	0.28
0.25	0.97	0.45	0.25	0.44
0.30	1.40	0.65	0.36	0.63
0.35	1.92	0.88	0.49	0.84
0.40	2.54	1.14	0.64	1.08
0.45	3.24	1.43	0.80	1.34
0.50	4.04	1.75	0.97	1.62
0.55	4.93	2.09	1.16	1.90
0.60	5.91	2.44	1.36	2.19
0.65	6.96	2.82	1.57	2.48
0.70	8.04	3.20	1.79	2.76
0.75	9.08	3.58	2.01	3.04
0.80	9.98	3.95	2.23	3.29
0.85	10.60	4.31	2.46	3.52
0.90	10.87	4.65	2.69	3.73
0.95	10.80	4.97	2.91	3.92
1.00	10.50	5.25	3.13	4.09

Obrázek 18: Tabulka hodnot  $PEL_e$  [3]

Nový zisk se určí z rovnice

$$G_{new} = \frac{G_{required} G_{old}}{G_{actual}} \quad (2.16)$$

Pomocí další iterace lze dosáhnout přesnějších parametrů.



Obrázek 19: Geometrie trychtýře antény [3]

Nyní je třeba do navrženého trychtýře přidat hřebeny. Návrh hřebenů lze provést pomocí různých funkcí. Tato funkce může mít rozložení binomické, pomocí sinusoidy nebo třeba exponenciální. Bylo ale ověřeno, že nejlepší je použití exponenciální funkce a to kvůli lepší shodě impedance vlnovodu a volného prostoru. Přidáním lineárního členu do rovnice může dojít ke snížení VSWR na nižších kmitočtech a zároveň to neovlivní jiné části frekvenčního pásma. Pro návrh hřebenů se tedy vychází z následující rovnice [9]:

$$z(y) = 0,02z + z(0)e^{ky} \quad (0 \leq y \leq L) , \quad (2.17)$$

kde  $z$  je vzdálenost od osy symetrie,  $y$  je vzdálenost od apertury vlnovodu,  $L$  je osová délka antény a  $k$  je konstanta, která se určí následovně [9]:

$$k = \frac{1}{L} \ln \left( \frac{z(L)}{z(0)} \right) \quad (2.18)$$

# 3 NÁVRH ANTÉNY PRO PÁSMO 0,8 – 10 GHZ

## 3.1 Výpočet vlnovodu

Prvním krokem je určení rozměrů obdélníkového vlnovodu. Pro návrh vycházíme ze vzorce (2.2). Pro určení pásma jednovivosti dosadíme do vzorce horní mezní frekvenci pro buzení vidu  $TE_{30}$ .

$$a = \frac{c \cdot m}{2 \cdot f_m} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 3}{2 \cdot 10 \cdot 10^9} = 0,045 \text{ m} = 45 \text{ mm}$$

Pro výpočet strany  $b$  vycházíme z podmínky (9):

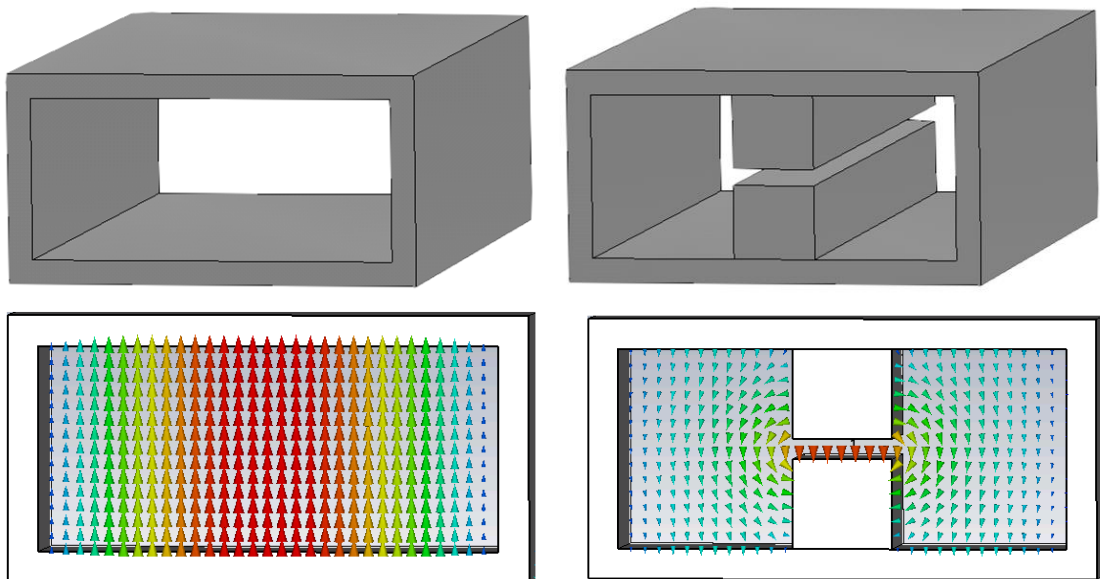
$$b < 22,5$$

Pro výpočty byla zvolena hodnota  $b$  rovna  $20 \text{ mm}$ .

Vlnová délka je následující:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^9} = 0,03 \text{ m} = 30 \text{ mm}$$

Jelikož bude vlnovod napájen koaxiálním kabelem, je nutné, aby byl impedančně přizpůsoben tomuto napáječci. Pro výpočet rozměrů hřebene ve vlnovodu byla použita rovnice (2.6). Nejblíže k impedanci  $Z_{\infty} = 50 \Omega$  bylo dosaženo rozměry  $s = 10,3 \text{ mm}$  a  $d = 2 \text{ mm}$ . Na následujícím obrázku (obrázek 20) lze vidět rozložení elektrického pole (vid  $TE_{10}$ ) v obdélníkovém vlnovodu a ve vlnovodu typu „H“ pro střední frekvenci, tedy 5,4 GHz.



Obrázek 20: Rozložení elektrického pole v obdélníkovém vlnovodu a vlnovodu H

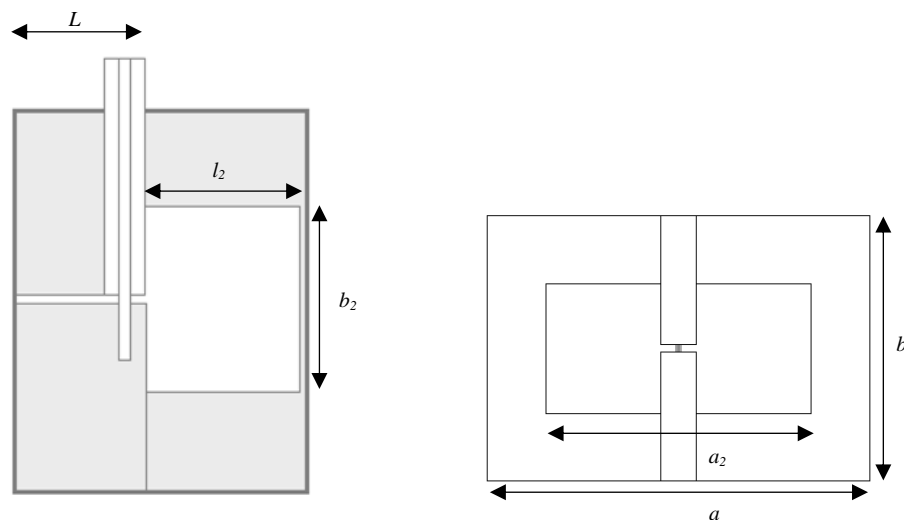
### 3.2 Výpočet přechodu koaxiální vedení – vlnovod „H“

Koaxiální sonda prochází středem jednoho z hřebenů, centrální vodič je zároveň veden až ke druhému hřebenu, do kterého je zasunut. Vstupní impedance má hodnotu  $50 \Omega$ , průměry vnitřního a vnějšího vodiče koaxiálního kabelu lze určit z následující rovnice.

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{c_{out}}{c_{in}}\right), \quad (3.1)$$

kde  $c_{out}$  je průměr vnějšího vodiče a  $c_{in}$  průměr vnitřního vodiče. Byly zvoleny hodnoty  $c_{out} = 4,1 \text{ mm}$  a  $c_{in} = 1,27 \text{ mm}$ , jelikož tyto hodnoty zároveň odpovídají rozměrům koaxiálního konektoru s označením 172224. Rozměry tohoto konektoru jsou uvedeny v příloze A.1 Konektor 172224.

Dále je jako napájecí část použita rezonanční štěrbinová s kolmými stěnami, jelikož je pro následnou konstrukci antény nejlépe aplikovatelná. Štěrbinová má rozměry šířku  $a_2$ , výšku  $b_2$  a hloubku  $l_2$  (obrázek 21). Správné zvolení rozměrů této dutiny má vliv na činitel odrazu, nicméně neexistují žádné obecné vztahy pro její návrh. Proto byly tyto hodnoty zvoleny a následně optimalizovány, aby nejlépe odpovídaly požadovaným vlastnostem.



Obrázek 21: Návrh rezonanční štěrbinové

Rozměry vlnovodu byly upraveny, aby výsledky odpovídaly požadavkům. Po provedení několika simulací s rozdílnými hodnotami  $a_2$ ,  $b_2$  a  $l_2$  byly zvoleny následující hodnoty rozměrů vlnovodu a štěrbinové:  $a = 65 \text{ mm}$ ,  $b = 36 \text{ mm}$ ,  $L = 13 \text{ mm}$ ,  $a_2 = 40 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 16 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 15 \text{ mm}$ .

### 3.3 Výpočet trychtýře

Nejprve se určí rozměry trychtýře. Pro výpočet šířky a výšky apertury se vychází z rovnic (2.9, 2.10), kde pro zvolený zisk 22 dB je výpočet následující

$$W = 0,489 \sqrt{G} \cdot \lambda = 0,489 \cdot \sqrt{158,5} \cdot 0,03 = 184,7 \text{ mm}$$

$$H = 0,332 \sqrt{G} \cdot \lambda = 0,332 \cdot \sqrt{158,5} \cdot 0,03 = 125,4 \text{ mm}$$

Dalším krokem je určení rozměru  $R_h$  a z něj následně délku  $L$  (2.12, 2.13)

$$R_h = 0,0746 G \cdot \lambda = 0,0746 \cdot 158,5 \cdot 0,02857 = 354,7 \text{ mm}$$

$$L = \frac{W - a}{W} \sqrt{R_h^2 - \frac{W^2}{4}} = \frac{0,1847 - 0,065}{0,1847} \sqrt{0,3547^2 - \frac{0,1847^2}{4}} = 221,9 \text{ mm}$$

Ze vzorce (2.11) se následně dopočítá hodnota  $R_e$

$$R_e = \frac{H}{H - b} \sqrt{L^2 + \frac{(H - b)^2}{4}} = \frac{0,1254}{0,1254 - 0,04} \sqrt{0,2219^2 + \frac{(0,1254 - 0,04)^2}{4}} = 331,8 \text{ mm}$$

Zisk se vypočítá pomocí vzorce (2.14)

$$G_{actual} = 10 \log \frac{4\pi HW}{\lambda^2} - ATL - PEL_h - PEL_e = 10 \log \frac{4\pi \cdot 0,1254 \cdot 0,1847}{0,03^2} - 0,91 - 1,14 - 0,04 = 23 \text{ dB}$$

Pro dosažení přesnější hodnoty zisku, lze provést druhou iteraci.

Pro výpočet rozměrů hřebenu se vychází z rovnice (2.17), nakonec byla zvolena varianta bez lineárního členu, jelikož měla zanedbatelný vliv na výsledky simulace. V tabulce 2 jsou uvedeny rozměry hřebene v závislosti na pozici od konce vlnovodu.

Tabulka 2: Rozměry hřebene

y [mm]	0	10	20	40	60	80	100	120	140	160
z(y) [mm]	0,5	1,21	1,47	2,16	3,18	4,67	6,87	10,10	14,85	21,83

y [mm]	180	200
z(y) [mm]	32,09	47,18

### 3.4 Výsledky simulace základní struktury

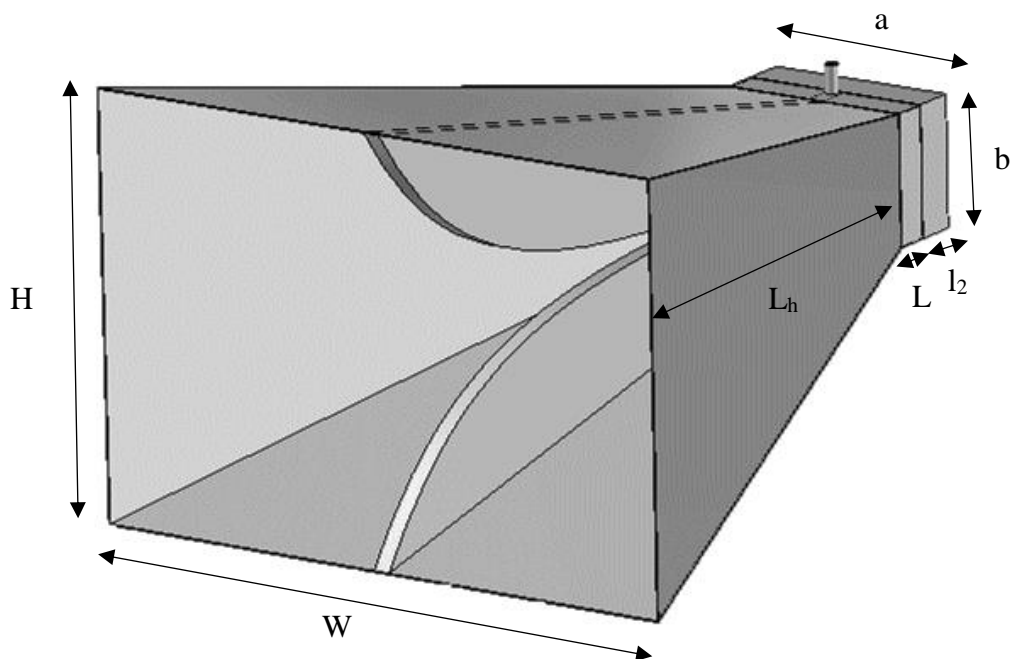
Po provedení mnoha simulací bylo nejlépe dosaženo požadovaných parametrů pro následující rozměry antény (tabulka 3).



Tabulka 3: Hodnoty parametrů základní struktury antény

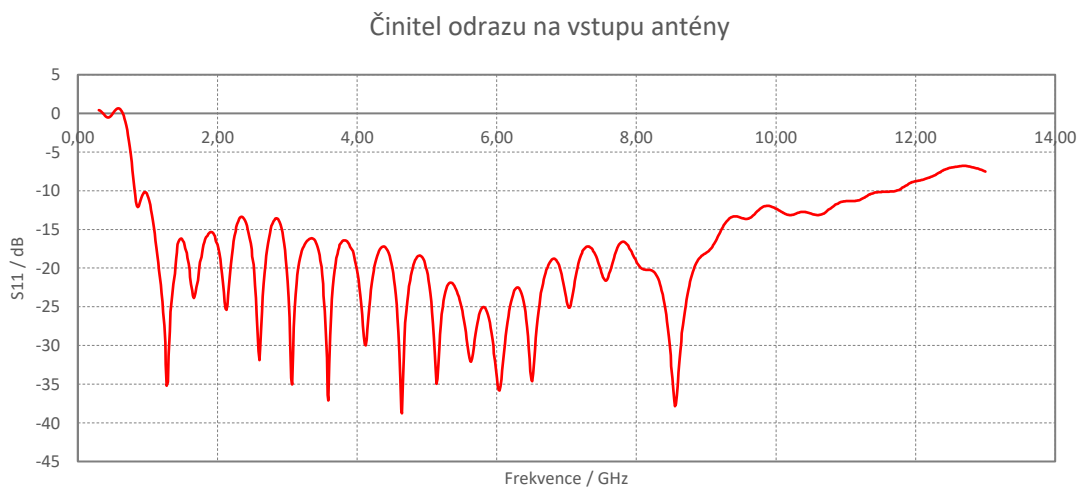
Parametr	Popis	Hodnota [mm]
a	Šířka vlnovodu	66
b	Výška vlnovodu	36
s	Šířka hřebene	6
d	Mezera mezi hřebeny	1
a <sub>2</sub>	Šířka rezonanční štěrby	44
b <sub>2</sub>	Výška rezonanční štěrby	22
L	Délka vlnovodu	13
l <sub>2</sub>	Délka rezonanční štěrby	15
k <sub>1</sub>	Poloměr díry v horním hřebeni	2,05
k <sub>2</sub>	Poloměr díry ve spodním hřebeni	0,65
hl	Hloubka díry ve spodním hřebeni	5,9
W	Šířka trychtýře	210
H	Výška trychtýře	135
L <sub>h</sub>	Délka trychtýře	260
del_inner	Délka vnitřního vodiče (od středu mezery)	13
c_in	Průměr vnitřního vodiče coax. sondy	1,27
c_out	Průměr vnějšího vodiče coax. sondy	4,1
poz_koax	Pozice koaxiální sondy (od počátku vlnovodu)	2,05

Na obrázku 22 je zobrazena celá struktura trychtýřové antény základní struktury s vyznačenými parametry.

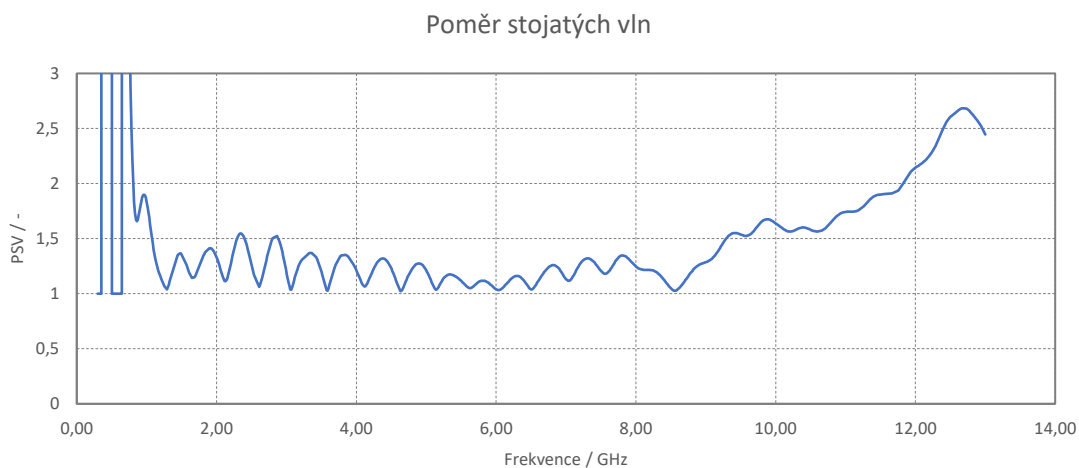


Obrázek 22: Základní struktura antény

Pro základní strukturu antény byly simulacemi získány následující parametry. Jak je vidět na obrázku 23, činitel odrazu na vstupu antény ( $S_{11}$ ) je v celém požadovaném frekvenčním pásmu 0,8–10 GHz menší než -10 dB. Na obrázku 24 je vidět změna PSV s frekvencí.



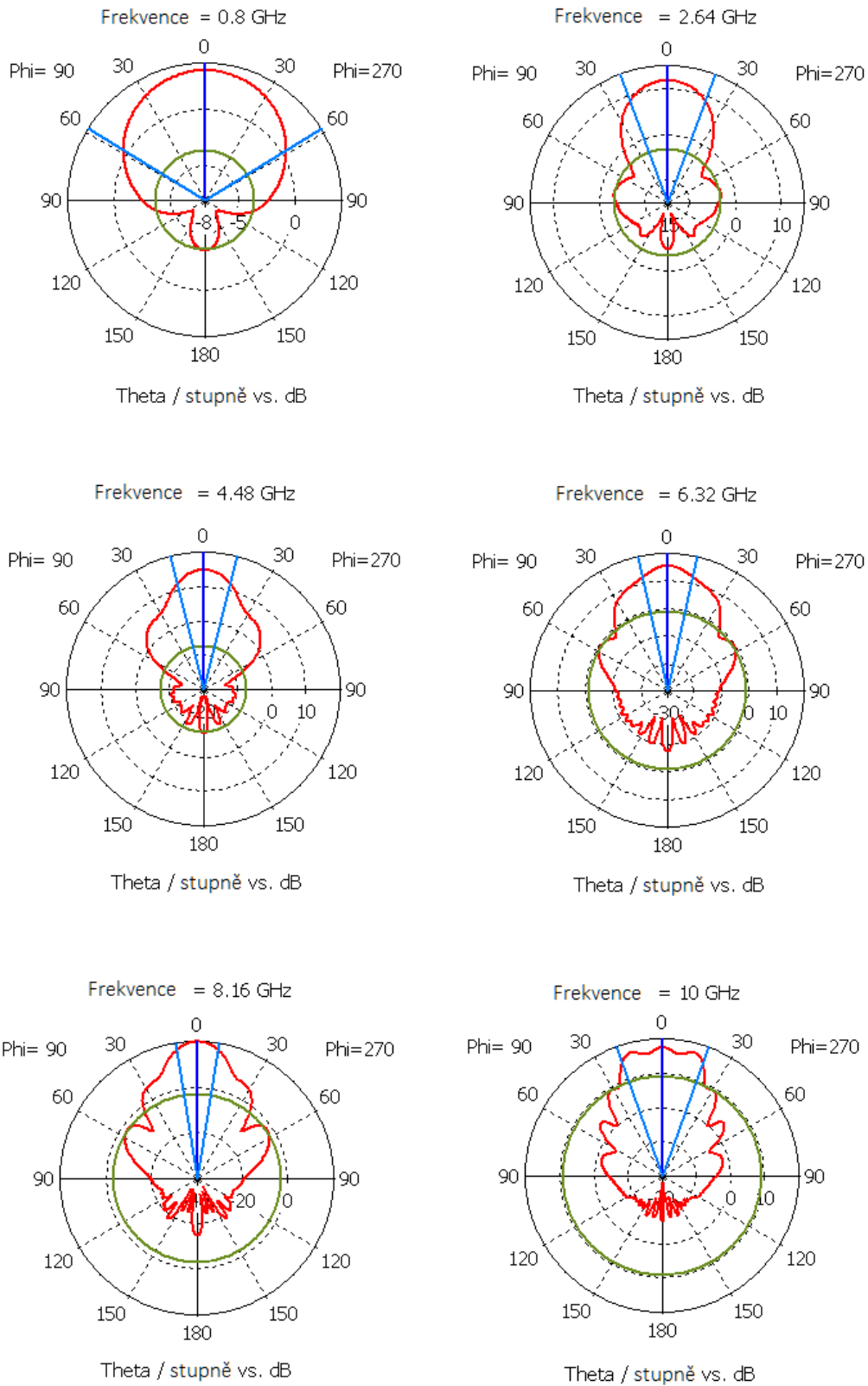
Obrázek 23: Činitel odrazu na vstupu základní struktury antény



Obrázek 24: PSV základní struktury antény

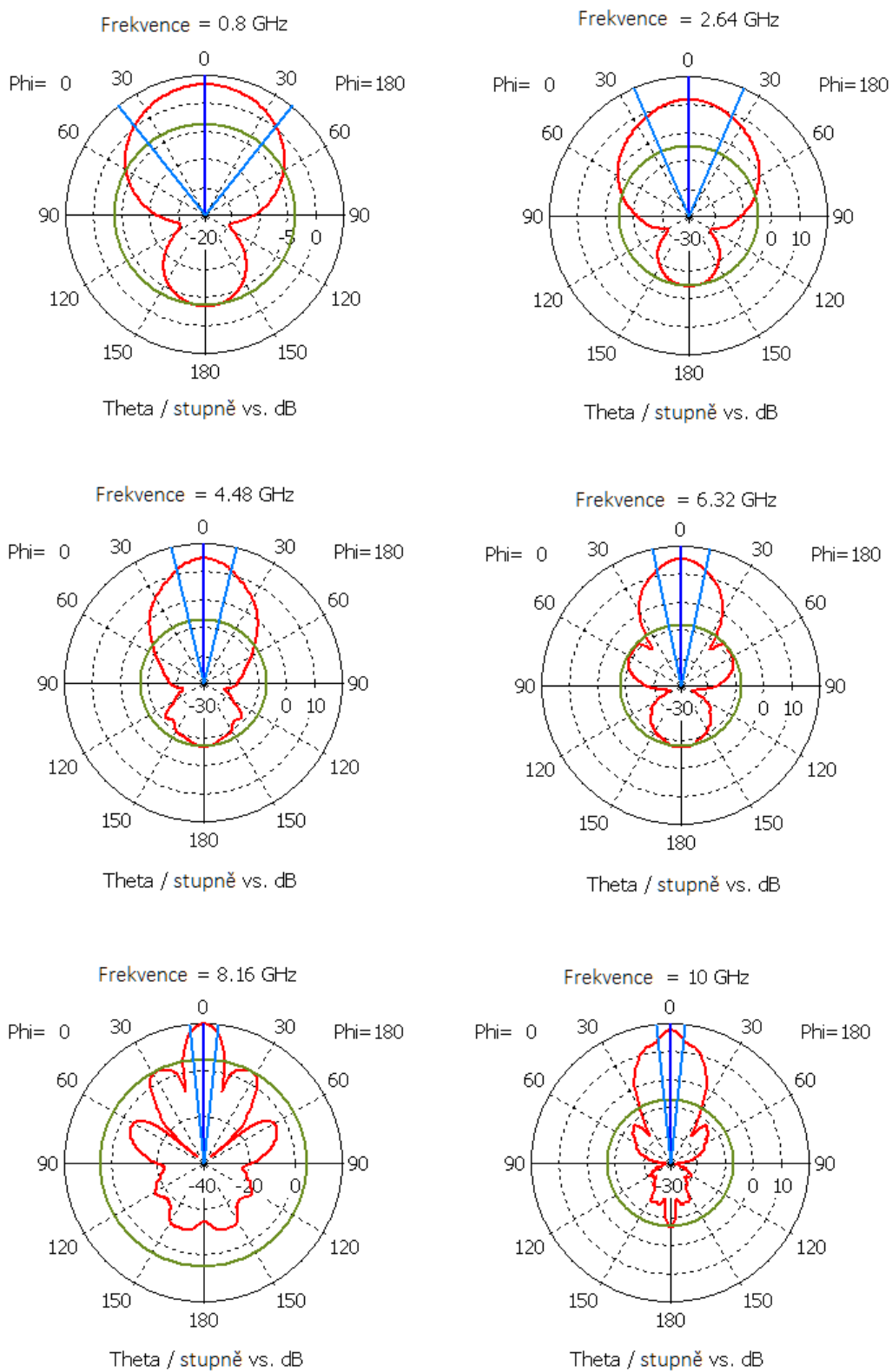
Pro poměr stojatých vln platí pravidlo, že čím menší je jeho hodnota, tím je obvod lépe přizpůsobený. Za dobré přizpůsobení se obecně považuje hodnota PSV < 1,5 až 2. Hodnota PSV simulované hřebenové trychtýřové antény se pohybuje kolem hodnoty 1,5 téměř v celém intervalu. Pouze na krajních kmitočtech jsou hodnoty PSV vyšší.

Na následující stránce lze vidět obrázky vyzařovacích diagramů pro šest různých frekvencí. Jedná se o vyzařovací diagram v rovině E (obrázek 25).



Obrázek 25: Vyzařovací diagramy v rovině E základní struktury

A následující diagramy pro stejné frekvence, tentokrát v rovině H (obrázek 26).



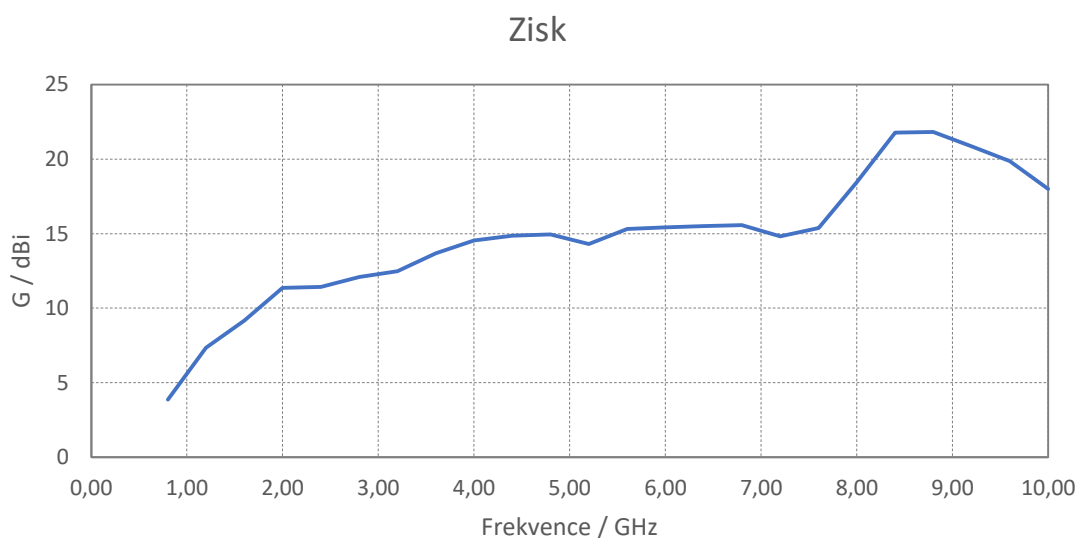
Obrázek 26: Vyzařovací diagramy v rovině H základní struktury

Zisk antény se pohybuje v rozmezí od 11 do 20 dBi. Hodnoty zisku pro jednotlivé frekvence jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Zisk antény základní struktury pro dané kmitočty

$f$ [GHz]	0,8	2,64	4,48	6,32	8,16	10
$G$ [dBi]	3,26	11,7	14,9	15,5	19,8	17,7

Na obrázku 27 lze vidět závislost zisk antény na frekvenci vynesenu do grafu.



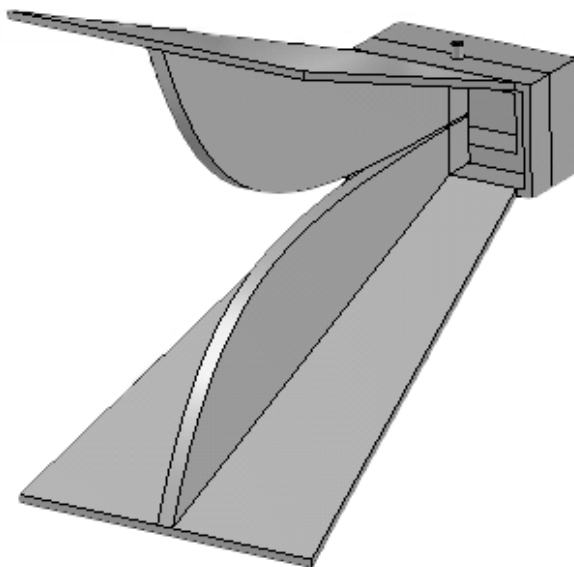
Obrázek 27: Zisk antény základní struktury

Velikost zisku roste se zvyšující se frekvencí. Nejmenší zisk je na nejnižší frekvenci (800 MHz), nejvyššího zisku dosahuje anténa na frekvenci 8,16 GHz. Poté zisk na 10 GHz poklesne na hodnotu 17,7 dBi.

## 4 MODIFIKACE ANTÉNY

V následující kapitole bude popsán postup a důvody jednotlivých kroků modifikace antény.

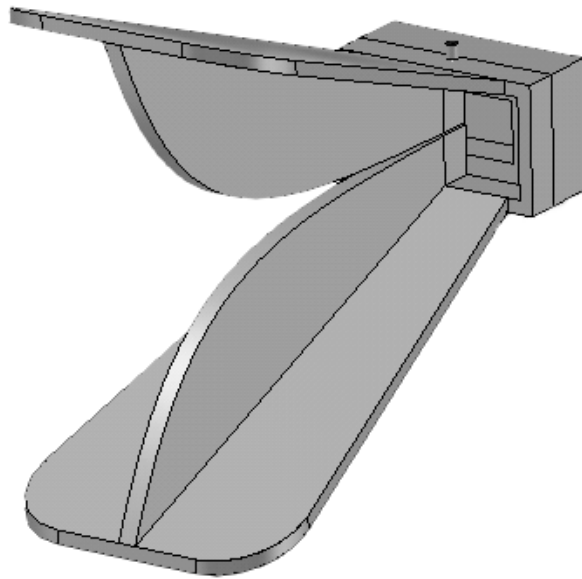
Jednou z možných modifikací je odstranění bočních stěn trychtýře (Obrázek 28). Úprava se používá pro snížení celkové hmotnosti antény. Tato úprava má za následek snížení zisku antény a to z důvodu rozšíření H roviny.



Obrázek 28: Struktura antény bez bočních stěn trychtýře

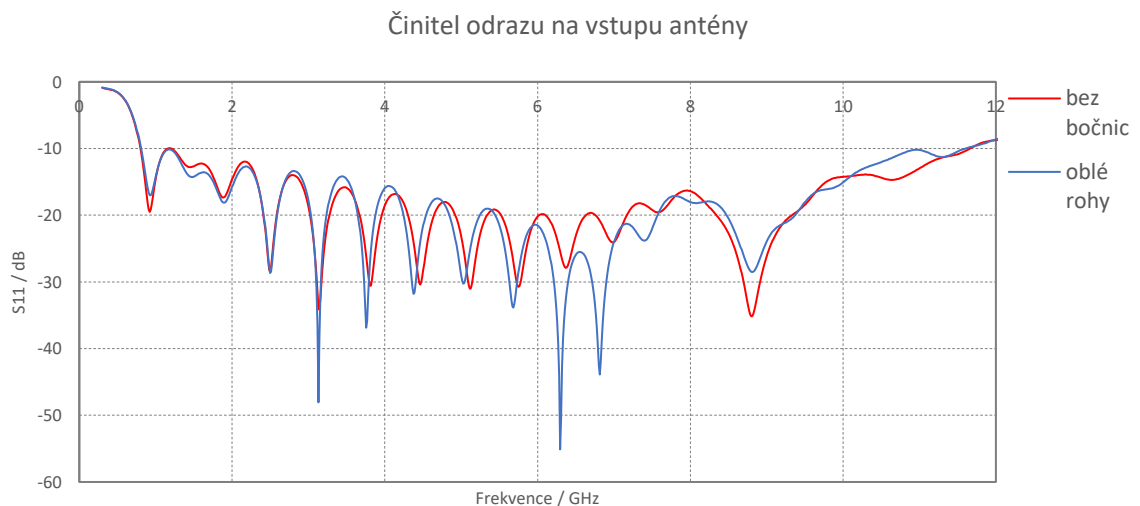
Pro tuto modifikaci byla nutná optimalizace jednotlivých parametrů trychtýře –  $L$ ,  $W$  a  $H$ . Pro požadované vlastnosti antény nejlépe vyhovovaly tyto rozměry:  $L_h = 180$  mm,  $W = 123$  mm a  $H = 172$  mm. Modifikace má také za následek snížení zisku antény (rozsah mezi 10-13,5 dBi).

Problém u struktury antény bez bočních stěn je ten, že činitel odrazu na vstupu antény se na nízkých frekvencích pohybuje velmi blízko hodnotě -10 dB. Tento problém lze vyřešit zakřivením koncových rohů trychtýře (obrázek 29). Kruhový profil zlepšuje vlastnosti antény (především činitel odrazu na vstupu). Ideální poloměr zakřivení je alespoň  $\lambda/4$  na nejnižší provozní frekvenci. Tato modifikace by zároveň neměla mít vliv na zisk antény. [10]



Obrázek 29: Struktura antény se zaoblenými rohy

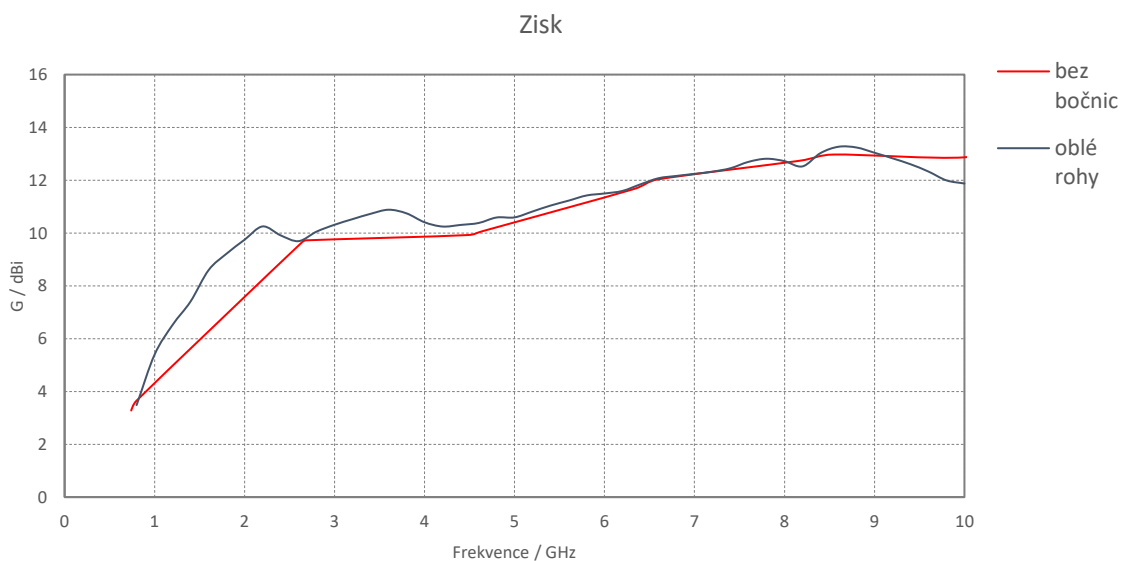
Na následujícím grafu (obrázek 30) lze vidět srovnání parametru  $S_{11}$  antény bez bočních stěn a antény bez bočních stěn s kulatými rohy konce trychtýře. Lze vidět, že zakulacení rohů způsobí lehký pokles parametru  $S_{11}$  na nízkých frekvencích (při stejných hodnotách zbylých parametrů antény). To je způsobeno tím, že zakulacení rohů způsobí lepší impedanční přechod do volného prostoru. [10]



Obrázek 30: Srovnání  $S_{11}$  antény bez bočních stěn a s kulatými rohy

Na následujícím obrázku (obrázek 31) lze vidět také srovnání zisku pro anténu bez bočnic a pro upravenou strukturu se zakulacenými rohy. Podle teorie by zaoblení rohů nemělo mít vliv na zisk antény, což odpovídá. Zisk struktury bez bočnic a upravené struktury se zaoblenými rohy se pohybuje kolem 13 dBi.

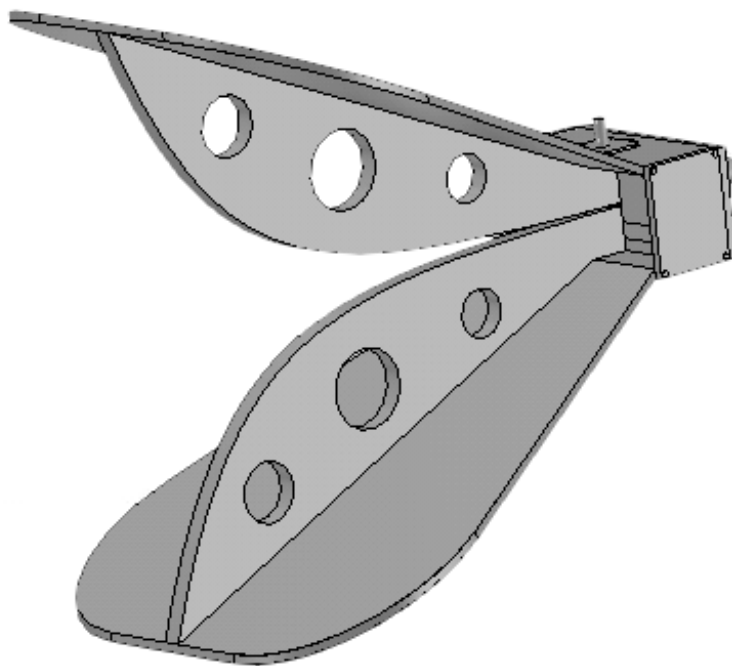




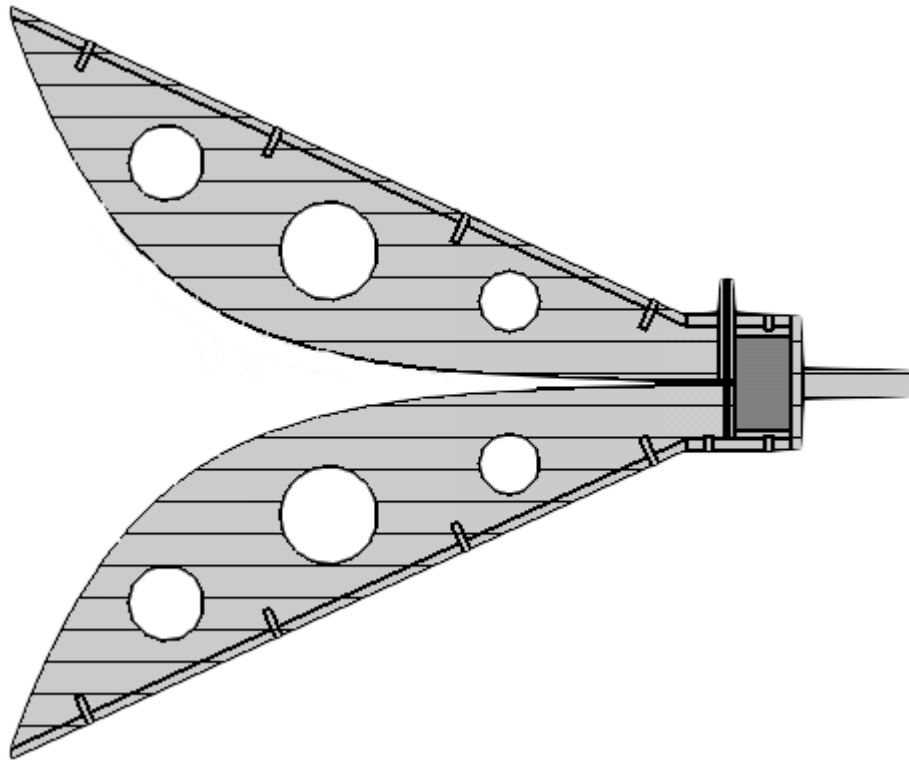
Obrázek 31: Srovnání zisku struktury bez bočnic a se zakulacenými rohy

## 4.1 Konečná struktura antény

Poslední úpravou struktury je vytvoření několika průvrtů do hřebenů (obrázek 32). Tato modifikace je provedena čistě pro snížení hmotnosti antény, protože hřebeny jsou silné 6 mm a tudíž i těžké. Úpravou již vzniká výsledný návrh struktury antény. Příčný řez anténou lze vidět na obrázku 33.



Obrázek 32: Výsledná struktura antény



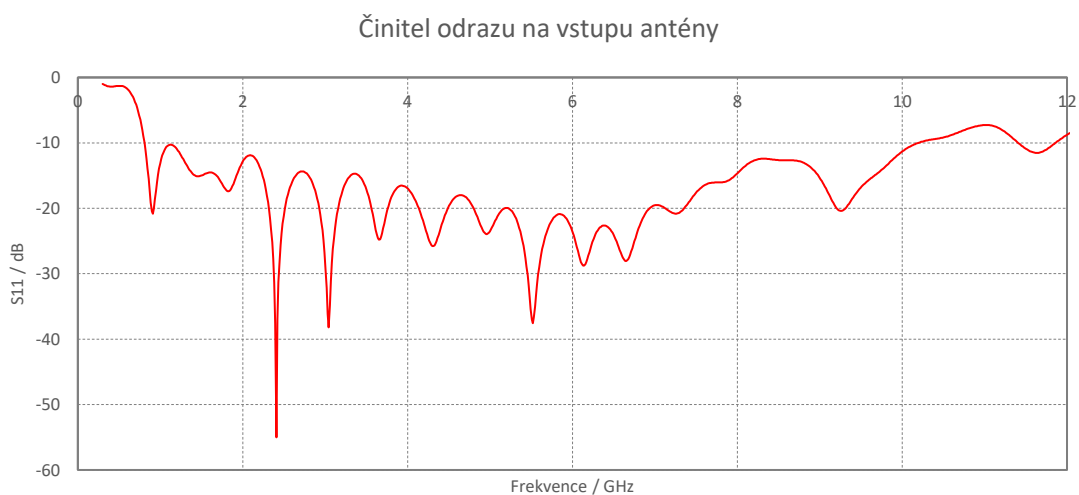
Obrázek 33: Příčný řez anténou

Kvůli této úpravě bylo opět nutné optimalizovat některé rozměry, především parametry  $L_h$ ,  $H$  a  $W$ . Průměry průvrtů byly voleny tak, aby byly co největší (kvůli snížení celkové hmotnosti antény), zároveň ale měli co nejméně ovlivňovat parametry dané antény. Konečné hodnoty parametrů jsou uvedeny v tabulce 5.

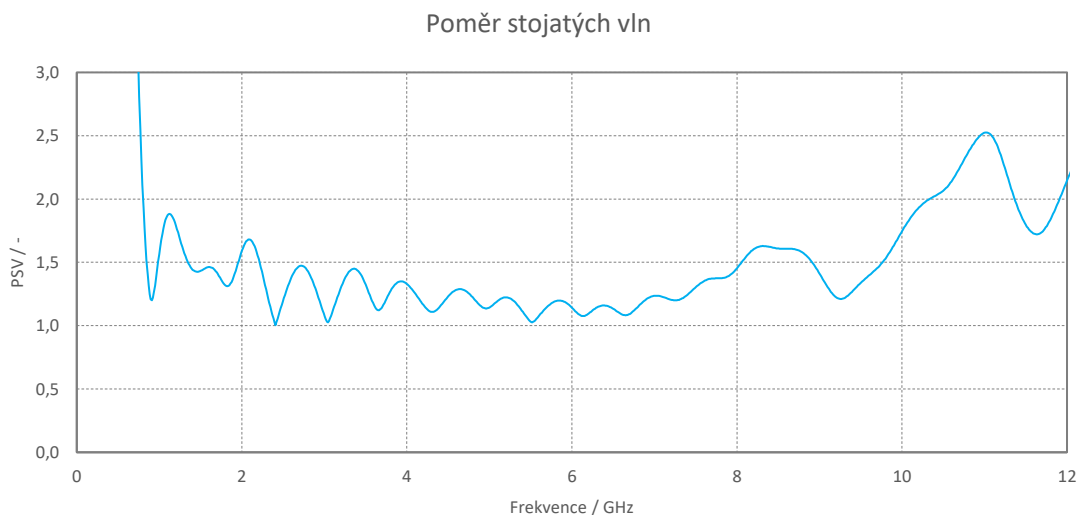
Tabulka 5: Konečné hodnoty parametrů antény

Parametr	Popis	Hodnota [mm]
a	Šířka vlnovodu	66
b	Výška vlnovodu	30
s	Šířka hřebene	6
d	Mezera mezi hřebeny	1
a <sub>2</sub>	Šířka rezonanční štěrbin	40
b <sub>2</sub>	Výška rezonanční štěrbin	25
L	Délka vlnovodu	13
l <sub>2</sub>	Délka rezonanční štěrbin	15
k <sub>1</sub>	Poloměr díry v horním hřebeni	2,05
k <sub>2</sub>	Poloměr díry ve spodním hřebeni	0,7
hl	Hloubka díry ve spodním hřebeni	15
W	Šířka trychtýře	200
H	Výška trychtýře	195
L <sub>h</sub>	Délka trychtýře	180
del_inner	Délka vnitřního vodiče (od středu mezery)	5,9
c_in	Průměr vnitřního vodiče koax. sondy	1,27
c_out	Průměr vnějšího vodiče koax. sondy	4,1
poz_koax	Pozice koaxiální sondy (od počátku vlnovodu)	2,3
r1	Poloměr zakřivení rohů	48
dira1	Poloměr prvního průvrtu v hřebenu	8
dira2	Poloměr druhého průvrtu v hřebenu	13
dira3	Poloměr třetího průvrtu v hřebenu	10

Na následujícím obrázku (obrázek 34) lze vidět závislost činitele odrazu na frekvenci. Hodnota PSV se pohybuje kolem 1,5 v celém frekvenčním pásmu (Obrázek 3535). Pouze na počátku frekvenčního pásma dosahuje PSV větších hodnot. Poté se ale drží pod hodnotou 1,5 až téměř do 10 GHz.

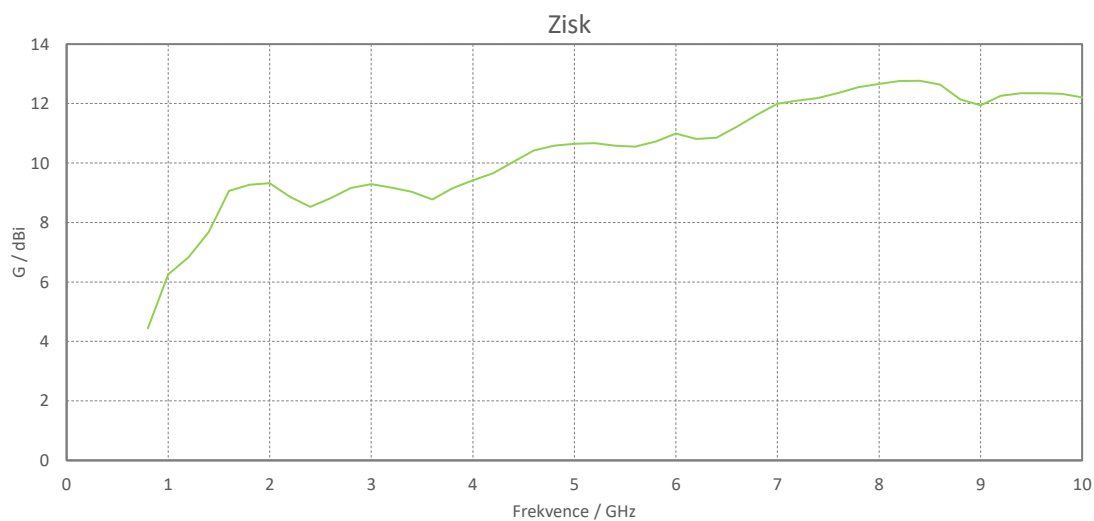


Obrázek 34: Činitel odrazu výsledné struktury antény



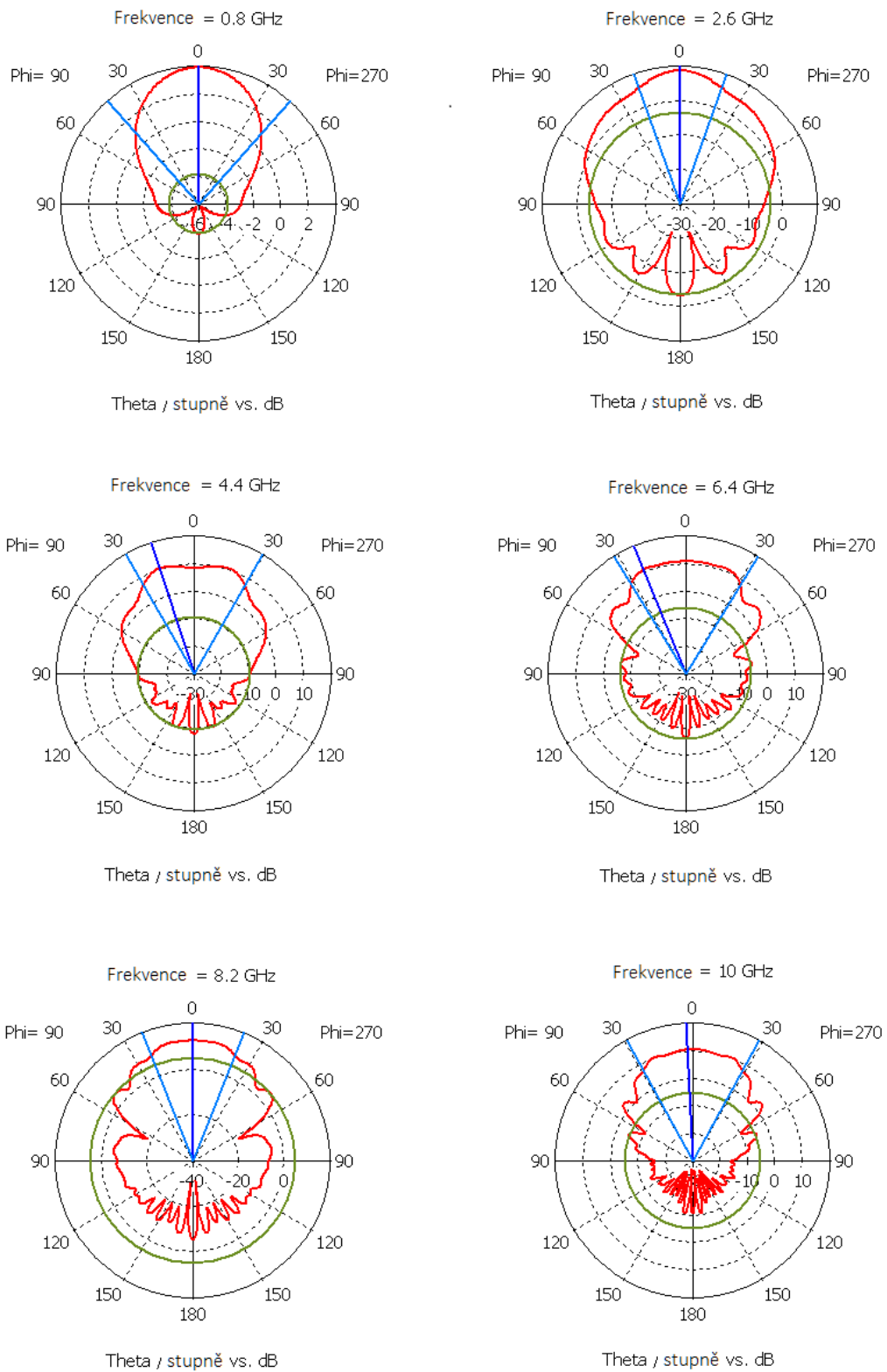
Obrázek 35: Poměr stojatých vln výsledné struktury

Lze také říct, že zisk antény se zvyšuje s rostoucí frekvencí. Na frekvenci 0,8 GHz je jeho hodnota 4,4 dBi, poté rychle stoupá a na frekvenčním rozsahu 1,6 - 4 GHz se jeho hodnota pohybuje kolem 9 dBi. Ve středu kmitočtového rozsahu antény se zisk pohybuje kolem 11 dBi a na konci kmitočtového pásma (7 – 10 GHz) ještě stoupne nad hodnotu 12 dBi. Maximálního zisku dosahuje anténa na frekvenci 8,2 GHz a to hodnoty 12,7 dBi. Závislost zisku na frekvenci lze vidět na následujícím obrázku (Obrázek 36).

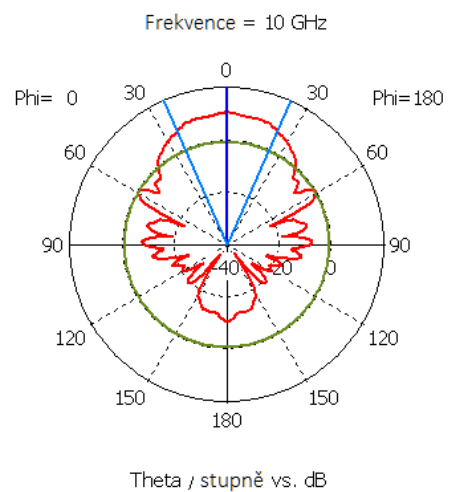
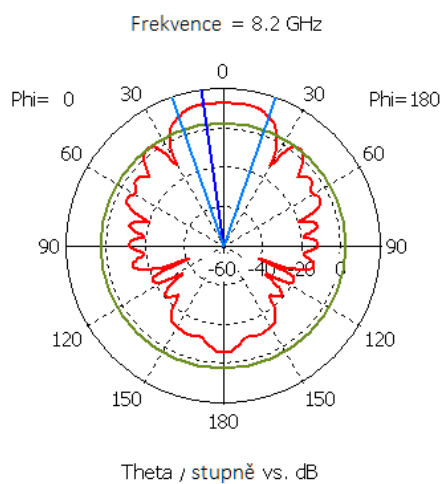
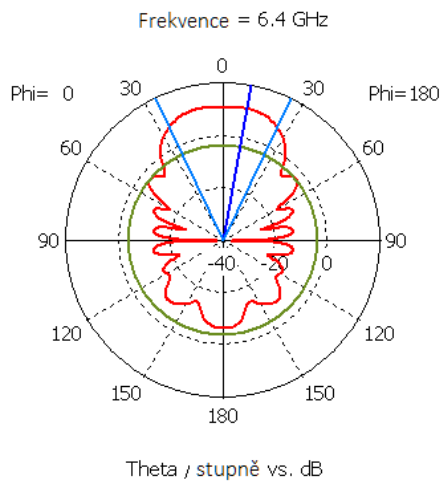
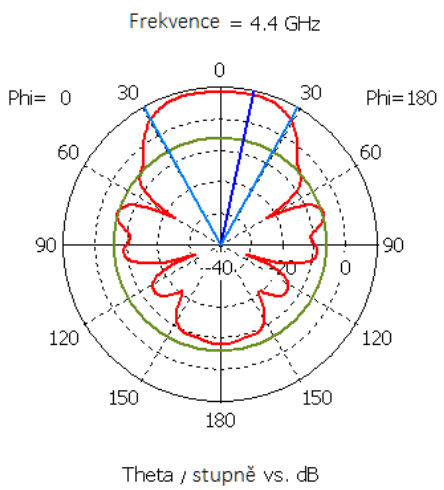
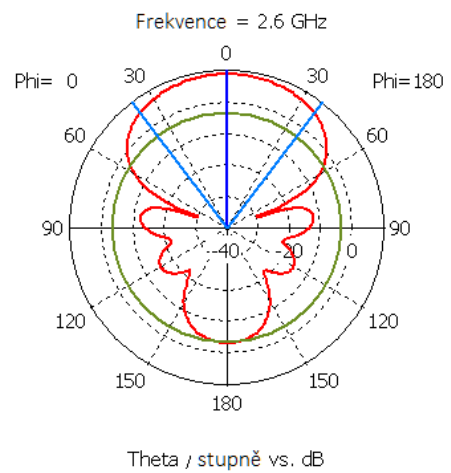
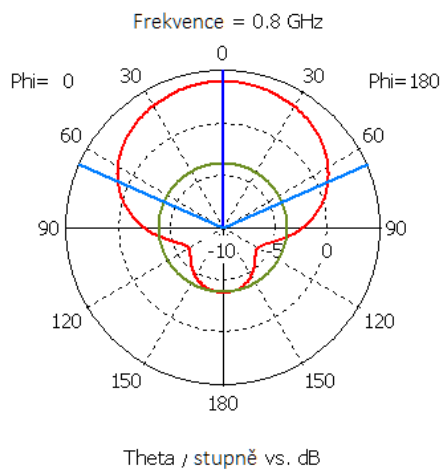


Obrázek 36: Závislost zisku na frekvenci výsledné struktury antény

Na následujícím obrázku lze vidět směrové charakteristiky pro 6 frekvencí z kmitočtového rozsahu 0,8 – 10 GHz. Na Obrázek 37 jsou směrové diagramy pro rovinu E, na obrázku 38 jsou diagramy v rovině H.



Obrázek 37: Směrové charakteristiky v rovině E výsledné struktury antény

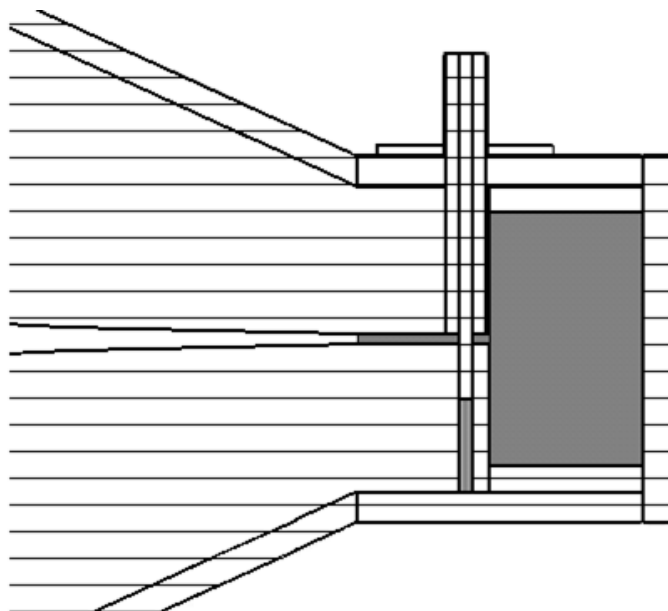


Obrázek 38: Směrové charakteristiky v rovině H výsledné struktury antény

## 5 VÝROBA ANTÉNY

V této kapitole bude popsán postup výroby antény. Bude vysvětleno, z jakých částí se anténa skládá a jak jsou k sobě jednotlivé části připevněny. V této kapitole bude také diskutován vliv nepřesnosti rozměrů antény, které mohou vzniknout při výrobě.

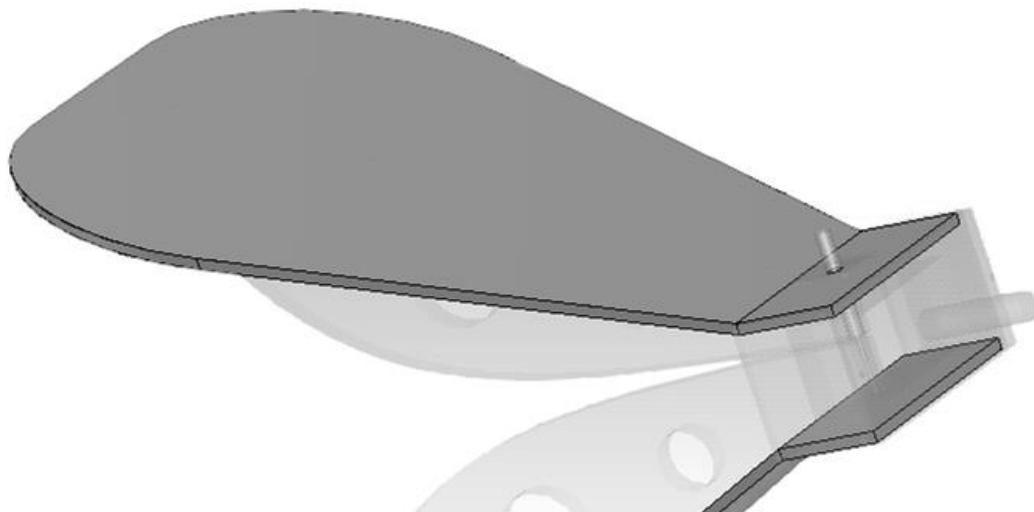
Anténa se bude skládat z několika částí, které budou následně spojeny pomocí šroubů. Nejnáročnější na výrobu budou hřebeny a horní části trychtýře, jelikož tyto části obsahují různá zakulacení. Je tedy požadována vyšší přesnost, proto budou hřebeny i horní stěny trychtýře vyrobeny na zakázku. Hřebeny budou k trychtýři a vlnovodu uchyceny šrouby, proto je nutné do nich vyvrtat díry a následně vytvořit závity. Hřebeny také prochází koaxiální sonda, proto je nutné vyvrtat do hřebenů díry pro její vodiče (obrázek 39). Horním hřebenem je veden jak střední vodič, tak i vnější vodič koaxiálního napáječe, díra je tedy dána poloměrem vnějšího vodiče. Spodním hřebenem je veden jen centrální vodič, proto je průměr díry menší. Nákres hřebenu lze vidět v příloze A.2. Nákres s rozměry konektoru lze, jak již bylo řečeno, také vidět v příloze, a to A.1.



Obrázek 39: Zasunutí koaxiální sondy do hřebenů

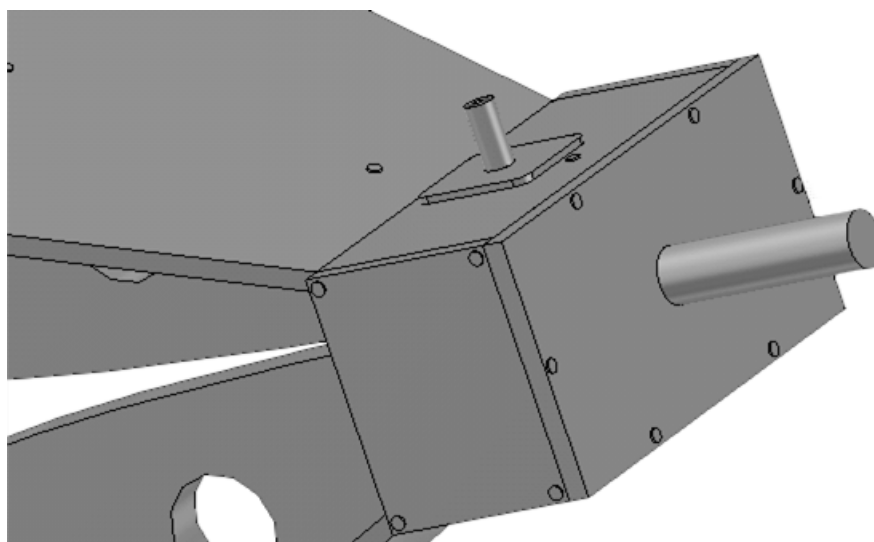
Trychtýř se skládá z horní a spodní části. Každá část trychtýře je vyrobena spolu s horní stěnou vlnovodu jako jeden kus, který bude následně nutno naříznout a ohnout, aby se dosáhlo potřebného rozšíření trychtýře (viz obrázek 40). Ve stěnách trychtýře jsou také předvrtány díry pro následné propojení s ostatními částmi antény. Do horní stěny vlnovodu je taky nutné vyvrtat otvory pro zasunutí a upevnění koaxiálního konektoru. Nákres části trychtýře lze vidět v příloze A.3.



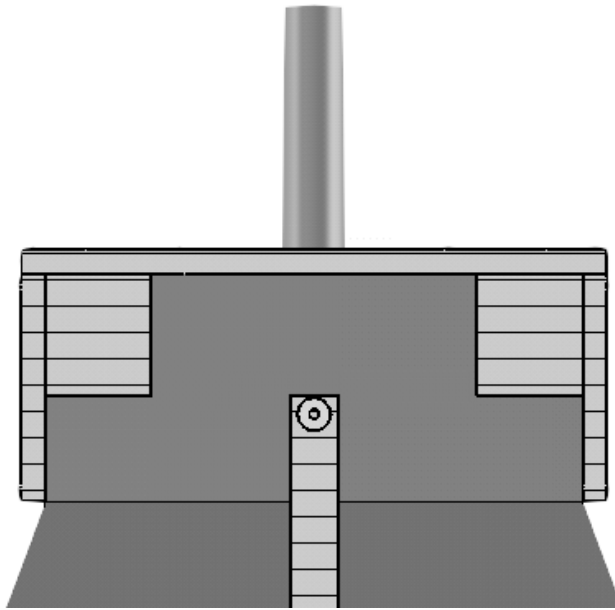


Obrázek 40: Horní část trychtýře s vlnovodem

Zbylé části antény: boční stěny vlnovodu, šterbinu a zadní stěnu s aretačním šroubem lze vyrobit v dílně na ústavu UREL. Jedná se o dva kvádry představující boční stěny vlnovodu o rozměrech 28 x 36 mm a jeden kvádr o rozměru 72 x 36 mm, jeho součástí bude také šroub pro uchycení antény, který má průměr 8 mm. Poslední částí je šterbina. Šterbinu představuje kvádr, který má uvnitř výřez ve tvaru menšího kvádru. Vnější kvádr má rozměr 66 x 30 mm, vnitřní výřez 40 x 25 mm. Na obrázku 41 lze vidět, jak budou jednotlivé kusy propojeny. Podélný řez zadní částí antény lze vidět na obrázku 42. Nákrasy těchto částí (bočních stěn, zadní části se šroubem a šterbiny) lze vidět v přílohách A.4, A.5 a A.6.



Obrázek 41: Propojení zadní části antény

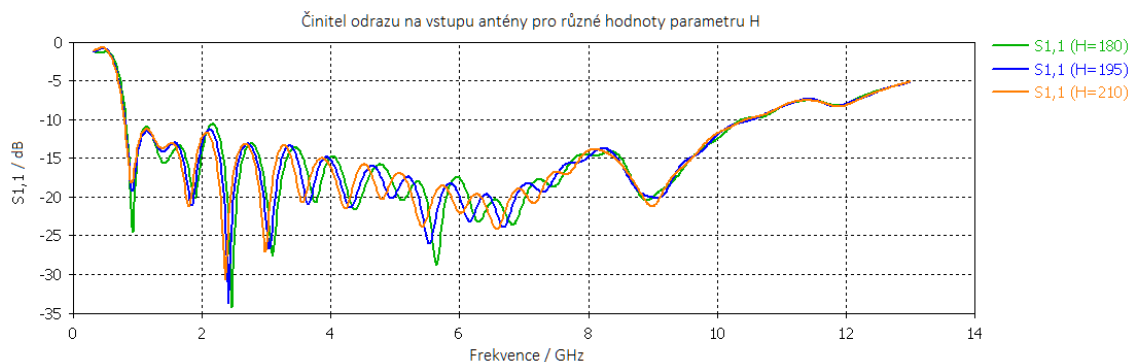


Obrázek 42: Podélný řez zadní částí antény (horní pohled)

## 5.1 Vliv nepřesnosti rozměrů na parametry antény

Jelikož se při výrobě nebo následné konstrukci mohou vyskytnout odchylky od rozměrů získaných simulací, je nutné zjistit, jaký vliv by tyto nepřesnosti měli na výsledný činitel odrazu antény.

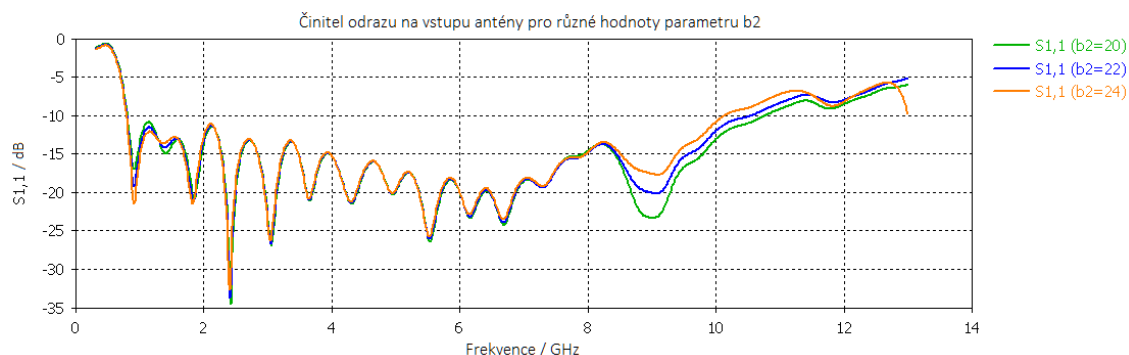
Jednotlivé rozměry ovlivňují výsledné parametry různě. Některé parametry mají na činitel odrazu žádný nebo zanedbatelný vliv, u jiných parametrů je naopak přesnost velmi podstatná. U rozměrů trychtýře ( $Lh$ ,  $W$ ,  $H$ ) je povolena celkem velká nepřesnost (v řádu jednotek milimetrů) aniž by to mělo zásadní vliv na parametry antény. Na obrázku 43 lze vidět, jaký vliv má změna parametru  $H$ , tedy výška trychtýře na  $S_{11}$ . Pro lepší názornost jsou voleny tři hodnoty; skutečná velikost  $H$  jako centrální hodnota a od ní dvě hodnoty, které mají odchylku 15 mm na obě strany od této centrální.



Obrázek 43: Vliv změny parametru  $H$

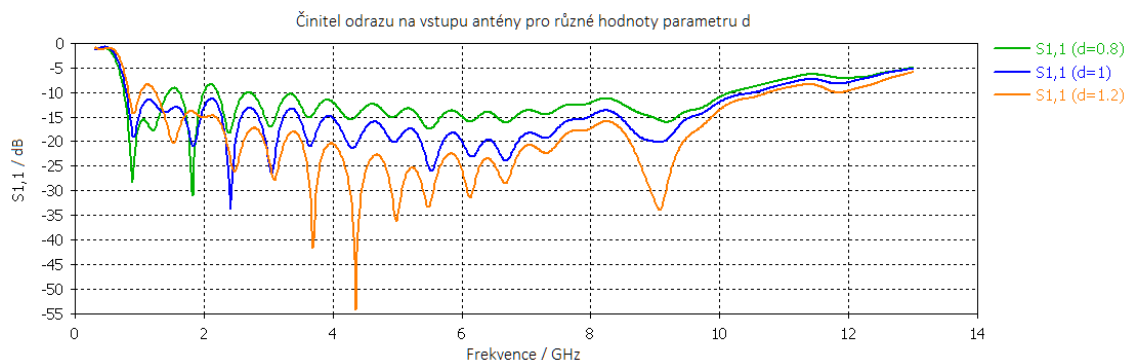
Dalšími parametry, který příliš neovlivňují vlastnosti antény, jsou rozměry vlnovodu a štěrbin ( $a$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ). Parametr  $b$  nelze měnit, jelikož musí být zachován

rozměry koaxiálního konektoru. Šířka vlnovodu  $a$  má pouze drobný vliv na horní část frekvenčního pásma (8 – 10 GHz), rozměry štěrbin  $a_2$  a  $b_2$  ovlivňují impedanční přizpůsobení na počátku a ke konci frekvenčního rozsahu, pro ukázkou na obrázku 44 lze vidět vliv  $b_2$  na činitel odrazu antény.



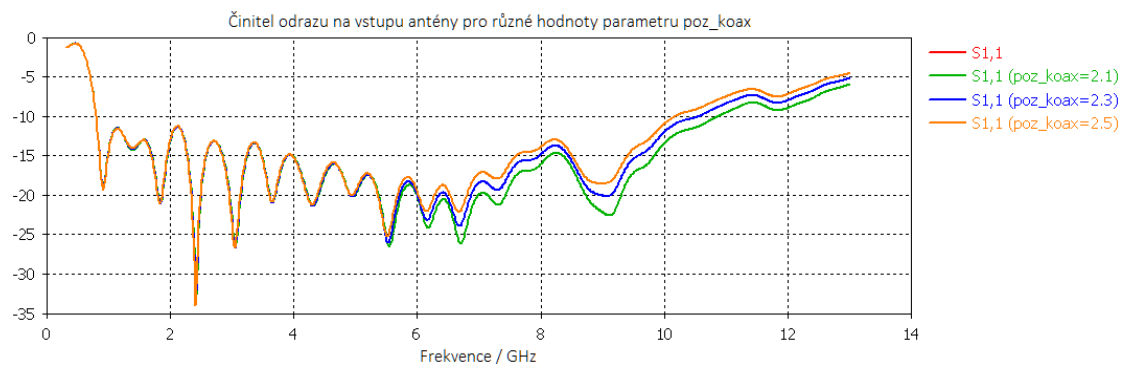
Obrázek 44: Vliv změny parametru  $b_2$

Naopak parametr, který má na činitel odrazu velký vliv je velikost mezery mezi hřebeny  $d$ . I při drobné změně tohoto parametru lze pozorovat velké rozdíly v průběhu  $S_{11}$ . Průběhy  $S_{11}$  pro tři hodnoty  $d$  lze vidět na obrázku 45. Nicméně při výrobě hřebenů je kladen velký důraz na přesnost, tudíž by se parametr  $d$  neměl příliš odchylovat od vypočítané hodnoty.



Obrázek 45: Vliv změny parametru  $d$

Vliv na parametr  $S_{11}$  má také pozice koaxiálního vodiče v hřebenu. Koaxiální vodič prochází středem hřebenu, jeho pozice se mění vůči počátku vlnovodu H (tedy ve směru osy  $z$ ). Jak lze vidět na obrázku 46, změna pozice koaxiálního kabelu ovlivňuje pouze horní polovinu frekvenčního pásma (od cca 5,5 GHz). Lepšího impedančního přizpůsobení je dosaženo při pozici blíže ke hraně hřebene, nicméně kvůli rozměru vnějšího vodiče koaxiálního kabelu není možné tento parametr zmenšovat neomezeně. Navíc pokud by byla mezera mezi koaxiálním vodičem a hranou příliš tenká, mohlo by to způsobit problémy při výrobě.

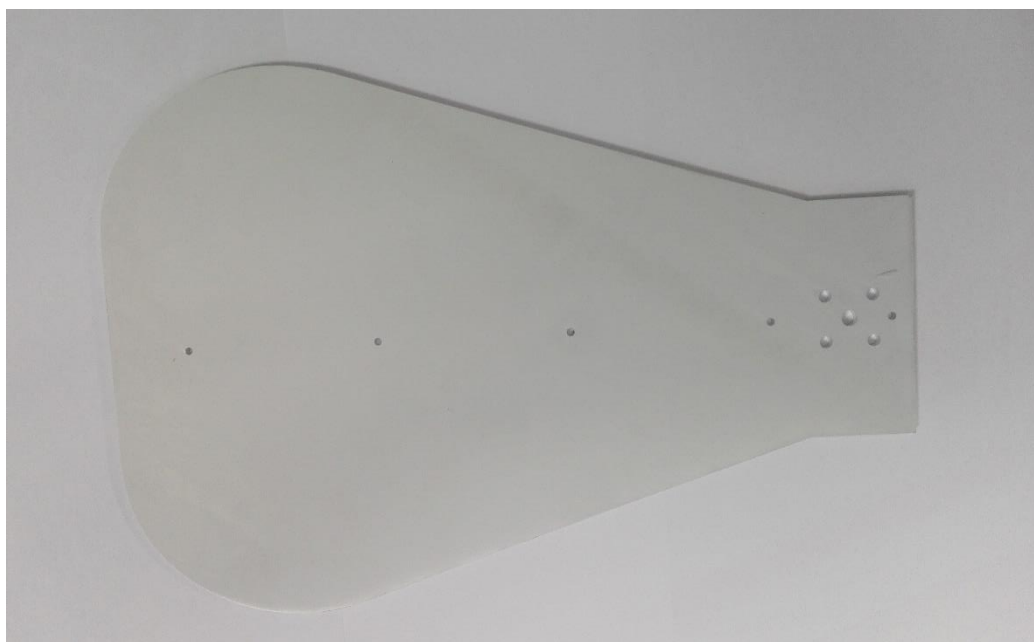


Obrázek 46: Vliv změny parametru poz\_koax

## 6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou srovnány výsledky simulací antény pomocí různých typů elektromagnetických řešičů. Ke srovnání výsledků frekvenčním řešičem se přistoupilo, protože anténa nestihla být zkompletována do termínu měření parametrů. Hlavním problémem při výrobě antény bylo ohnutí horní a spodní části trychtýře s vlnovodem. Při ohýbání této části antény je riziko prasknutí materiálu, proto bylo nutné ohyb nejdříve vyzkoušet nanečisto. Navíc ohyb musí přesně přilehnout k vyrobenému hřebenu, tudíž je důležité dobře naměřit místo ohybu. Dalším problémem je příliš tenká stěna u konce hřebene, kudy má být vést konektor. Zde je také riziko prasknutí materiálu. Výroba antény nejspíš měla být zahájena mnohem dříve, aby se stihla celá anténa zkompletovat. Vyrobení horní a spodní části trychtýře s vlnovodem a hřebenu v externí firmě trvalo asi čtyři týdny a teprve poté byla zadána výroba v dílně, kde došlo ke komplikacím s ohýbáním trychtýře. Pravděpodobně se měla nechat větší časová rezerva pro případné vniklé komplikace, a tudíž se měla zadat výroba části trychtýře dříve.

Na následujících obrázcích lze vidět vyrobené části antény – trychtýř s horní stěnou vlnovodu (obrázek 47), hřeben (obrázek 48) a také obrázek ohybu trychtýře spolu s přiloženým hřebenem (obrázek 49).



Obrázek 47: Trychtýř se stěnou vlnovodu



Obrázek 48: Vyrobený hřeben

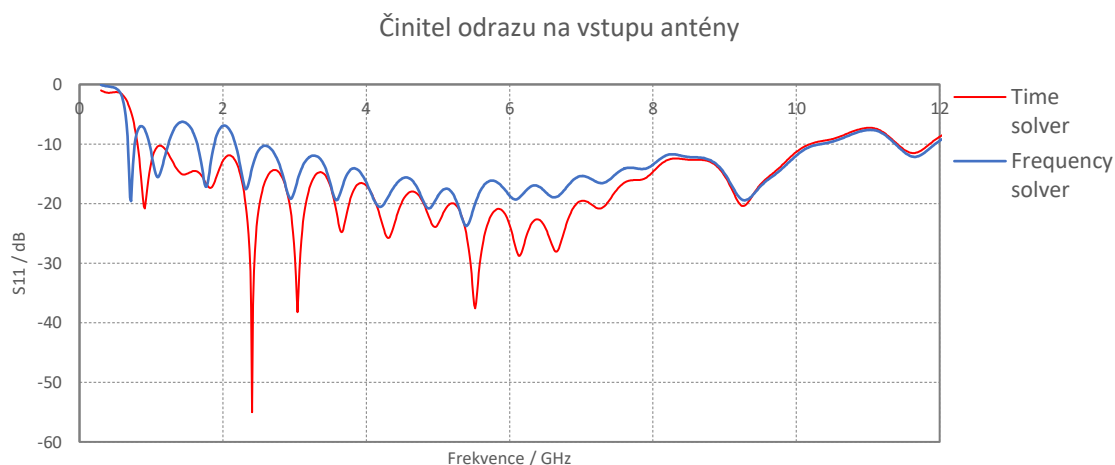


Obrázek 49: Ohnutý trychtýř s přiloženým hřebenem

Anténa byla simulována v programu CST Microwave studio. Pro srovnání byly použity dva různé řešiče – časový (Time domain solver), ve kterém byla anténa navrhována, a frekvenční (Frequency domain solver). Všechny elektromagnetické výpočetní řešiče jsou založeny na výpočtu Maxwellových rovnic v různých formách. U kmitočtové oblasti je počítáno rozložení elektromagnetického pole v ustáleném harmonickém stavu. Analýza v kmitočtové oblasti je poměrně snadná, nicméně má své nevýhody. Z teoretického hlediska ustálený harmonický stav neexistuje, elektromagnetické pole by totiž muselo v tomto stavu existovat nekonečně dlouho, časové omezení by způsobilo vznik dalších spektrálních složek. Z praktického pohledu je ale za harmonické pole považováno to, které trvá dostatečně dlouho. Pro analyzování

struktury v širokém frekvenčním pásmu je nutné provádět analýzu na několika frekvencích, což není efektivní. U analýzy v časové oblasti se nepředpokládá ustálený harmonický stav, proto je tento typ analýzy matematicky složitější a náročnější na výpočetní výkon. Při analýze v časové oblasti je struktura buzena úzkým budícím impulzem, elektromagnetické pole má proto konečné trvání a konečnou energii. Rozložení elektromagnetického pole v budoucím okamžiku se navíc počítá z rozložení pole předchozích okamžiků. Tato analýza tedy bývá efektivnější. [12]

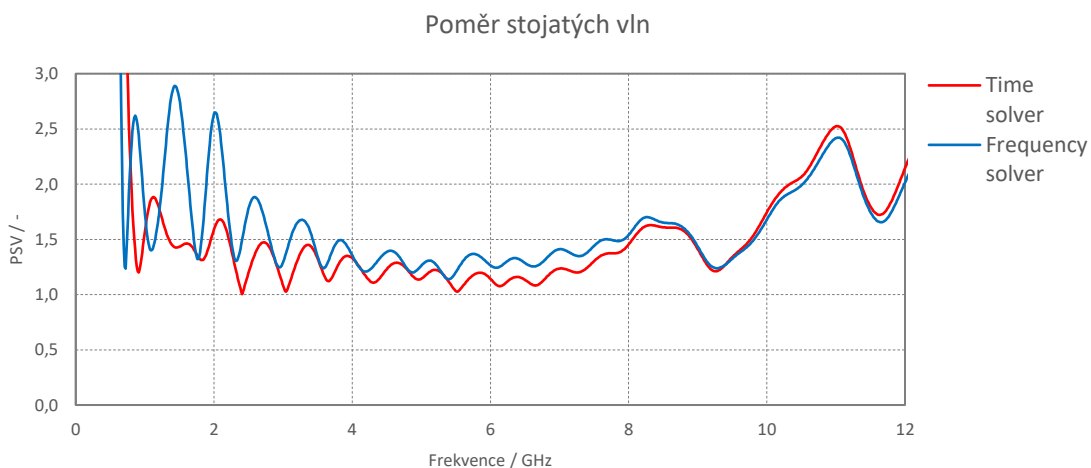
Srovnání simulací parametru  $S_{11}$  pomocí časového a frekvenčního řešiče je vidět na obrázku 50.



Obrázek 50: Srovnání  $S_{11}$  pro Time domain solver a Frequency domain solver

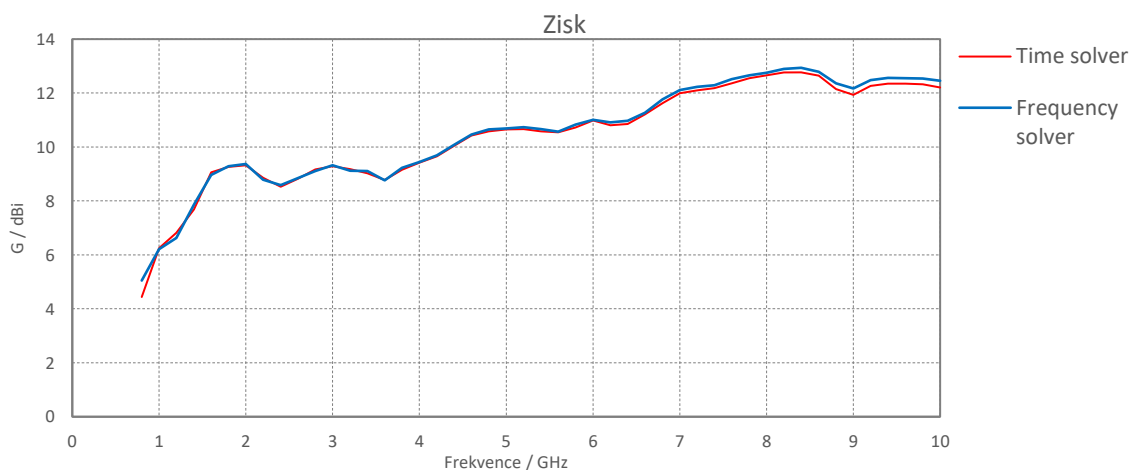
Parametr  $S_{11}$  je pro jednotlivé simulace různými řešiči rozdílný. V celém frekvenčním rozsahu dosahuje hodnota  $S_{11}$  počítána pomocí frekvenčního řešiče větších hodnot než při použití časového řešiče. Na počátku frekvenčního rozsahu není dokonce činitel odrazu menší než  $-10$  dB, ale dosahuje hodnoty  $-7$  dB. Důvodem může být například příliš málo iterací při nastavení simulace ve frekvenční doméně. Nicméně z teorie výše je známo, že pro širokopásmové struktury je lepší použít výpočet v časové doméně, tudíž lze i hodnoty parametru  $S_{11}$  získané simulací pomocí časového řešiče považovat za průkaznější.

Na obrázku 51 je ještě možné vidět poměr stojatých vln pro srovnání obou řešičů.



Obrázek 51: Srovnání PSV pro Time domain solver a Frequency domain solver

Na obrázku 52 lze vidět srovnání zisku pro výpočty v časové a frekvenční doméně. Lze vidět, že hodnoty zisku jsou shodné pro oba typy elektromagnetického řešiče, viditelné jsou pouze drobné odchylky na vyšších frekvencích.



Obrázek 52: Srovnání zisku pro Time domain solver a Frequency domain solver



# ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout hřebenovou anténu pro EMC měření. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Nejprve se práce zaměřuje na teorii antén a popisuje teoreticky návrh hřebenové trychtýřové antény. Druhá část práce je zaměřena na návrh antény, její simulaci v programu CST Microwave Studio a následnou výrobu antény. V poslední části práce je srovnání simulací antény pomocí různých elektromagnetických řešičů.

Anténa je navržena pro frekvenční pásmo 0,8 - 10 GHz. Postupně byly navrhovány jednotlivé části antény. Nejprve byl navržen vlnovod, do kterého byly poté přidány hřebeny a přechod z koaxiálního vedení. Dalším krokem byl návrh trychtýře s následným přidáním hřebenů. Nakonec byly dané struktury spojeny a byla simulována základní struktura antény. Po úpravách této struktury bylo dosaženo následujících výsledků. Činitel odrazu na vstupu je v daném kmitočtovém pásmu menší než 10 dB, zisk se pohybuje v rozmezí hodnot 10 – 20 dBi. Ze směrových charakteristik je patrné, že byly dostatečně potlačeny boční laloky.

Další část práce se zabývá modifikacemi antény. Struktura byla upravena tak, že byly odstraněny boční stěny trychtýře a také byly zakulaceny hrany trychtýře, čímž bylo dosaženo lepšího impedančního přizpůsobení. V neposlední řadě byly vytvořeny průvrty do hřebenů antény a to z důvodu odlehčení celé struktury. Těmito úpravami sice došlo ke snížení zisku na hodnoty kolem 13 dBi, ale také došlo ke zmenšení celé struktury a tudíž i ke snížení hmotnosti antény.

Při srovnání výsledků dvou různých řešičů (časového a frekvenčního) lze vidět rozdíly. U výsledků z frekvenčního řešiče nedosahuje na začátku frekvenčního pásma činitel odrazu hodnoty menší než -10 dB. Nicméně pro řešení širokopásmových antén je lepší použít výpočet v časové doméně, proto lze považovat výsledky z časového řešiče za lépe vypovídající.

Antény se, bohužel, nestihly zkompletovat v dílně do termínu měření parametrů antén. Jakmile ale budou antény vyrobeny, budou sloužit ke měření EMC v laboratoři FEKT VUT v Brně na ústavu radioelektroniky.

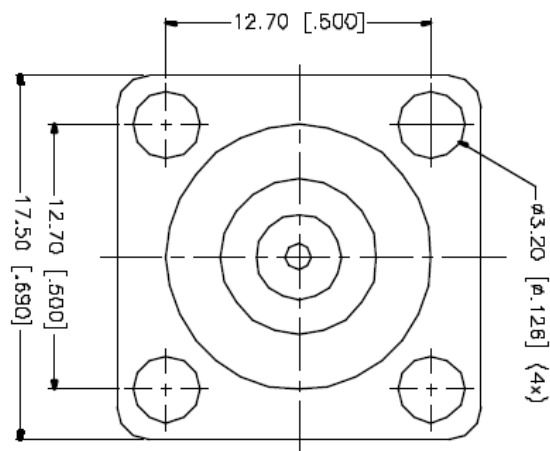
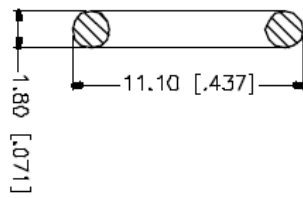
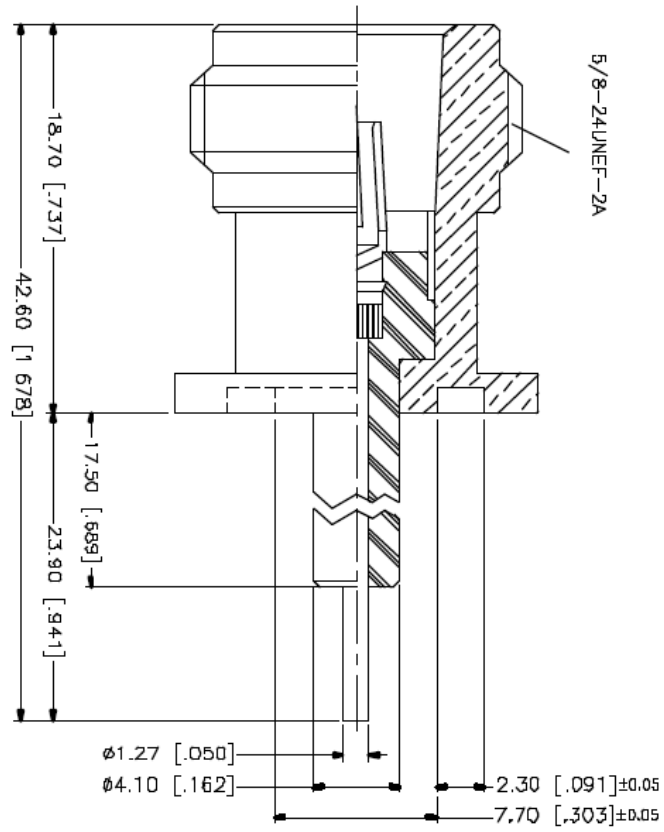
# LITERATURA

- [1] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 047166782X.
- [2] LÁČIK, J. Šíření rádiových vln a užití kmitočtového spektra. VUT Brno – přednáška č. 8 k předmětu Návrh antén a rádiových spojů, 28s.
- [3] MILLIGAN, Thomas A. *Modern antenna design*. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [4] RAIDA, Z. Vlnovody. VUT Brno – přednáška č. 7 k předmětu Elektromagnetické vlny, antény a vedení, 16s.
- [5] *TEmodes* [online]. In: . [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <https://image.slidesharecdn.com/mwday1-140820165410-phpapp02/95/mw-day-1-11-638.jpg?cb=1408553879>
- [6] *Horn antennas* [online]. In: . [cit. 2017-12-2]. Dostupné z: [http://www.radio-electronics.com/info/antennas/horn\\_antenna/horn\\_antenna.php](http://www.radio-electronics.com/info/antennas/horn_antenna/horn_antenna.php)
- [7] *DRHA* [online]. In: . [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://static.webshopapp.com/shops/041682/files/020326219/com-power-double-ridged-horn-antenna-model-ah-118.jpg>
- [8] *QRHA* [online]. In: . [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://www.rfspin.cz/uploads/images/c682fbc1563918dce280397792207d56b261630/qrh11-800-lg.jpeg>
- [9] GHORBANI, M. a A. KHALEGHI. *Double Ridged Horn Antenna Designs for Wideband Applications*.
- [10] M. ABBAS-AZIMI, F. ARAZM AND R. FARAJI-DANA. *Design and optimisation of a high-frequency EMC wideband horn antenna*.
- [11] *Waveguides*[online]. In: [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/tutorial/waveguides/waveguide.php>
- [12] RAIDA, Zbyněk. *Mikrovlnné struktury z netradičních materiálů*. V Brně: Vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-214-4419-5

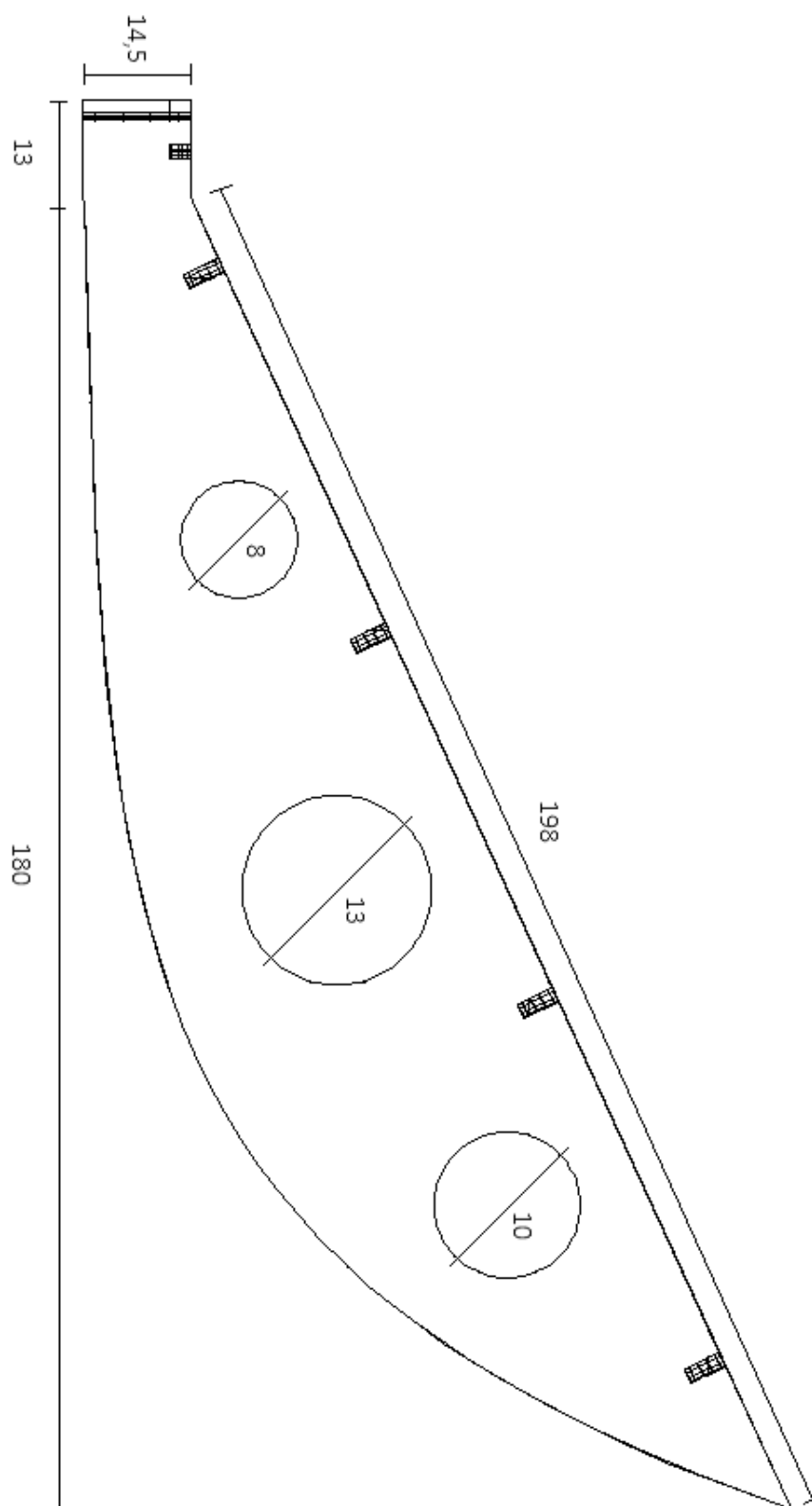
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A.1 Konektor 172224 .....</b>	<b>49</b>
<b>A. 2 Nákres horního hřebene pro výrobu .....</b>	<b>50</b>
<b>A. 3 Nákres horní strany trychtýře pro výrobu .....</b>	<b>51</b>
<b>A. 4: Nákres boční stěny vlnovodu .....</b>	<b>52</b>
<b>A. 5: Nákres štěrbin .....</b>	<b>52</b>
<b>A. 6: Nákres zadní části vlnovodu .....</b>	<b>53</b>

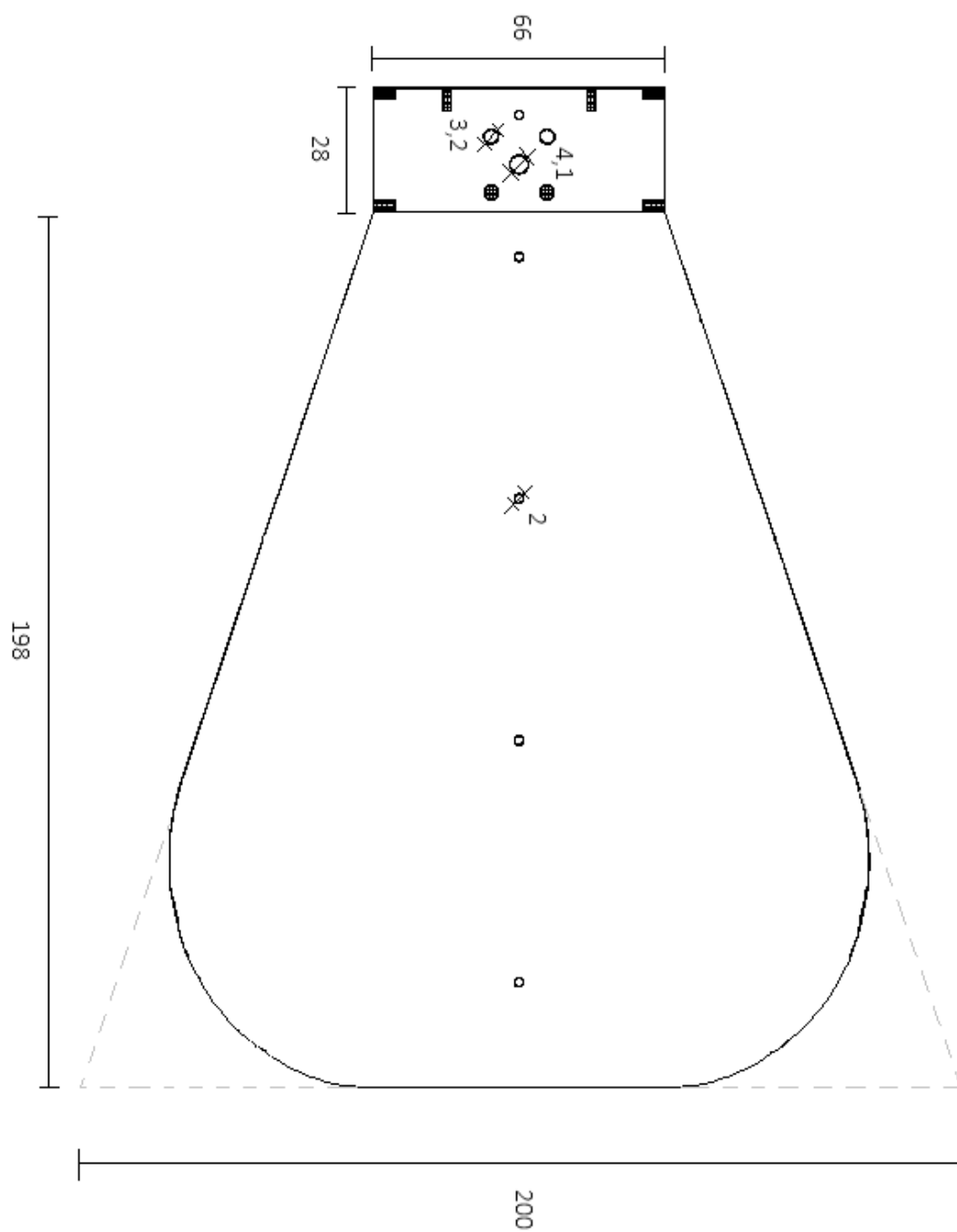
## A.1 Konektor 172224



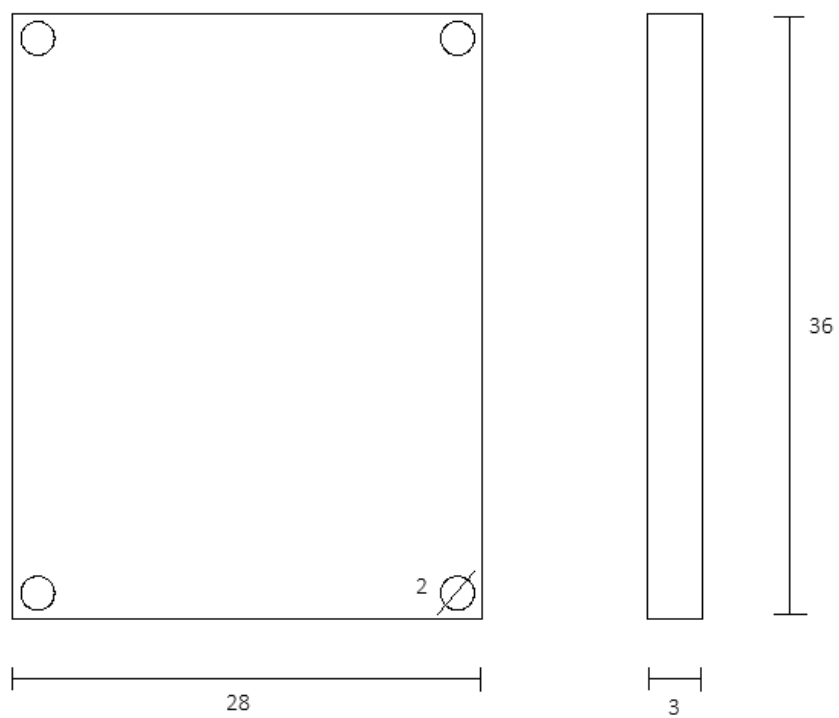
## A. 2 Nákres horního hřebene pro výrobu



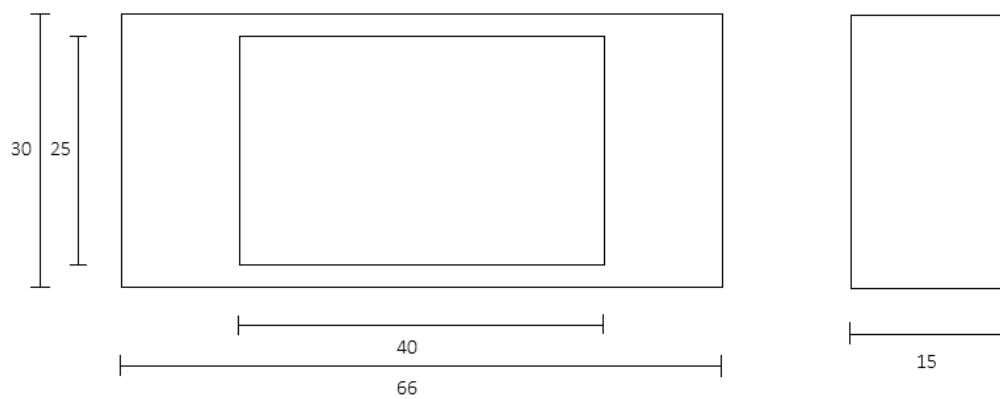
### A. 3 Nákres horní strany trychtýře pro výrobu



#### A. 4: Nákres boční stěny vlnovodu



#### A. 5: Nákres štěrbiny



## A. 6: Nákres zadní části vlnovodu

