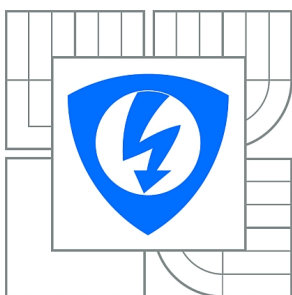




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OZAŘOVAČ PARABOLICKÉ ANTÉNY V PÁSMU X

PARABOLIC ANTENNA FEED FOR X BAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR LECIÁN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV KASAL, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Petr Lecián

ID: 78521

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Ozařovač parabolické antény v pásmu X

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte principy a možnosti realizace ozařovače s kruhovou polarizací pro parabolickou anténu. Seznamte se s programem Ansoft HFSS a Designer. Navrhněte ozařovač antény s $f/d = 0,4$ v pásmu X (10,4 GHz). V úvahu připadají řešení s upraveným ústím vlnovodu nebo planární struktury a to v přímém i Cassegrainově uspořádání. V prostředí programu Ansoft HFSS modelujte vyzařovací charakteristiky pro optimální ozáření parabolického zrcadla s vědomím, že se jedná o přijímací systém družicových signálů s minimální dosažitelnou ekvivalentní šumovou teplotou. Navržený ozařovač realizujte a proměřte jeho parametry a konečně i parametry celého systému včetně parabolického reflektoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TYSL, V. - RŮŽIČKA, V. Teoretické základy mikrovlnné techniky. Praha: SNTL, 1989.

[2] PROCHÁZKA, M.: Primární zářiče pro malé parabolické reflektory. Sdělovací technika, č. 6, 1989.

[3] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. Microstrip antenna design handbook. Boston-London: Artech House, Inc., 2001.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Kasal, CSc.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

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.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Petr Lecián
Bytem: Plačkov 610, Holešov, 769 01
Narozen/a (datum a místo): 11. května 1985 v Přílepych

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Ozařovač parabolické antény v pásmu X

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Miroslav Kasal, CSc.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 21. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Práce řeší návrh neobvyklého ozařovače parabolické antény s kruhovou polarizací signálu. Jedná se o upravené ústí vlnovodu, vlnovod s přepážkou, tzv. septumem.

Současné použití kruhově polarizovaných vln RHCP a LHCP bývá využíváno v aplikacích mikrovlnné komunikace a systémech měření. Polarizátor s přepážkou je pro tuto aplikaci velmi vhodný. Ozařovač se septum přepážkou je čtyřbranné vlnododové zařízení. Čtvercové ústí ozařovače představuje dva porty, protože zde mohou být dva ortogonální módy. Schodovitá přepážka rozděluje ústí vlnovodu do dvou standardních obdélníkových vlnododů. Práce obsahuje popis naladění přepážky a celkový návrh dvou variant řešení ozařovače.

Prostředkem pro návrh a simulaci ozařovače je software Ansoft HFSS. Tento software umí vizualizovat nejen zadaný model ozařovače, ale i průběh elektromagnetického pole vně a v průběhu času.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kruhová polarizace, vlnovod s přepážkou, ozařovač s přepážkou, polarizátor s přepážkou, Ansoft HFSS.

ABSTRACT

The work addresses the unusual proposal feed for parabolic antenna with circular polarization signal. This is a modified waveguide feed, waveguide polarizer with a septum.

Contemporary RHCP and LHCP wave occurs in several applications of microwave communication and measurement system. From this point of view the septum polarizer can be useful. The septum polarizer is a four-port waveguide device. The square waveguide at one end constitutes two ports because it can support two orthogonal modes. A stepped septum divides the square waveguide into two standard rectangular waveguides sharing a common broad-wall. The size of the septum as well as two versions of the waveguides excitation were analyzed and are described in this paper.

Ansoft HFSS is software for design and simulation of feed. This software can visualize not only the specified model feed, but also the course of electromagnetic field in feed and over time.

KEYWORDS

Circular polarization, waveguide with septum, septum feed horn, septum polarizer, Ansoft HFSS.

LECIÁN, P. Ozařovač parabolické antény v pásmu X. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 65 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Kasal, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Ozařovač parabolické antény v pásmu X jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 21. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miroslavu Kasalovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 21. května 2010

.....
podpis autora

OBSAH

1.	ÚVOD	6
2.	KMITOČTOVÉ PÁSMO	7
3.	POLARIZACE SIGNÁLU	8
3.1.	Kruhová polarizace	8
3.2.	Ztráty v polarizacích	8
4.	PARABOLICKÁ ANTÉNA	11
5.	MOŽNOSTI REALIZACE OZAŘOVAČE S KRUHOVOU POLARIZACÍ	14
5.1.	Planární struktury	14
5.2.	Šroubovicová anténa	14
5.3.	Cross-Yagi	15
5.4.	Vlnovodový ozařovač	15
5.4.1.	Jednotlivé části ozařovače	15
5.4.2.	Popis funkce vlnovodového ozařovače s přepážkou	16
6.	MOŽNÉ GEOMETRICKÉ ŘEŠENÍ OZAŘOVAČŮ	18
6.1.	Čtvercové ústí	18
6.2.	Kruhové ústí	18
6.3.	Lichoběžníkový ozařovač	20
7.	MOŽNOSTI BUZENÍ OZAŘOVAČE	21
7.1.	Buzení proudovou sondou	21
7.2.	Buzení vlnovodem	22
8.	PARAMETRY OZAŘOVAČE	24
9.	PROSTŘEDÍ ANSOFT HFSS	26
10.	ZÁKLADNÍ PRVEK OZAŘOVAČE – VLNOVOD	27
10.1.	Simulace vlnovodu	27
11.	SIMULACE OZAŘOVAČŮ	30
11.1.	Ozařovač s čtvercovým ústím	30
11.2.	Dílčí výsledky simulací ozařovače s čtvercovým ústím	33
11.3.	Ozařovač s kruhovým ústím	40
11.4.	Ozařovač s trychtýřovým kruhovým ústím	44
12.	LADĚNÍ OZAŘOVAČE	46
12.1.	Výška schodů	46
12.2.	Tloušťka přepážky	47
12.3.	Posuv přepážkou	49
12.4.	Velikost ústí	50
12.5.	Šikmá přepážka	52
13.	VÝSLEDNÉ ŘEŠENÍ	54
13.1.	Ozařovač s kruhovým průřezem ústí	54
13.2.	Ozařovač s čtvercovým průřezem ústí	57
14.	ZÁVĚR	59
	SEZNAM LITERATURY	60
	SEZNAM ZKRATEK	63
	SEZNAM SYMBOLŮ	64
	SEZNAM PŘÍLOH	65

1. Úvod

Použití schodovité přepážky ve funkci polarizátoru ve vlnovodu je již několik desetiletí známým způsobem převodu lineárně polarizované vlny na kruhově polarizovanou a opačně. Přesto tento systém nikdy nestál v popředí zájmu a není hromadně komerčně využíván. Vše je pravděpodobně zapříčiněno chybějícím exaktním popisem funkce schodovité přepážky. Nejsou objasněny vztahy pro návrh počtu schodů a jejich rozměrů. Stávající konstrukční řešení vycházejí z předchozích návrhů, ty jsou laděny a optimalizovány pro konkrétní potřebu konstruktéra. S nástupem počítačových simulací elektromagnetických polí byl model popsán na jednotlivých rozhraních struktury pomocí matic rozptylových parametrů, diskretizován metodou konečných prvků a dále řešen numerickými metodami. V dnešní době jsou tyto principy integrovány v moderních návrhových a simulačních prostředích jako Ansoft HFSS.

Zde zjišťované zařízení je kombinací polarizátoru a ozařovače parabolického zrcadla. Systém je určen pro komunikaci s družicí na oběžné dráze Země. V průběhu práce bylo zadání dále vedoucím práce upřesňováno. Parabolické zrcadlo je průměru 2 metry s úhlem otevření f/D 0,4. Cassegrainovo uspořádání bylo vyloučeno z důvodu nežádoucího nárůstu složitosti návrhu. Realizace a ověření simulovaných vlastností byly v závěru práce zrušeny kvůli nedostatku času a nedostupnosti vhodných prostor pro měření.

2. Kmitočtové pásmo

Kmitočet 10,4 GHz se nachází ve spektru mezi kmitočty 3 až 30 GHz. Vlny jsou označovány za centimetrové (viz [1]).

V pásmu 10 GHz až 12,5 GHz je provozováno velké množství rozličných služeb, v kterých se může více či méně uplatnit zkoumaný ozařovač. Jedná se o tyto služby: pevné a pohyblivé rádiové spoje, radiolokační služba a amatérské využití. Nejvýznamnější je celosvětové využití družicovou rozhlasovou službou, dále pak radiolokace a vědecké aplikace pro výzkum Země a vesmíru. V pevné službě jsou nejtýpější spoje bod-bod a krátkodobé reportážní spoje.

Frekvence 10,3–10,42 GHz a 10,475–10,588 GHz lze dle ČTÚ a jím daného Radiokomunikačního řádu využívat s všeobecným oprávněním pro přenosy televizních, rozhlasových, hovorových a datových signálů (viz [2]).

Frekvence 10,42–10,476 GHz a 10,588–10,644 GHz jsou určeny pro reportážní spoje přenášející informace z terénu do zpravodajských, rozhlasových a televizních studií. Tyto spoje jsou krátkodobé a lokální.

Amatérským službám jsou přiděleny frekvence 10–10,5 GHz, z toho pak konkrétněji družicové amatérské službě pásmo 10,45–10,5 GHz.

Stejně pásmo je pak přednostně překryto radiolokační službou pro vojenské účely (radary).

Zajímavostí je využití frekvencí 10,5–10,6 GHz v zahraničí pro tzv. „zařízení krátkého dosahu“, která jsou v některých evropských zemích využívána pro systémy řízení dopravy, alarmy, otevírání vrat a dveří a jiné aplikace.

Komunikace s kruhovou polarizací se především používá pro družicové spoje a to ze dvou důvodů. Prvním důvodem je větší odolnost vln proti štěpení v ionosféře a vzniku tzv. Faradayova úniku (viz [3]). Druhým důvodem je fyzická stabilizace těla družice rotací. Při použití lineární polarizace by byl příjem velice náročný, kdežto při součtu fyzické rotace a kruhové polarizace dochází pouze z minimálního posuvu frekvence nosné vlny.

3. Polarizace signálu

3.1. Kruhová polarizace

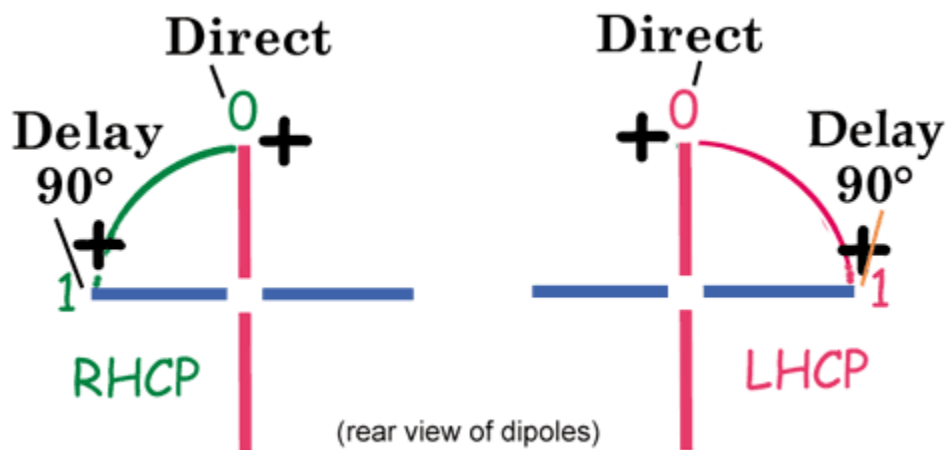
Každý buzený zářič vysílá obecně elipticky polarizovanou elektromagnetickou vlnu. Zvláštním případem eliptické polarizace je polarizace kruhová (viz [4]). Ta nastane, pokud složky E_x a E_y vektoru intenzity elektrického pole mají stejnou amplitudu a signál jedné z nich je fázově posunut o $\frac{\pi}{2}$ radiánů. Smysl otáčení může být dvojitý – levá nebo pravá (LHCP – left hand circular polarization, RHCP – right hand circular polarization) viz obr. 3.1.

Kvalita kruhové polarizace je posuzována tzv. axiální poměrem AR

$$AR = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, \quad (3.1)$$

kde E_{\max} a E_{\min} jsou maximem a minimem intenzity elektrické složky pole.

Ideálním případem je 1, tomuto stavu náleží název kruhová polarizace. Někdy je hodnota vyjadřována v dB míře, ideálem je tedy 0 dB. Avšak z důvodu nedokonalostí v buzení a konstrukci zářičů se tomuto stavu můžeme pouze snažit přiblížit. Proto bývají někdy uváděny tyto polarizace jako RHEP (right hand elliptically polarized) a LHEP (left hand elliptically polarized).



Obr. 3.1: Určení směru rotace (převzato z [5]).

3.2. Ztráty v polarizacích

Ztráty při lineární polarizaci jsou udávány tzv. Polarization Loss Factor jenž je

$$PLF = \cos^2(\theta), \quad (3.2)$$

kde θ prezentuje úhel mezi rovinami polarizace vysílací a přijímací antény (viz [6]). Pro výpočet je vhodné uvažovat interval axiálního poměru AR, kdy RHCP je záporné (-1), lineární

polarizace (speciální případ) je nulové a LHCP je kladné (+1) (viz [7]). Polarizační ztráty při oválné (eliptické) polarizaci obou antén jsou počítány z jejich axiálních poměrů dle vztahu

$$PLF(dB) = 10 \log \left[\frac{1 + \rho_T^2 \rho_R^2 + 2\rho_T \rho_R \cos 2\theta}{(1 + \rho_T^2)(1 + \rho_R^2)} \right], \quad (3.3)$$

kde $\rho_T = (AR_T + 1)(AR_T - 1)$ je kruhovost vysílané vlny
 a $\rho_R = (AR_R + 1)(AR_R - 1)$ je kruhovost přijímací antény.

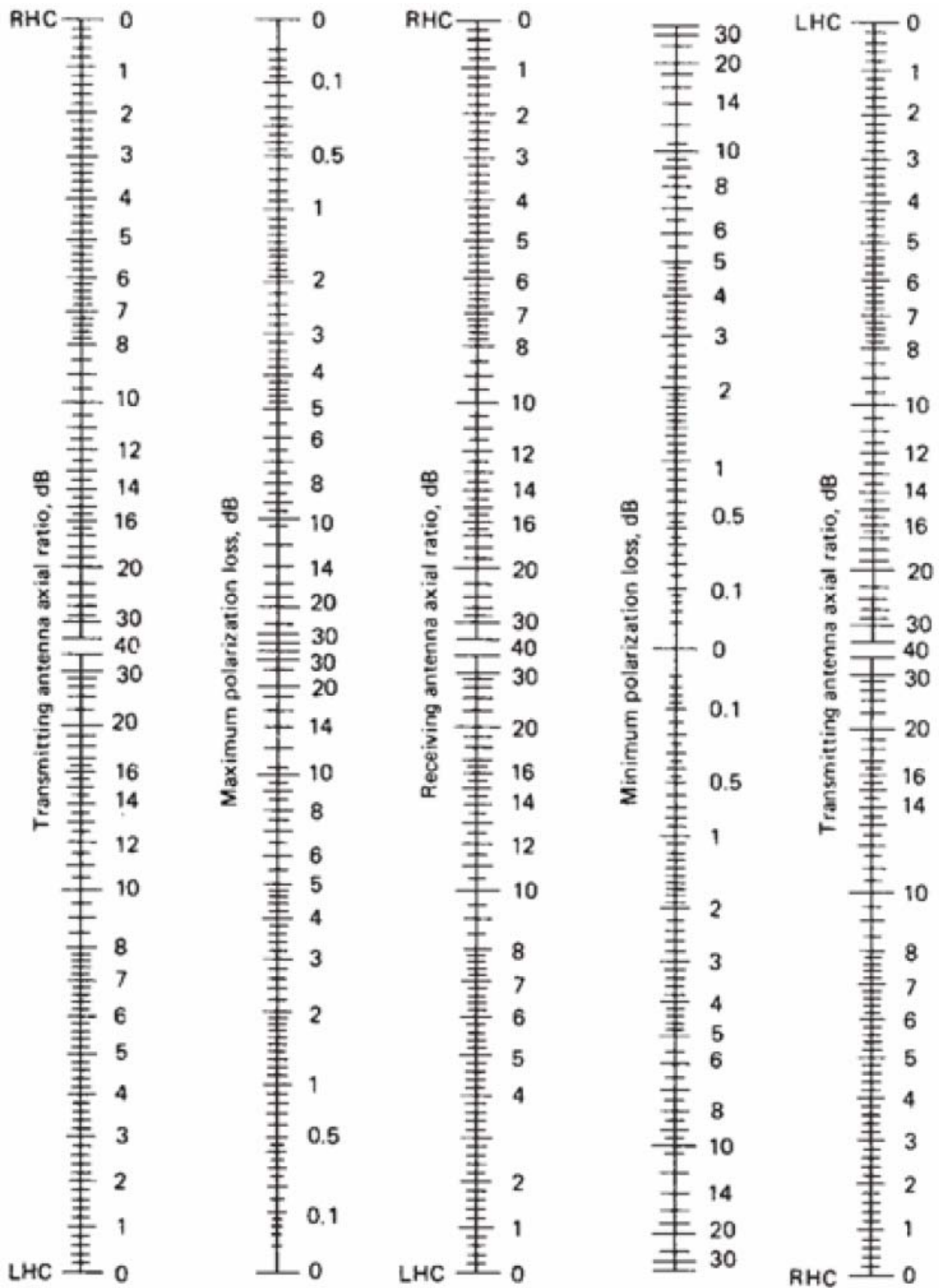
Ztráty při souhlasné orientaci polarizací jsou označovány jako co-polarizační, protiběžné pak cross-polarizační.

Cross-polarizační složky (rotují opačně) určují ztráty, tedy omezení zisku na portu přijímače. Jedná se o příjem regulérně přenášené informace (signálu), ale opačně polarizované na daném portu. Příkladem: chceme přijímat LHC na LHC portu ale parazitně je zde přítomen i stejný RHC signál. Toto vzniká z důvodu zakřivení parabolické antény a jejím omezeným rozměrům. V případě nekonečně velké dokonale vodivé plochy a ideálních parametrů zářiče by tyto cross-polarizační složky nevznikly (symetrické rozměry zářiče, axiální poměr 1 na každém portu, umístění zářiče v ohnisku paraboly). Dalším zdrojem cross-polarizačních produktů je přepážka v ozařovači a povrchové proudy na otevřeném ústí ozařovače.

Co-polarizační a cross-polarizační produkty mají celkově vliv na směrovou vyzařovací charakteristiku sestavy, proto lze určit směrovost těchto faktorů. Pokud se mění úhel složek vektoru elektrické intenzity od 90° k 0° co-polarizační složky zanikají až k 0. V tomto případě se jedná o příjem lineárně polarizované vlny na kruhově polarizovaném přijímači s maximem zisku -3 dB oproti dipólu.

Tyto výpočty jsou v praxi nepřehledné, proto je výborným pomocníkem grafická pomůcka viz obr. 3.2.

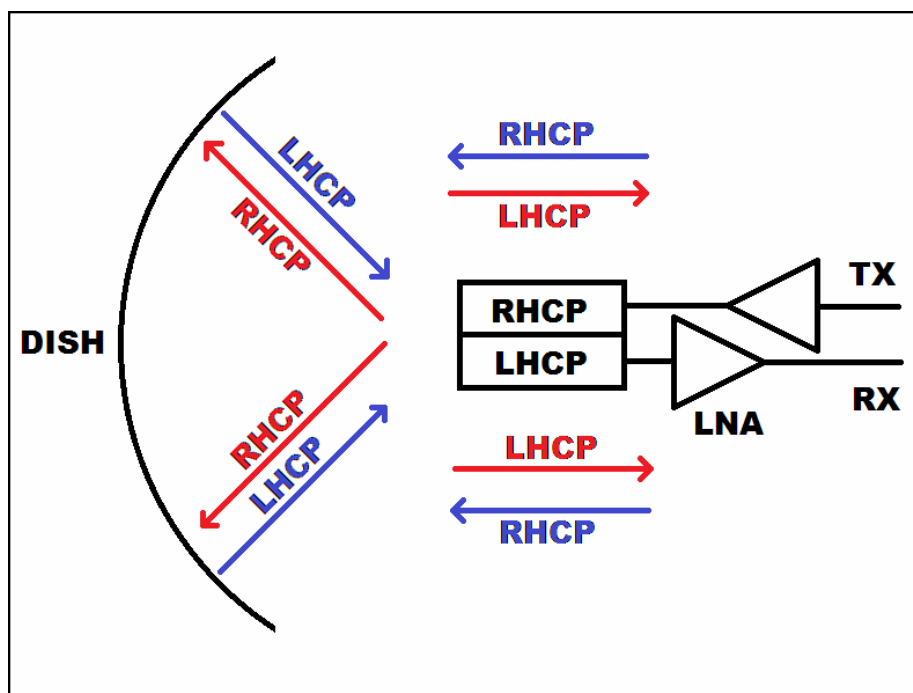
Příklad odečtení: vysílací anténa má AR = 2 dB pro RHC, přijímací AR = 1 dB pro RHC. Ztráty špatným polarizačním přizpůsobením jsou přibližně 0,15 dB.



Obr. 3.2: Pomůcka pro odečtení polarizačních ztrát (převzato z [7]).

4. Parabolická anténa

Parabolická anténa soustřeďuje intenzitu elektromagnetického pole dopadajícího na plochu ústí do ohniska na anténku přijímače. Či naopak zvětšuje průměr vysílacího svazku malého ozařovače na průměr velikosti svého ústí. Pracuje tedy stejně jako optická čočka. Slučuje přicházející rovinnou vlnu do malého prostoru v ohnisku, tím pasivně zesiluje přicházející signály na přijímači (viz [3]). Při vysílání je svazek s půlkulovou sférickou vyzařovací charakteristikou převeden na svazek (paprsek) přímé rovinné vlny s velmi úzkou směrovostí.



Obr. 4.1: Uspořádání soustavy ozařovače a parabolického zrcadla.

Parametry paraboly: – ohnisková vzdálenost F ,
– velikost ústí D .

Při dosazení těchto parametrů do rovnice (4.1) získáme údaj o otevření ústí paraboly.

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\psi_0}{2}\right) = \frac{D}{4f} \quad (4.1)$$

Správné ozáření paraboloidu je důležité pro výslednou směrovou charakteristiku soustavy a její celkovou účinnost. Ozařovač by měl mít šířku vyzařování shodnou s úhlem otevření ústí pro přesné nasvícení plochy parabolického zrcadla. Při menším úhlu dojde k nedosvícení plochy (užší vysílací svazek) a uplatnění postranní laloků, pokud jsou u použitého ozařovače nad tímto uvažovaným úhlem v charakteristice přítomny. Nebo k přesvícení, čímž ztrácíme část výkonu a účinnost soustavy klesá.

V praxi se navrhuje osvětlení paraboly tak, aby intenzita k okrajům klesala a tím byl upřednostněn hlavní lalok svazku a vedlejší laloky byly potlačeny. Požadovaný pokles oproti středu bývá přibližně -10 dB. Pro větší potlačení více.

Samozřejmě je potřeba pamatovat že všechny druhy ozařovačů neprodukují (přibližně) sférickou vlnu.

Dalším aspektem práce s parabolickým reflektorem je odraz části energie ozařovače od středu reflektoru a její návrat k ozařovači. Kruhově polarizovaná vlna se odráží od středu reflektoru, mění smysl otáčení polarizace a vrací se zpět do ozařovače. Tato odražená energie zhoršuje parametry ozařovače, zejména jeho impedanční přizpůsobení.

Vyzařovací diagram soustavy je ovlivňován i konstrukcí ozařovače/přijímače v ohnisku.

Ten musí být fyzicky řádně upevněn, aby nedocházelo k rozladování rozličnými vlivy venkovního prostředí pomocí jednoho či více ramen. Stejný požadavek platí pro reflektor samotný, který by měl být vyroben z patřičně tuhého materiálu, případně i vybaven zabudovaným vyhříváním pro odstranění sněhu v zimním období při větších elevačních úhlech. Reflektor by měl splňovat požadavky na kvalitu parabolického průběhu tvaru a splňovat požadavky homogenního dobře vodivého materiálu. Určitě by neměl být ze síťovitého materiálu.

Dále pak tělo ozařovače, přírodní vodiče, nebo přímo u ozařovače montovaný LNB přijímač, či naopak koncový výkonový zesilovač zastíňují část plochy ústí.

Kromě ovlivnění vyzařovacího diagramu soustavy zastíněním dochází ke zpětnému odrazu vysílané energie od těchto částí zpět do reflektoru.

Parametry soustavy lze popsat několika vztahy:

– maximální zisk antény (viz [4]), pro plošnou anténu s kruhovou aperturou

$$G_{\max} = \eta \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2, \quad (4.2)$$

kde D je průměr apertury,
 η je účinnost antény.

– účinnost antény je dána vztahem

$$S_{ef} = \eta \cdot S, \quad (4.3)$$

kde S je reálnou plochou apertury (nezastíněnou),
 S_{ef} je reálnou funkční plochou.

Účinnost bývá uváděna typicky 0,6,

– šířka svazku antény (podrobněji v [4]).

Úhel otevření pro konkrétní řešení. f/D zadáno 0,4; D předběžně oznámeno 2 metry.
Dle vzorce (4.1)

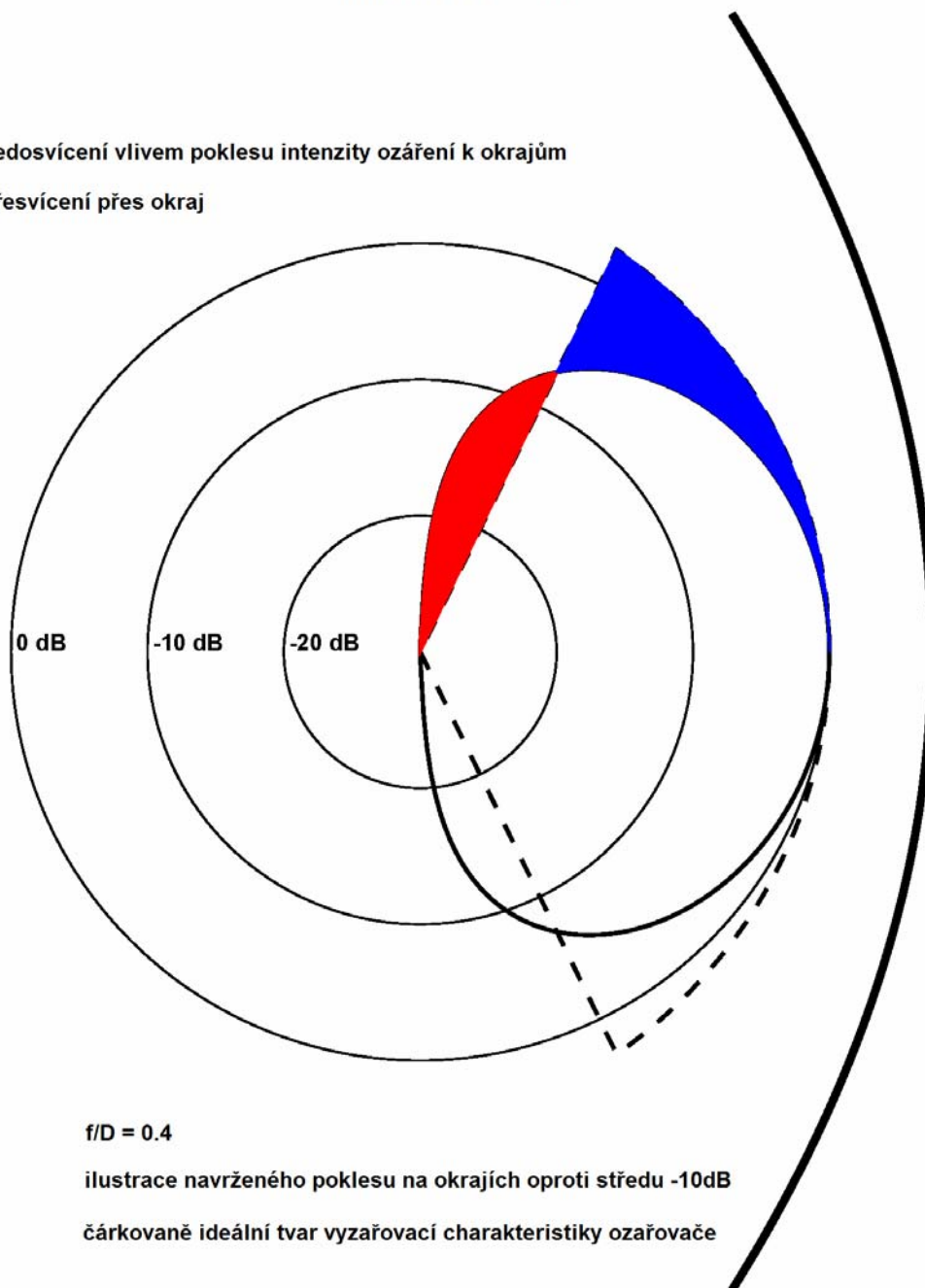
$$\operatorname{tg} \left(\frac{\psi_0}{2} \right) = \frac{D}{4f}, \quad (4.4)$$

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\psi_0}{2} \right) = \frac{2}{4 \cdot 0,4},$$

$$\psi_0 = \underline{\underline{64^\circ}}$$

Vliv vyzařovací charakteristiky ozařovače na osvit parabolického zrcadla
- energetické ztráty

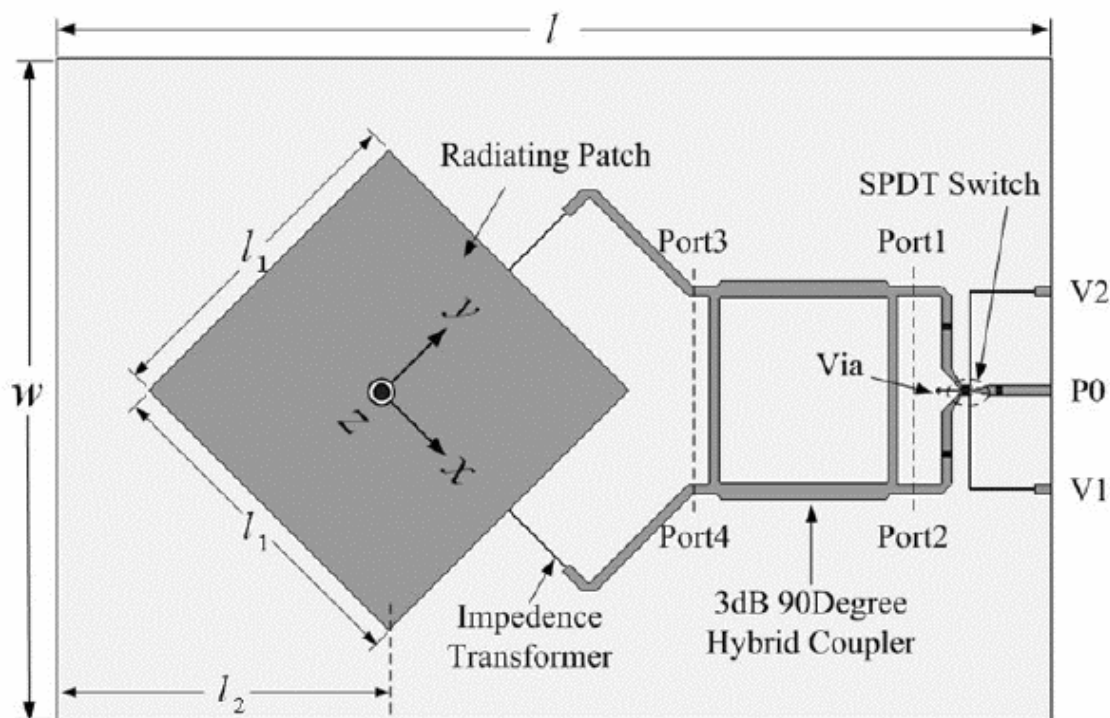
- nedosvícení vlivem poklesu intenzity ozáření k okrajům
- přesvícení přes okraj



Obr. 4.2: Vyzařovací diagram ozařovače a dílčí efekty ozáření zrcadla (převzato z [27]).

5. Možnosti realizace ozařovače s kruhovou polarizací

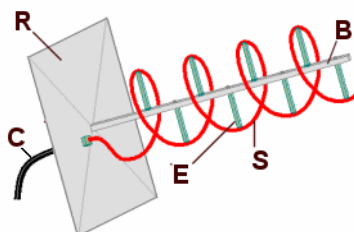
5.1. Planární struktury



Obr. 5.1: Mikropásková anténa s přepínatelným smyslem otáčení polarizace (převzato z [8]).

Na téma planárních antén pro kruhovou polarizaci již bylo publikováno několik prací na ústavu zadavatele (viz [3]). Tento typ antény byl při konzultaci z řešení práce vyřazen. Mohu se jen domnívat či z důvodu již dostatečného množství publikovaných materiálů studentů ústavu, či pro jejich specifické vlastnosti, které nejsou vždy příznivé. Zejména nízký zisk, ztráty v substrátu, menší výkonová zatížitelnost.

5.2. Šroubovicová anténa

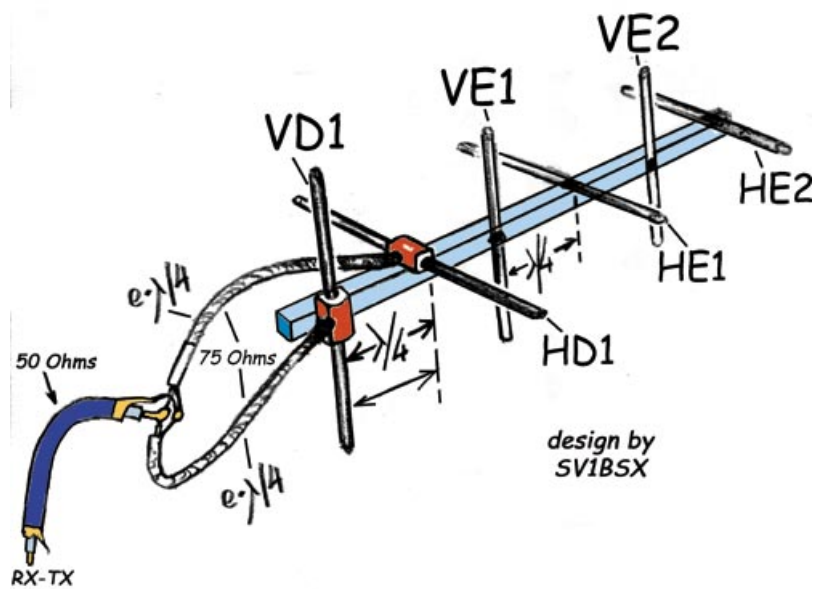


Obr. 5.2: Šroubovicová anténa (převzato z [9]).

I na toto téma již na ústavu UREL byla zpracována práce pojednávající o tomto speciálním druhu antén určeném pro kruhovou polarizaci (viz [10]). Tento typ proto také nebude uvažován.

5.3. Cross-Yagi

Tímto anglickým názvem je označována soustava dvou identických Yagiho antén. Jedna z nich je natočena vertikálně a druhá horizontálně. Antény mezi sebou vždy musejí svírat pravý úhel, celá soustava však může být pootočená o 45° , tedy do tvaru X vůči zemi. Z obrázku je patrné, že potřebný fázový posuv pro vybuzení kruhové polarizace je dosažen vzájemným prostorovým posunutím antén. Napájecí kabel je délek $\lambda/4$ a jejich násobků. Volba smyslu rotace polarizace je volena a pevně dána připojením jednoho z aktivních vodičů na jednu či druhou polovinu dipólu jedné z Yagiho antén.



Obr. 5.3: Určení směru rotace (převzato z [11]).

5.4. Vlnodový ozařovač

5.4.1. Jednotlivé části ozařovače

Ozařovač je složen z třech pracovních částí (viz [12]):

– přívodní slučovací část – zde jsou realizovány vstupní a výstupní konektory a to typu koaxiálního kabelového vedení (konektor SMA) nebo vlnodového. Všechny vzájemné kombinace těchto typů jsou přípustné. V praxi bývají výstupní zesilovače vysílačů (nízkého a středního výkonu) opatřeny koaxiálním kabelovým výstupem. Pro zajištění minimálních ztrát v přijímací části je vhodné použití přijímače s vlnodovým vstupem.

– polarizační část – přepážka (septum) provádí převod lineární polarizace na kruhovou a v opačném směru kruhovou na lineární. Zajišťuje vzájemné zpoždění složek E_x a E_y vektoru intenzity elektrického pole o úhel 45° . Přirazuje kruhově polarizovaný signál jednoho smyslu rotace konkrétnímu portu a signál opačné rotace druhému portu.

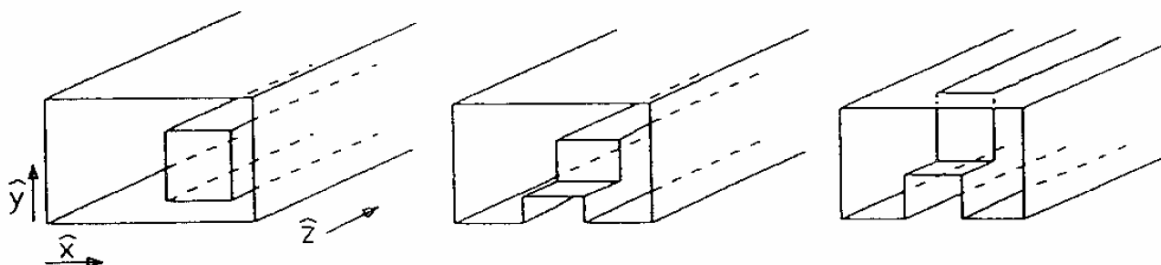
Další možné řešení polarizátoru jsou dielektrické těleso, tvarově upravený vlnod, šrouby.

– výstupní část vedení – anténní ústí ozařuje povrch zrcadla. Tato část ozařovače ovlivňuje kvalitu ozáření, velikost zisku a velikost šumu. Teoreticky je možné použít výstupní část ozařovače z již osvědčené sestavy pro danou parabolu a frekvenci.

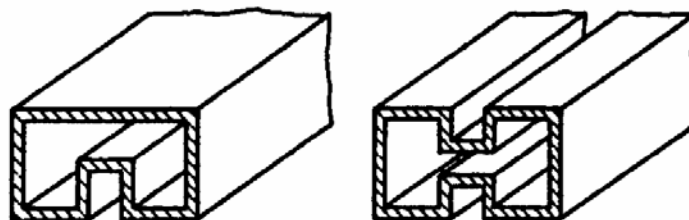
Tyto části jsou navzájem nezávislé a mohou být navrženy odděleně. Naladění jejich návaznosti je však nezbytné.

5.4.2. Popis funkce vlnodového ozařovače s přepážkou

Teoretický rozbor přepážky pro tvorbu kruhově polarizované výstupní vlny nebyl doposud matematicky popsán a vysvětlen. V praxi animace časového průběhu elektromagnetického pole postupné vlny ukazuje funkci překážky jasně. Postupná vlna vybuzená v jednom z vlnodů se v místě nejvyššího (prvního) schodu rozšiřuje přes schod do prostoru druhého obdélníkového vlnododu. Stejný děj se odehrává na dalších schodech a v kombinaci s minimy a maximy původní postupné vlny vzniká za posledním schodem přepážky dvojitá šroubovice maxim elektromagnetického pole – kruhová polarizace. Na obrázku (Obr. 5.4) je znázorněn postupný vznik modelu schodovité přepážky. Nalevo je uveden obdélníkový vlnodod s vložkou. Vprostřed je stejný obdélníkový vlnodod se změněným profilem a schodem. Vpravo je vlnodod rozdělen na dva menší vlnodody a společný prostor je pouze nad schodem přepážky.

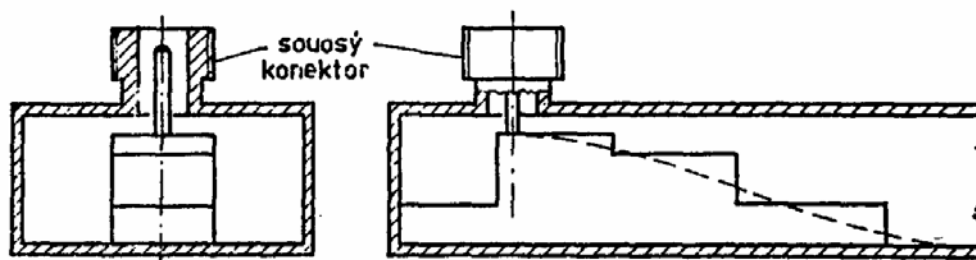


Obr. 5.4: Ilustrace vzniku přepážky ve vlnododu (převzato z [28]).

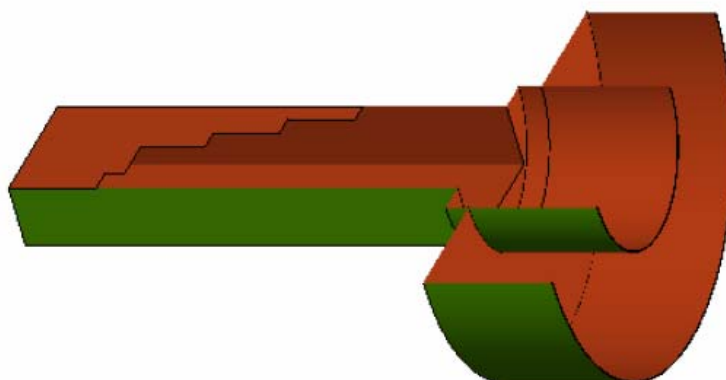


Obr. 5.5: Obdélníkové typizované vlnodody s upraveným profilem. (převzato z [14]).

Velmi blízkým a dobře prozkoumaným řešením sloužícím jinému účelu jsou impedanční transformátory. Tyto transformátory slouží k převodu signálu z mikropáskového nebo koaxiálního vedení na vlnododové. Signál je přiváděn na nejvyšší schod přepážky. Zde je vedení impedančně přizpůsobeno pro impedanci vstupního vedení. Na jednotlivých schodech o délce $\lambda/4$ se impedance upravuje až na konečnou impedanci navazujícího vlnododového vedení nebo vyústění do volného prostoru. Často jsou používány dvou nebo tří schodové varianty vycházející z Čebyševova impedančního transformátoru. Konstrukce těchto transformátorů jsou velmi podobné zkoumaným septum přepážkám v této práci, jsou však realizovány ve vlnododech obdélníkového průřezu a tedy vznikající elektromagnetické vlny jsou lineárně polarizovány.



Obr. 5.6: Impedanční transformátor – přechod vedení koaxial-vlnovod (převzato z [14]).



Obr. 5.7: Řez ozařovačem s prstenci apertury pro zlepšení vyzařovací charakteristiky (převzato z [13]).

Vlnovodový ozařovač má jasnou výhodu – ve vyzařovací charakteristice je pouze jeden hlavní lalok bez dalších postranních laloků. Tuto charakteristiku lze dále upravovat různými typy ústí vlnovodu. Na obr. 5.7 je vidět použití dvou škrťících prstenců, samozřejmě je možné použití mnoha jiných dalších tvarů apertury. Konkrétní tvar apertury bude řešen až při návrhu finálního řešení celé soustavy, popřípadě po realizaci a změření parametrů bude typem apertury laděna celá soustava pro vhodné ozáření parabolického zrcadla.

Oproti tomu nevýhodou je malý zisk při příjmu a velká citlivost na rozměrové odchylky v řádu setin milimetrů (viz [29]). Příkladem je přímý vlnovod R120 s vnitřními rozměry 19,05 mm a 9,525 mm a tolerancemi odchylky $\pm 0,038$ mm. Jiný výrobce udává tolerance vnitřních rozměrů vlnovodu $\pm 0,0076$ mm (viz [30]). Materiálem vlnovodu je měď, hliník nebo mosaz.

Dalším pozitivem je nejvyšší možný vysílaný výkon z možných dostupných řešení. Přenosové vlastnosti vlnovodu jsou limitovány izolačními vlastnostmi použitého dielektrika. Tedy hodnotou průrazného napětí mezi stěnami vlnovodu (viz [14]).

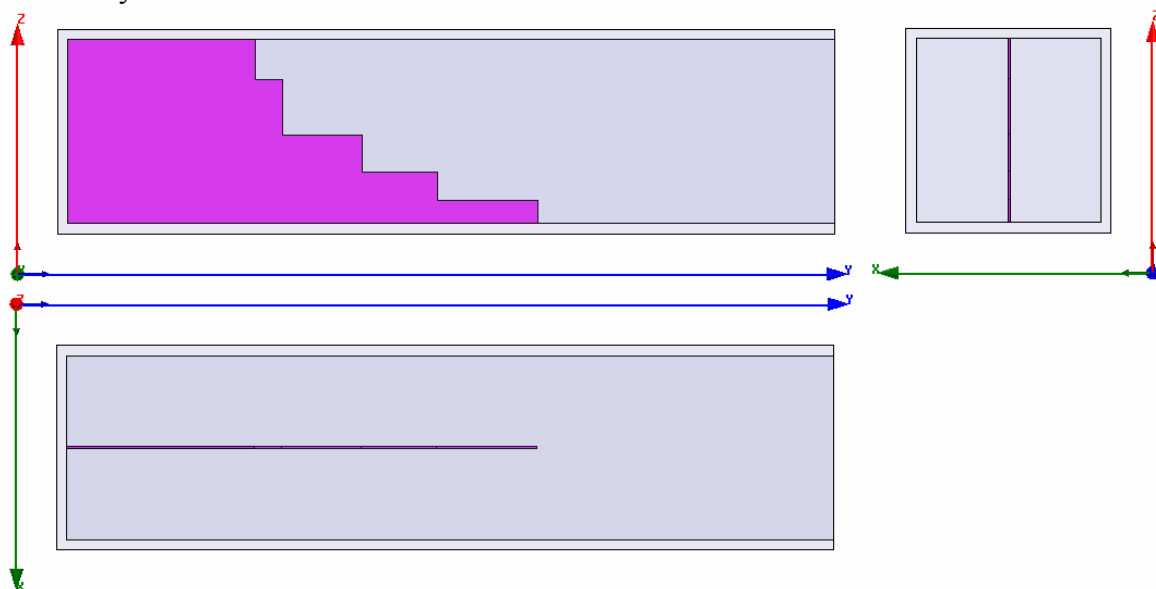
Speciálním případem využití tohoto typu vlnovodové antény může být kontinuální příjem dvou signálů s opačnými polarizacemi a také jejich vysílání. S použitím cirkulátoru pak lze teoreticky souběžně vysílat i přijímat.

Kruhovou polarizaci je možné vytvořit dvěma sondami vzájemně pootočenými o 90° . Signál je třeba rozdělit a na jedné z nich zpožďovat. Používá se výkonového zpožďovacího článku 90° . Ve vlnovodu s přepážkou zpožďovací článek není zapotřebí.

6. Možné geometrické řešení ozařovačů

6.1. Čtvercové ústí

Sestavu čtvercového ozařovače tvoří dva obdélníkové vlnovody spojené svými delšími stranami. Rozměry typizovaných vlnovodů jsou právě takové, že polovina delší strany je rovna délce strany kratší.



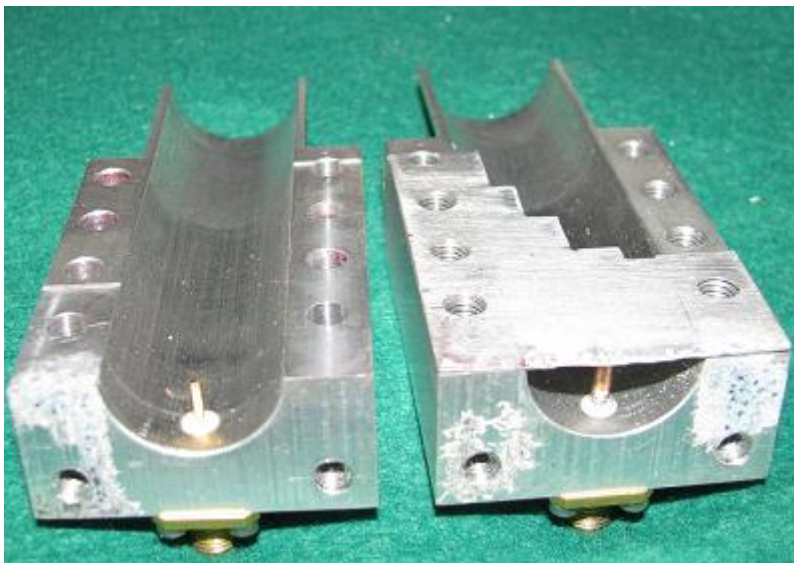
Obr. 6.1: Ozařovač čtvercového průřezu.

6.2. Kruhové ústí

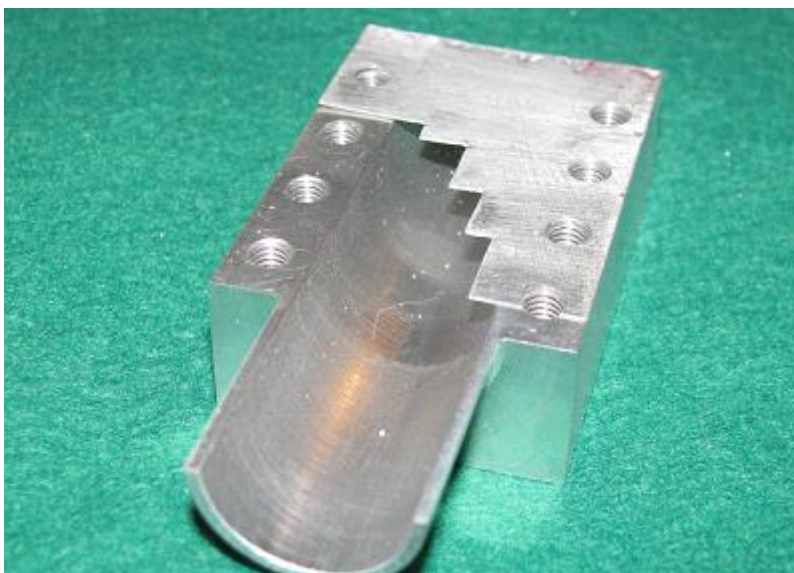
Jiným možným přístupem k realizaci ozařovače s vlnovodem může být použití vlnovodu s kruhovým průřezem. Při požadavku kruhové polarizace se toto řešení přímo nabízí. Rotace pole uvnitř vedení i podmínky na rozhraní vlnovodu a volného prostoru jsou příznivější než u čtvercového průřezu ozařovače. V sestavě s parabolickým zrcadlem je předpokládáno zajištění lepší homogenity ozáření odrazné plochy. Nevýhodou může být napojení vlnovodového vedení vysílače nebo přijímače. Vhodným řešením by pak bylo použití vedení koaxiálního a buzení ozařovače proudovými sondami dle obr. 6.3 a obr. 6.4.



Obr. 6.2: Ozařovač kruhového průřezu.



Obr. 6.3: Ozařovač s kruhovým průřezem a buzením proudovými sondami (převzato z [15]).

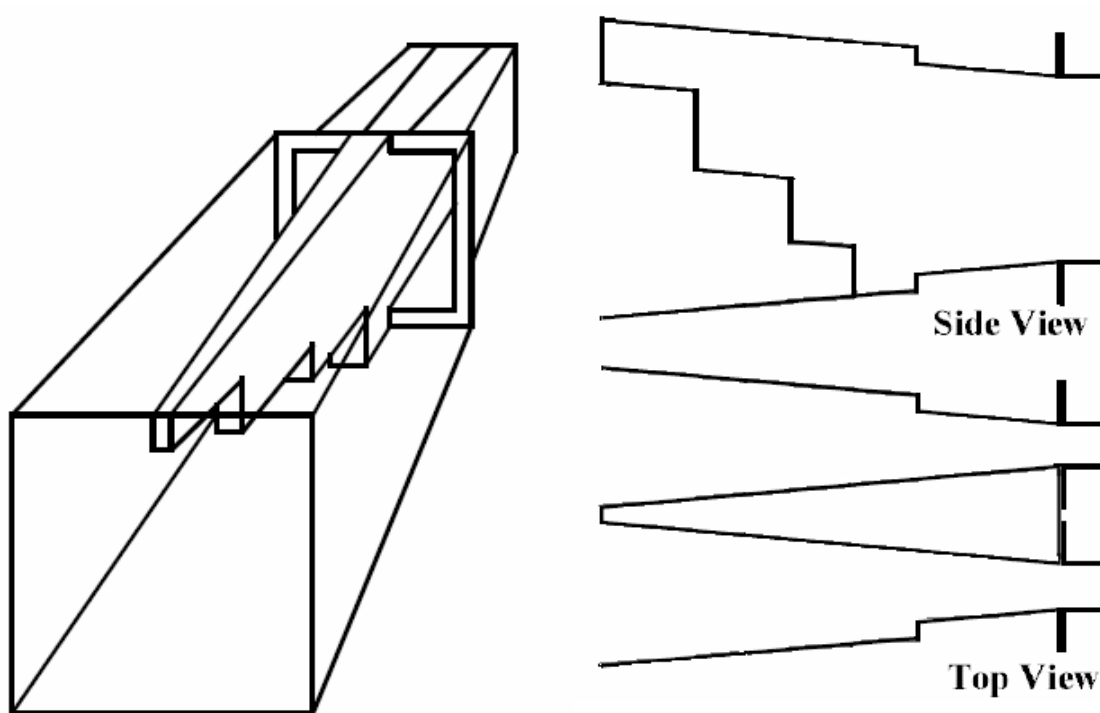


Obr. 6.4: Ozařovač s kruhovým průřezem a buzením proudovými sondami (převzato z [15]).

6.3. Lichoběžníkový ozařovač

Na obr. 6.5 je ozařovač s rozšiřujícím se ústím vlnovodu a zužujícím se septum přepážkou.

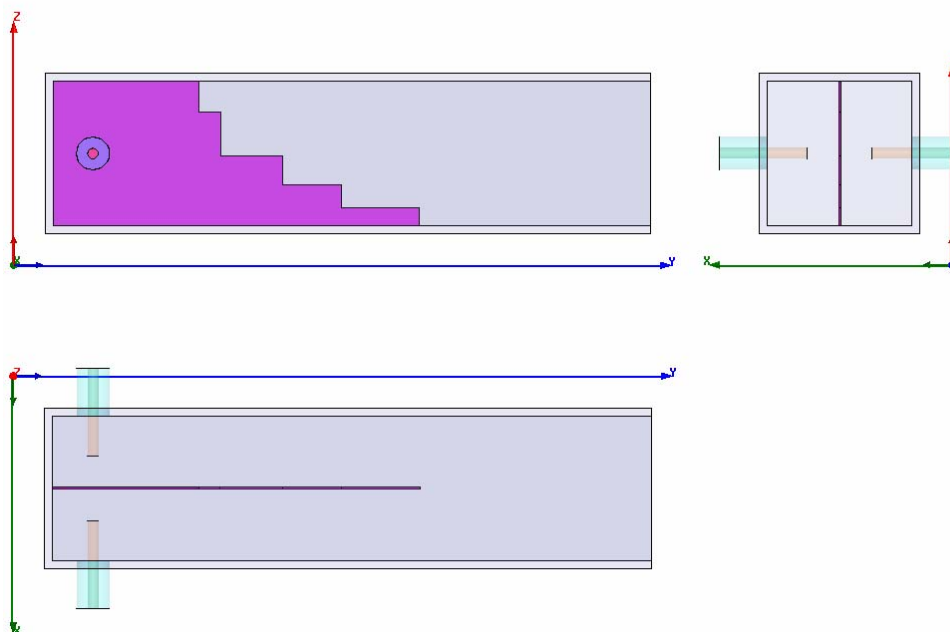
Autoři tohoto projektu navrhli ozařovač pro frekvenci 19 GHz. Oproti jiným projektům ostatních autorů, tento projekt je podložen teoretickými výpočty elektromagnetických polí metodou konečných prvků a dále řešen numerickými metodami. Rozměry ozařovače jsou vypočteny a optimalizovány s pomocí výpočetní techniky. Autoři ověřují parametry s 5, 9 a 17 schody na přepážce. Ostatní autoři ozařovačů a polarizátorů se septum přepážkou vycházejí s konstrukcí dříve publikovaných, které následně experimentálně upravují a požadované parametry optimalizují syntézou výsledků simulací. Zajímavostí je, že konstrukce byla navržena pro výrobu odléváním, tedy vysoce opakovatelným a levným způsobem výroby.



Obr. 6.5: Lichoběžníkový septum ozařovač (převzato z [16]).

7. Možnosti buzení ozařovače

7.1. Buzení proudovou sondou



Obr. 7.1: Buzení ozařovače pomocí proudové sondy (převzato z [17]).

Buzení vlnovodu se především odvíjí od použitých komponent v řetězci. V případě komponent s koaxiálními vstupy a výstupy je nasnadě použití buzení obnaženým aktivním vodičem, nebo v praxi většinou středovým kolíkem použitého konektoru (například konektor SMA). U publikovaných konstrukcí s většími vlnovými délkami (13 cm) byla vývoj rozšířen o optimalizaci budícího zářiče. Ten je tvaru kuželu rozšiřujícího se od stěny k středové přepážce [18].

Přivedení budícího signálu k zářiči pro ozáření paraboly jasně ukazuje k použití koaxiálního kabelu. Kabel je ohebný, má malý průměr a hmotnost. Bohužel také vyšší ztráty, nižší možný přenášený výkon a možnost prostupu rušení do vedení.

7.2. *Buzení vlnovodem*

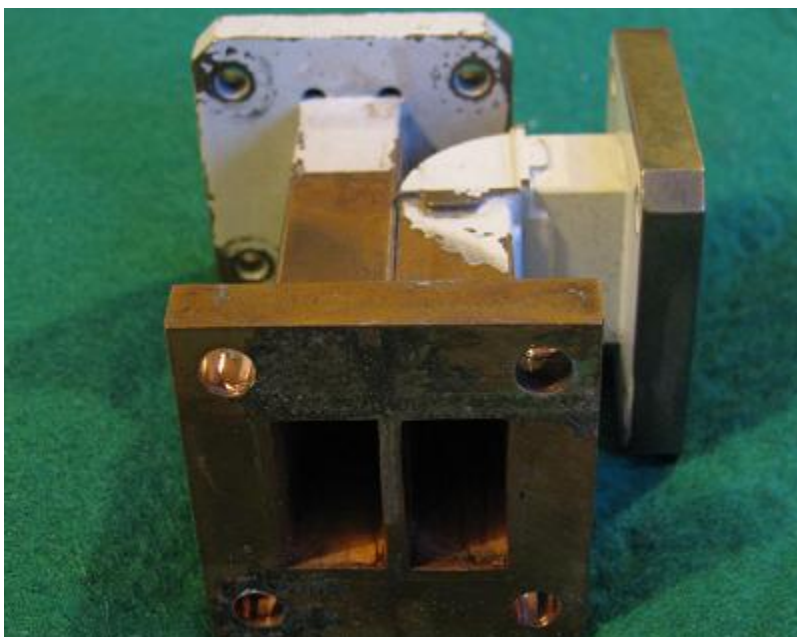


Obr. 7.2: Buzení ozařovače pomocí vlnovodů (převzato z osobního archivu Zdeňka Samka).

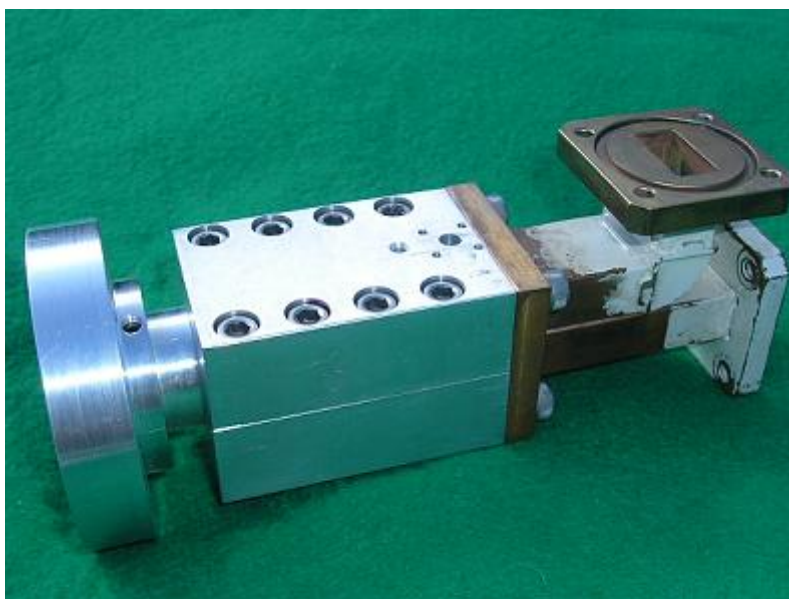
Na výše uvedeném obr. 7.2 je vidět že přivedení dvou vlnovodů do ozařovače může být jak z hlediska elektromagnetických vln, tak z fyzické konstrukce vedeními s přírubami náročnější než buzení pomocí proudových sond. Na dalších obrázcích je již technicky elegantnější řešení svedení dvou obdélníkových vlnovodů do jednoho čtvercového s přepážkou (obr. 7.3 a obr. 7.4).

Lepším případem může být Cassegrainovo uspořádání, kdy není třeba vést vlnovody do ohniska paraboly (ukázka zde [5]). I tak zde ale zůstává potřeba vedení signálu z obslužné budovy s potřebným vysílacím a přijímacím zařízením a požadavek natáčení parabolického systému ve dvou rovinách.

Případné použití vysílače nebo přijímače s vlnovodovým vedením je výhodou kvůli absenci přechodu koaxiálního vedení na vlnovodové a nazpět. Tím jsou vyloučeny ztráty na přechodu, impedanční přizpůsobování a výkonové omezení koaxiálního vedení (konektor SMA maximálně 160-250 W).



Obr. 7.3: Amatérská konstrukce spojení dvou obdélníkových vlnovodů pro buzení ozařovače (převzato z [15]).



Obr. 7.4: Sestava ozařovače a adaptéru s přírubami pro přijímací a vysílací vlnovody (převzato z [15]).

8. Parametry ozařovače

Ztráty nepřizpůsobením vstupu (S_{11} – činitel odrazu) a výstupu (S_{22}) (viz [19]).

Z toho vyplývá dále poměr stojatých vln PSV.

Činitel odrazu se udává bezrozměrný nebo v dB jako napětový

$$S_{11}[dB] = 20 \cdot \log S_{11}[-]. \quad (8.1)$$

Izolace mezi porty (S_{12} S_{21}) ($S_{12} = S_{21}$ pokud by bylo zařízení dokonale symetrické) [dB].

Požadovaná hodnota pod -20 dB.

Axiální poměr 1-2 dB (nebo méně) v potřebném vyzařovacím úhlu.

Frekvenční rozsah pro možné přeladění.

Maximální přípustný budící výkon – vzhledem k izolačním poměrům vlnovodu, popř. budících sond u SMA.

Pozice centra konstantní fáze

U primárního zářiče je důležité jeho správné umístění v ohnisku paraboly. Primární zářič se musí umístit svým fázovým středem do ohniska paraboloidu. Pozice fázového středu primárního zářiče nemusí být totožná s geometrickým středem zářiče, a proto se musí umístění zářiče věnovat dostatečná pozornost.

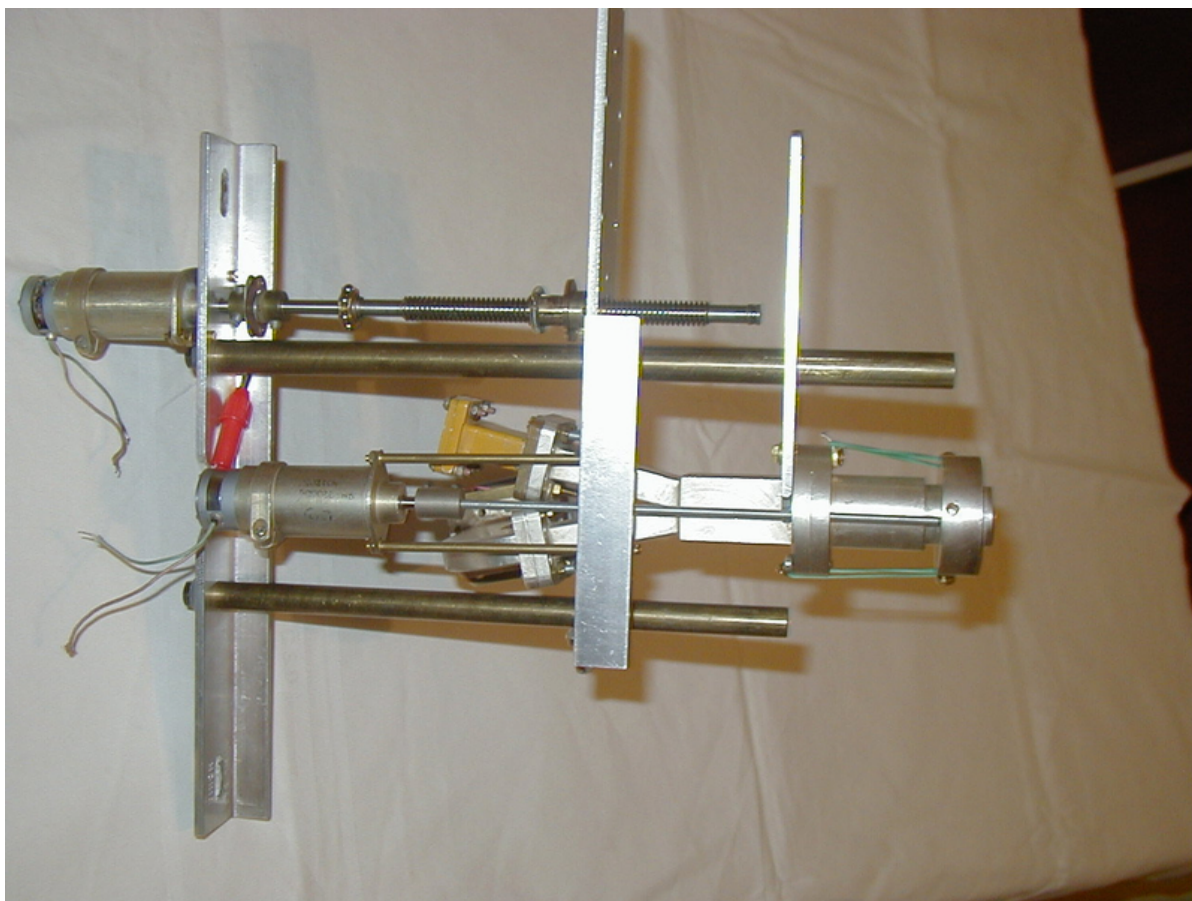
Skutečné ústí ozařovače (elektromagnetické) lze určit experimentálně při měření slunečního šumu. Dle slov pana Galuščáka v dokumentu [20] cituji: „Přesto tato měření ukázala, že celková účinnost anténního systému včetně parabolického zrcadla je méně citlivá na přesné nastavení pozice ústí ozařovače do ohniska paraboly, než na takovém nastavení vzdálenosti ozařovače od paraboly, aby se zřázováním potlačil odraz a došlo tak k zlepšení izolace mezi oběma porty ozařovače.“ Měření probíhala na velmi podobném modelu ozařovače, avšak na nižších pracovních frekvencích (1,3 GHz).

Tlumivkový límeček

Přestože není v této práci uveden výsledek zkoumání modelu s tlumivkovým límečkem, byl tento případ simulován a zjišťován. Simulace ukázali velké zúžení hlavního laloku ve vyzařovací charakteristice a značné zhoršení meziportové izolace. Poloha tlumivkového límečku od ústí ovlivňuje tvarování vyzařovacích charakteristik. Je vhodné uvést hlavní charakteristické vlastnosti a postupy ladění publikované panem Galuščákem (viz [20]):

„Pokud budeme tlumivkový límeček posouvat zpět, směrem od ústí ozařovače, bude se zvětšovat šířka hlavního laloku, ale zároveň se budou zvětšovat rozdíly mezi oběma polarizacemi. Tlumivkový límeček může zlepšovat účinnost antény a lze jím doladit vazbu mezi ozařovačem a parabolou. Záporně však ovlivňuje izolaci mezi porty.“

Obr. 8.1 ukazuje ozařovač s čtvercovým průřezem v místě přepážky přecházející v kruhové ústí a s dvěma krokovými motory pro naladění polohy ozařovače a pro nastavení polohy tlumivkového límečku, který je odtlačován proti dvěma gumovým svazkům. Tímto způsobem je umožněno sladění ozařovače s reflektorem v reálných podmínkách (představme si například parabolické zrcadlo o průměru 5 metrů umístěné na patnáct metrů vysokém podstavci).



Obr. 8.1: (převzato z [21]).

9. Prostředí Ansoft HFSS

Použitá verze 11

HFSS je program sloužící k simulaci a analýze elektromagnetických polí pro vysokofrekvenční a vysokorychlostní aplikace v elektrotechnice (viz [22]).

Je vhodný pro návrh:

- integrovaných mikrovlnných struktur,
- vhodného zapouzdření integrovaných obvodů,
- antén,
- struktur na substrátu,
- rádiových a mikrovlnných komponent,
- biomedicínckých zařízení.

Pro výpočty používá metodu konečných prvků, maticových polí a numerických metod .

V programu lze sledovat impedanční, admitanční a přenosové charakteristiky. Je zde možno definovat různé druhy vysílacích a přijímacích portů. Příkladem port vlnový, se soustředěnými parametry, napěťový, proudový, port magnetického toku.

Modelovat v blízkých a vzdálených polích a tyto pole intenzit pak dále ztvárnit v 3-dimenzionálním prostoru.

Lze sledovat přenosové ztráty, ztráty odrazem na nepřizpůsobené zátěži.

Program podporuje 64bitové zpracování dat.

Jsou zde optimalizační, statistické a citlivostní funkce analýzy.

Pro složité a náročné výpočetní modely je vhodná distribuce výpočtů na vzdálený výpočetní systém. Vzdáleným strojem je zpravidla výkonnější pracovní stanice než stroj, na kterém pracujeme. V nejlepším případě síť počítačů nebo superpočítač s multi-procesorovou architekturou. Program Ansoft HFSS pracuje v režimu klient – server. Na serveru pracuje aplikace solver.

Další možnou volbou v softwaru je přidělení počtu procesorů (jader) a množství operační paměti. Při použití 64 bit hardware a software systému je možné přiřadit řešiteli neomezený počet jader a množství RAM, v rozsahu adresovatelnosti 64 bit architektury. V praxi je doporučeno pro stanice s operačním systémem Windows XP 64 bit 8 GB RAM nebo více (viz [26]).

Simulace a optimalizace ať už váhovou optimalizační analýzou, nebo pouhým výběrem z parametrického řešení je značně časově a výpočetně náročná. Při použití osobního počítače Intel Pentium E5200 (2 jádra, pracovní frekvence 3,3 GHz, 3 GB DDR2 RAM 800 MHz). výpočet jednoho běhu (parametru) ve frekvenční oblasti a ve vzdáleném poli trvá přibližně 30 minut.

10. Základní prvek ozařovače – vlnovod

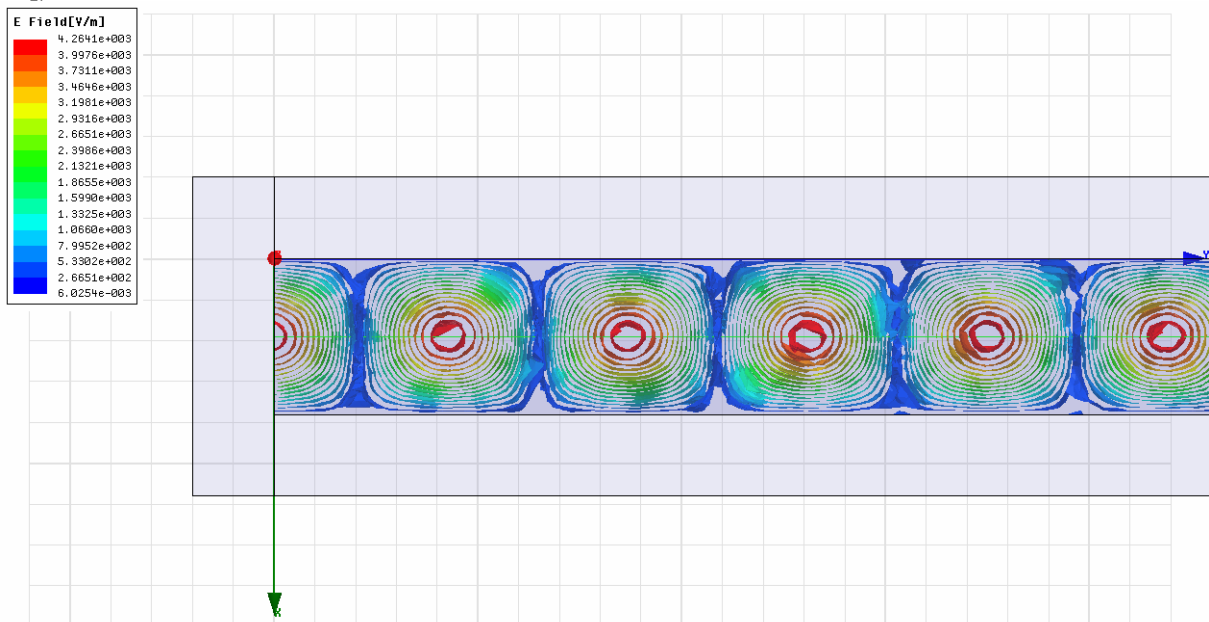
10.1. Simulace vlnovodu

Pro daný kmitočet 10,4 GHz jsou jasně předurčeny dva typizované rozměry obdélníkových vlnovodů – R100 a R120 z důvodu jejich vhodného pásma jednovidovosti (viz [23]).

Při simulaci byly uvažovány tyto parametry: vlnovod je vyroben z mědi a je vyplněn suchým vzduchem. To zajišťuje přiblížení se reálným provozním podmínkám.

Použití mědi pro stěny vlnovodu je neobvyklé, protože se v praxi pro výrobu vlnovodových komponent využívá převážně hliníku nebo mosazi. Volba měděného plechu byla předběžným tématu i času nynější práce, a to z důvodu pozdější praktické realizace. Měď bude pravděpodobně nejnáze zpracovatelná a dostatečně odolná proti klimatickým vlivům.

Dále jsou uváděny grafické výstupy simulace šíření elektromagnetické vlny TE₁₀ vlnovodem R100 (obr. 10.1, obr. 10.2). Tyto potvrzují teoretický předpoklad o utváření elektromagnetického pole ve vlnovodu za podmínek šíření dominantního vidu (viz [14] a [24]).

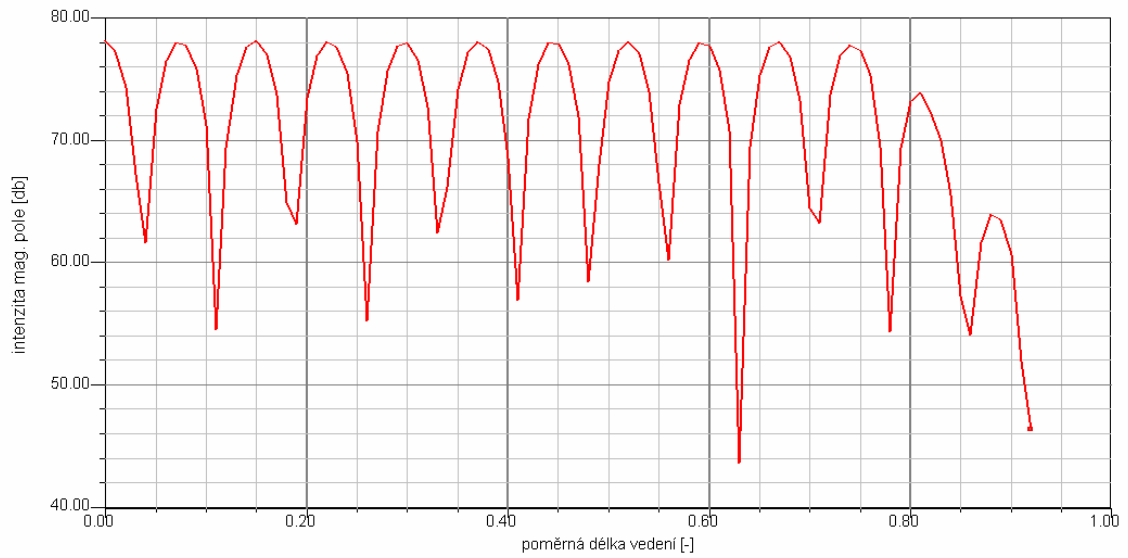


Obr. 10.1: Vyobrazení rozložení intenzity pole vlny TE₁₀ ve vlnovodu R100.

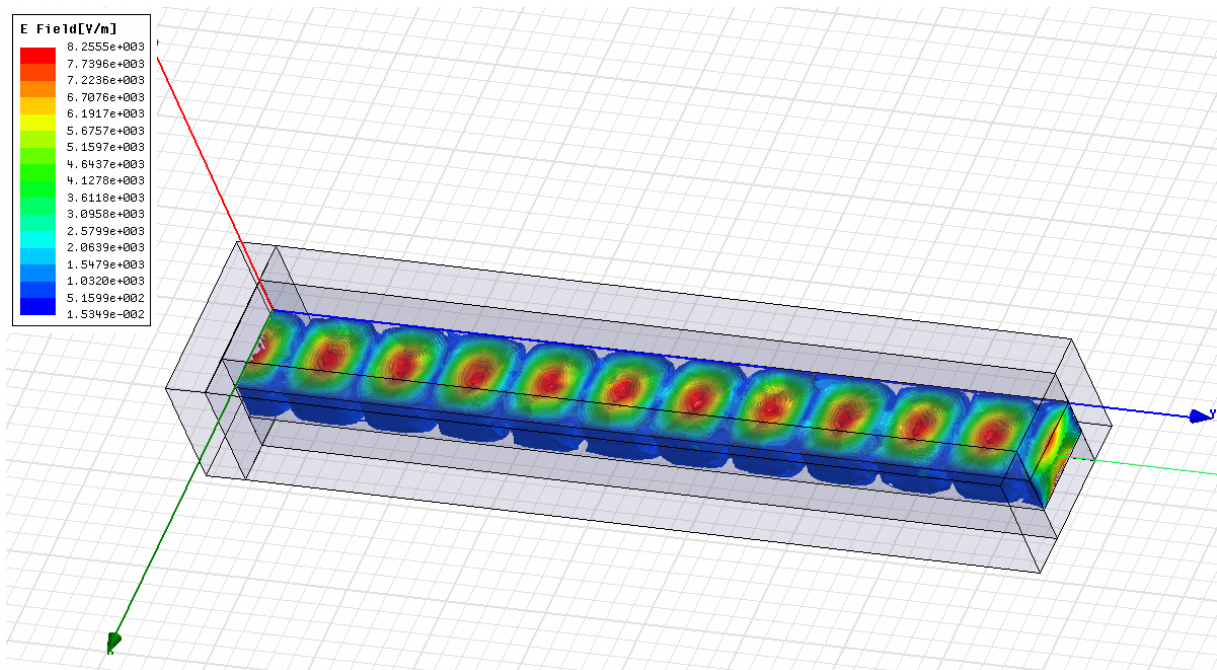
Jedním s dalších možných výstupů programu HFSS je tvorba grafů. Graf 10.1 ukazuje intenzitu pole v osové středě vlnovodu po jeho délce.

Vyobrazením tohoto grafu byl sledován útlum ve vlnovodu vznikající nenulovou permeabilitou dielektrika – vzduchu. V praxi jsou ztráty ve vlnovodu velmi nízké, a proto se udávají obvykle na 100 metrů délky vedení. Z grafu je vidět že jednotlivé intenzity maxim jsou stejné, neklesající podél vedení, až na poslední dvě, které jsou již ovlivněny koncem vedení ústícím do impedančně nepřizpůsobeného volného prostoru. Reálný uváděný útlum na 100 metrech vedení R120 bývá udáván 15–20 dB (viz [23]), pro vedení R100 pak 12–18 dB.

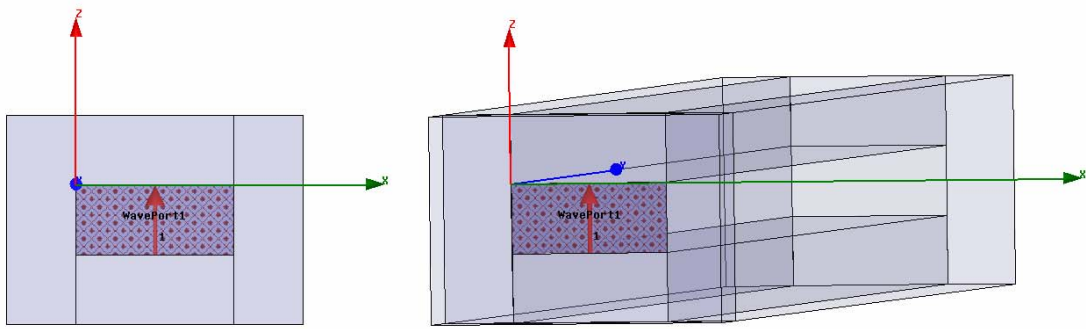
V programu nebyla nastavena délka vlnovodu větší než 1 m, při větším rozměru vlnovodu již program odmítl simulaci z důvodu neúměrně vysoké chyby pro danou vlnovou délku a zvolené rozlišení.



Graf 10.1: Rozložení intenzity magnetického pole vlny TE10 podél vedení.

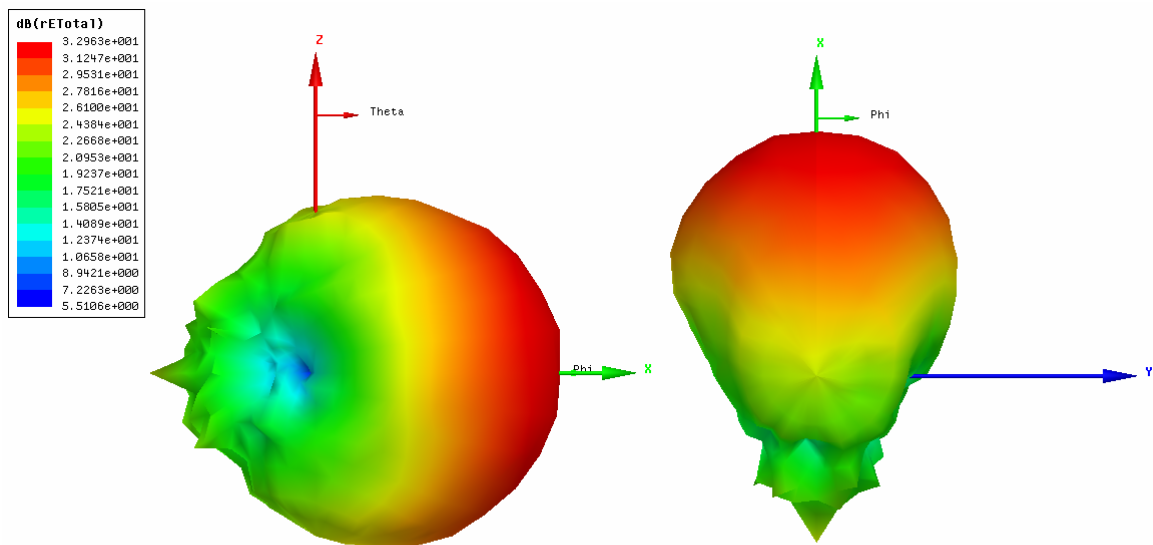


Obr. 10.2: Vyobrazení rozložení intenzity pole vlny TE10 ve vlnovodu R100.



Obr. 10.3: Ukázka budícího vlnového portu vlnovodu R100.

Obr. 10.3 ukazuje přiřazení plošného vlnového portu kterým je vlnovod buzen. U portu se volí jeho charakteristická impedance, počet módů a vektor směru integrace elektromagnetického pole. Udání počtu módů a směry vektorů slouží pro následný výpočet impedancí a odrazů na vedení programem. Port se umísťuje na zadní kovovou stěnu.



Graf 10.2: 3D vyobrazení vyzařovací charakteristiky ústí vlnovodu R100.

Polární graf vyzařovací charakteristiky (graf 10.2) ukazuje směrovost vysílacího svazku vznikajícího na ústí vlnovodu. Tato charakteristika je důležitá pro určení správného zakončení ústí a tím jeho naladění na vhodnou šířku ozařovacího svazku pro parabolické zrcadlo (viz [4]). Vyzařovací charakteristika vykazuje symetrické zúžení dané obdélníkovým tvarem ústí.

11. Simulace ozařovačů

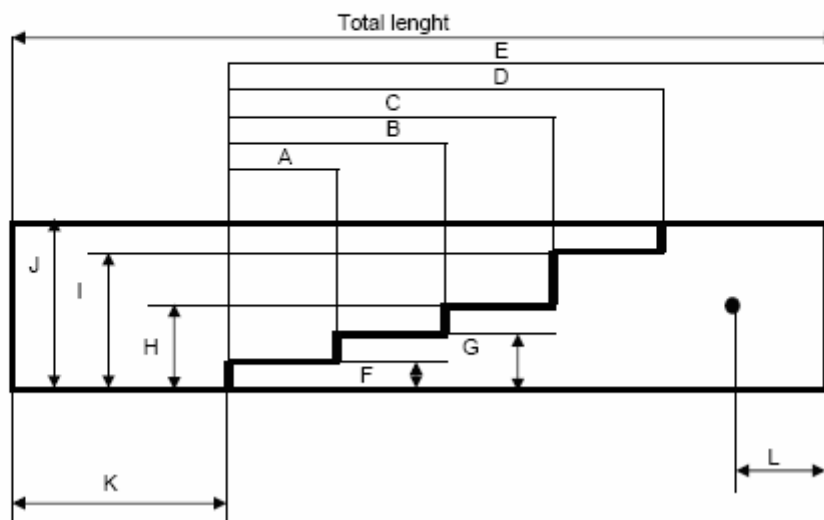
11.1. Ozařovač s čtvercovým ústím

Touto problematikou se stále zabývají mnozí radioamatéři po celém světě.

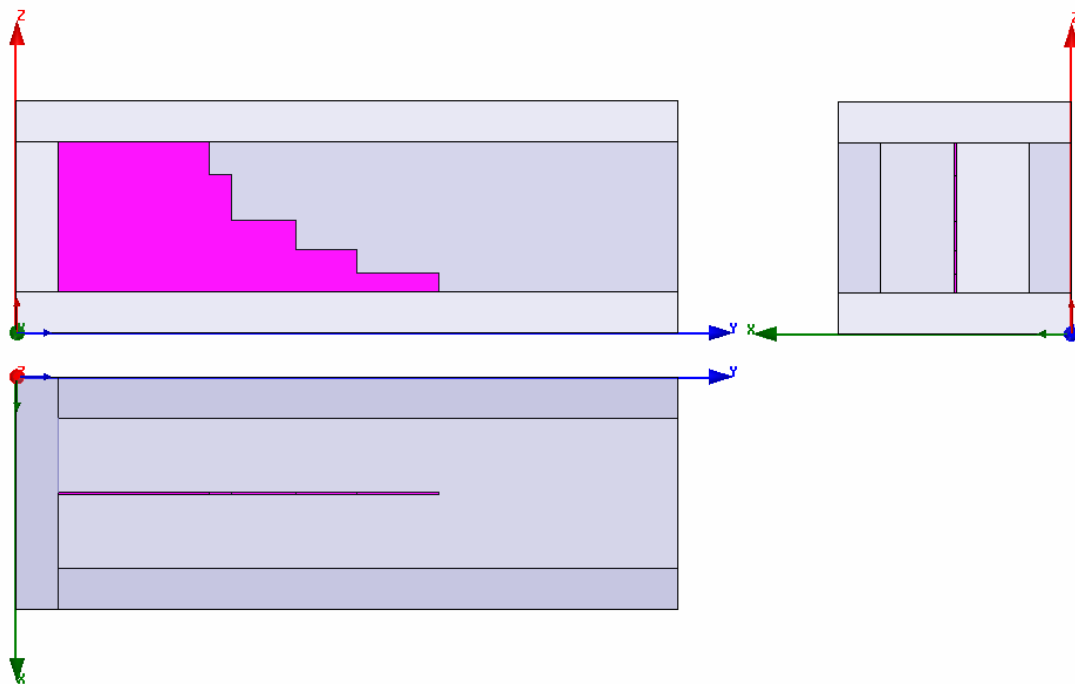
Ti většinou tyto ozařovače stavějí pro spojení EME. Mezi nejznámější pracovníky jistě patří Čech Zdeněk Samek nebo Američan Paul Wade. Na webových stránkách p. Samka se nachází naprogramovaný sešit programu Excel, který automaticky propočítá všechny rozměry ozařovače po zadání pracovní frekvence (obr. 11.1). Podle tohoto výpočtu byl vytvořen základní model v prostředí HFSS. Předlohou k výpočetnímu sešitu byl septum polarizátor uveřejněný zde [31], pracující na frekvenci 3 GHz.

Calculation of septum transformer on picture			
Frequency:	10400	MHz	
Calcul of wave lenght:	28,846	mm	Lambda
Messe	distance in mm		
A	9,8		0,338
B	17,2		0,597
C	25,0	Long of tooth	0,86
D	27,7		0,961
E	46,2		1,6
F	2,3		0,08
G	5,1		0,178
H	8,7	Brite of tooth	0,301
I	14,2		0,491
J	18,1		0,626
Messe in mm			
Distance from output on feed and transformer	29	K	1
Distance beetven dipol and rear wall	5	L	0,19
Dipol long	5	M	0,185
Thickness of septum transformer sheet	0,231	No critical parameter	
Total of feed lenght	75	Total	

Picture of transformer

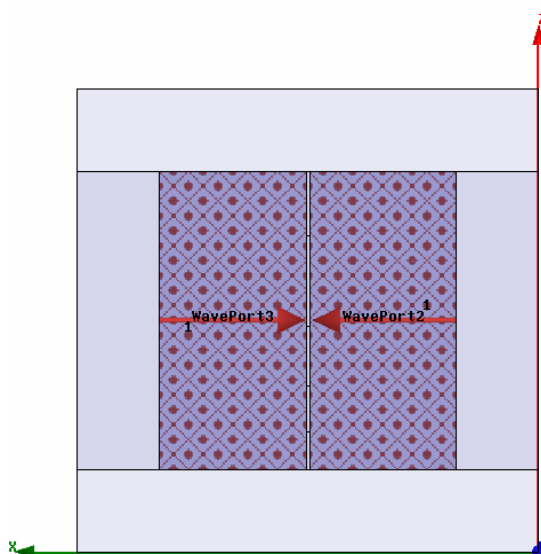


Obr. 11.1: Snímek výpočetní šablony s hodnotami pro 10,4 GHz (převzato z [25]).

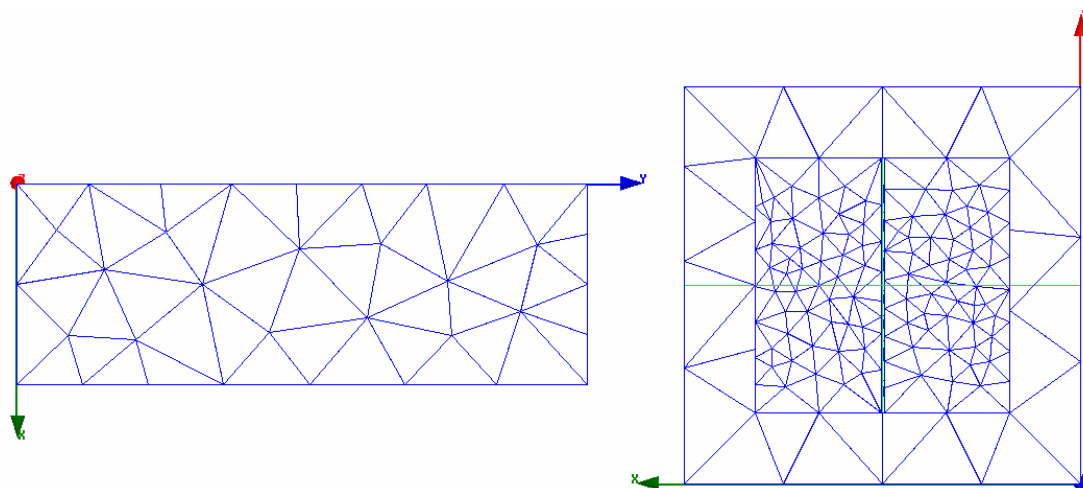


Obr. 11.2: Pohled na simulovaný ozařovač z boku, zepředu a shora.

Na výše uvedeném obr. 11.2 je znázorněno prostorové uspořádání. Při čelním pohledu do ústí vlnovodu je vidět, že přepážka dělí prostor před prvním (nejvyšším) schodem na dvě samostatné části.



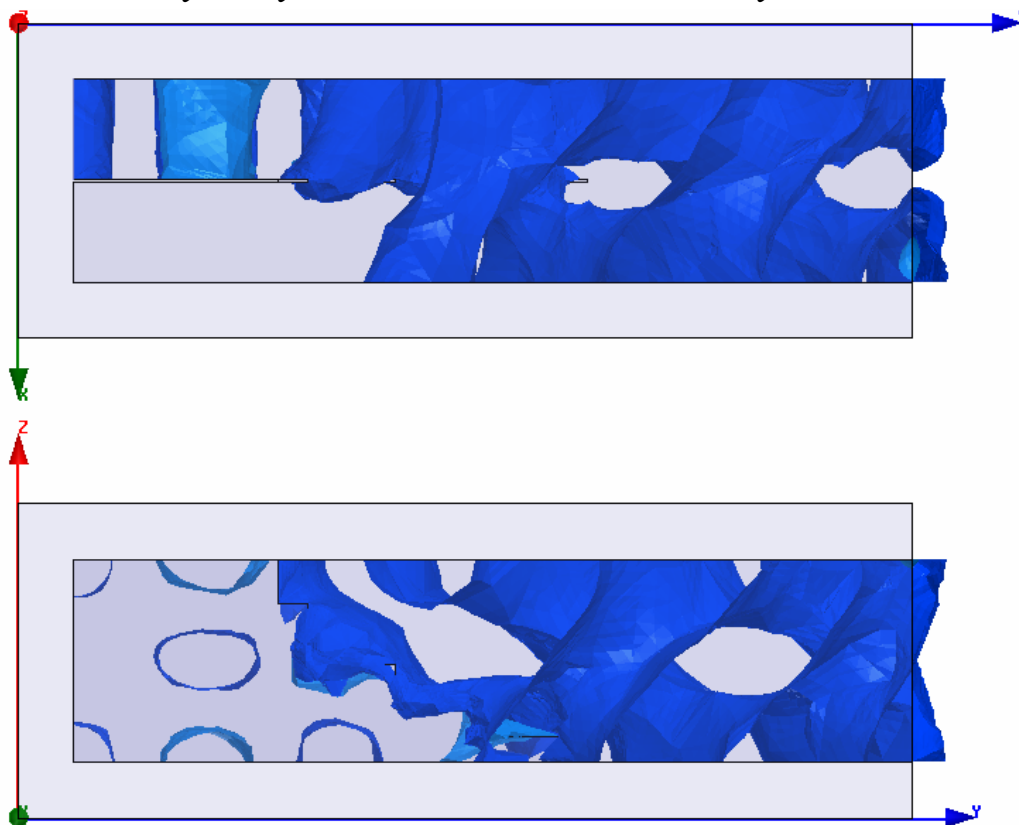
Obr. 11.3: Pohled zezadu na oba porty ozařovače.



Obr. 11.4: Ukázka rozložení „meshe“ neboli sítě rozdělující plochu pro výpočty.

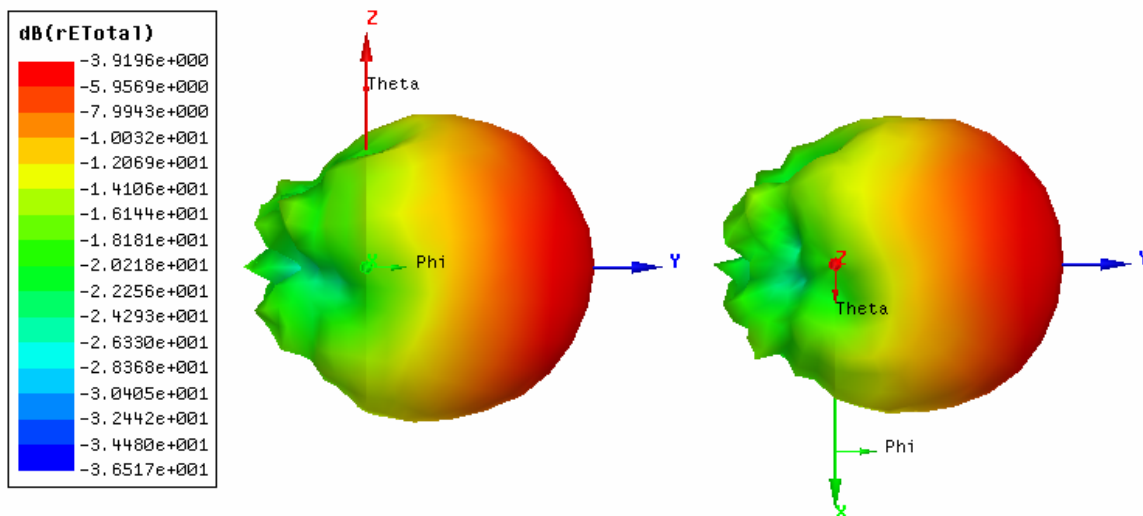
Obrázek ozařovače s rozčleněným povrchem do trojúhelníků (obr. 11.4) ukazuje metodu konečných prvků v akci. Konkretizační síť je generována automatizovaným procesem dle zvolených kritérií. Program sám volí potřebný počet a rozměry trojúhelníků variabilně dle exponovaných míst. Tyto volby jsou uživatelsky nastavitelné a je potřeba je měnit tak, aby segmenty sítě splňovaly Nyquistův-Shannonův teorém. Přitom vlnová délka ve vlnovodu je rozdílná od vlnové délky ve volném prostoru. Velmi podstatným faktorem ovlivňujícím veškeré výsledky simulací je definice samotného prostředí obklopující ozařovač. Již výše bylo zmíněno, že je prostředí definováno suchým vzduchem. Tento objekt obklopující námi sledovaný model však musí splňovat především rozměrové podmínky. Hlavní podmínkou je volný prostor několika vlnových délek před ústím ozařovače. V dalších směrech kolem ozařovače pak jednu vlnovodu délku. Volný prostor ve směru záření je nutný pro jednoznačné a správné výsledky charakteristik určovaných ve vzdáleném poli – tedy především charakteristik axiálních poměrů.

11.2. Dílčí výsledky simulací ozařovače s čtvercovým ústím



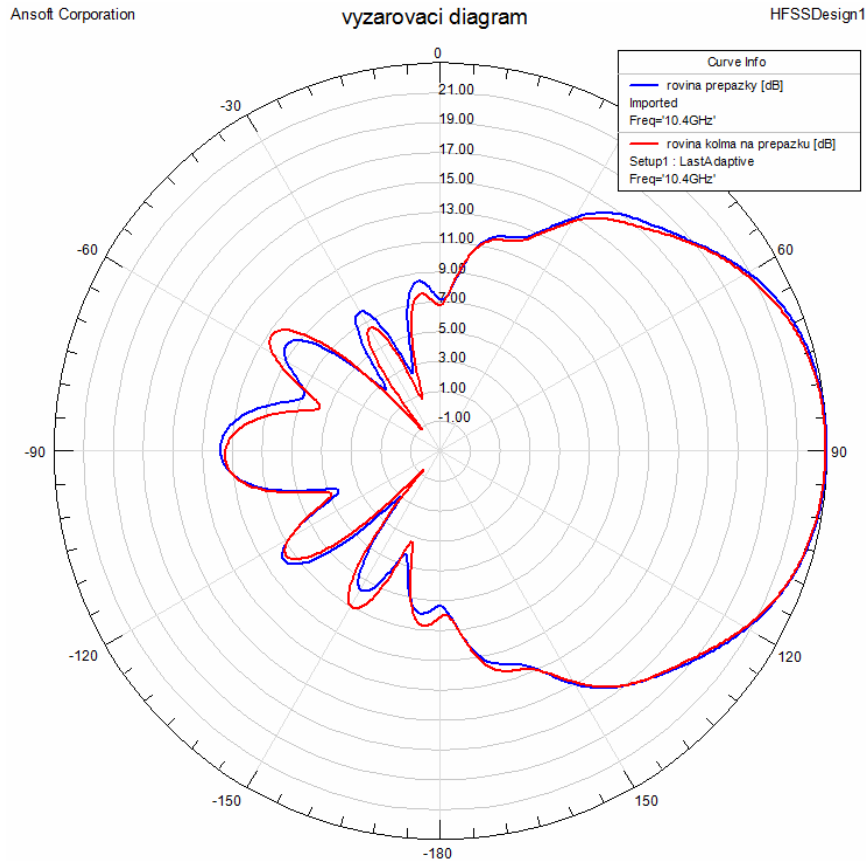
Obr. 11.5: Pohled shora a z boku na realizovanou simulaci funkce ozařovače.

Na obr. 11.5 je proběhlá simulace elektromagnetického pole. Při bližším pozorování a použití prostorové představitivosti lze vidět odvíjení dvou pramenů vyšších intenzit pole do tvaru šroubovice, probíhající zleva doprava s rotací proti pohybu hodinových ručiček – tedy RHCP. Celá tato simulace je mnohem průkaznější a názornější při běžící animaci přímo v prostředí HFSS. Animace je dosaženo cyklickým rozmítáním fáze signálu na vlnovém portu. Z animace je dále vidět jak se postupná vlna buzené části vlnovodu rozprostírá na schodovité přepážce a přechází do čtvercového prostoru vedení mezi přepážkou a ústím.

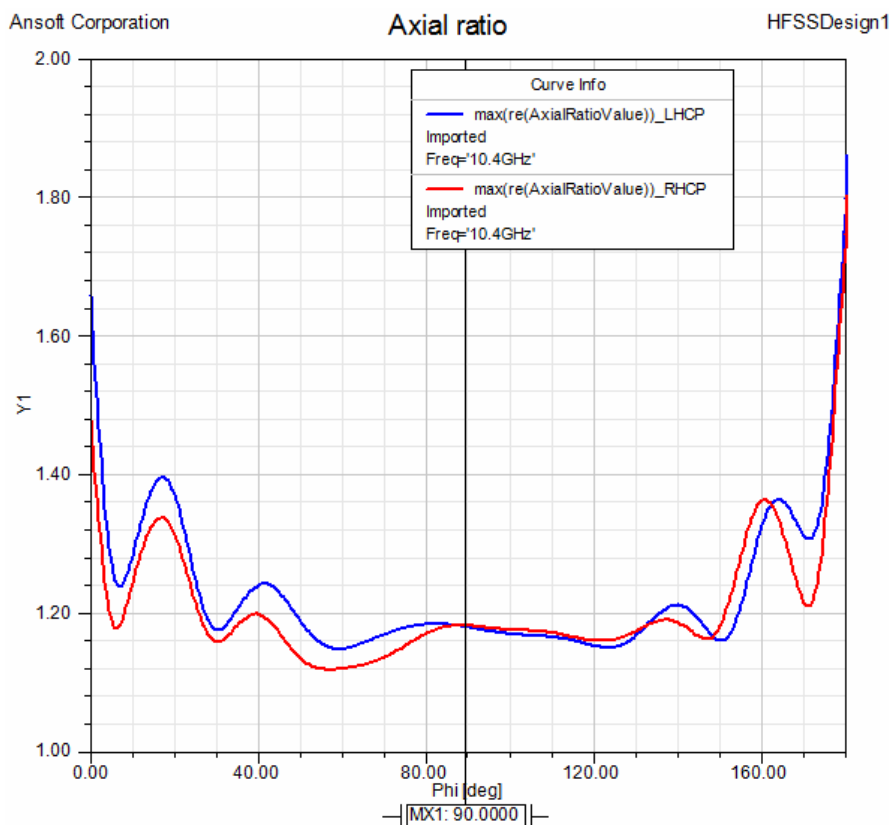


Graf 11.1: Směrová vyzařovací charakteristika – prostorový model.

Prostorová ukázka směrového vyzařovacího diagramu (graf 11.1). Sledováním tvaru a porovnáním s vyzařovací charakteristikou samotného obdélníkového vlnovodu (graf 11.2) lze konstatovat, že vyzařovací charakteristika ozařovače a její hlavní lalok se blíží kruhovému tvaru díky čtvercovému vyústění. Kdežto u obdélníkového ústí vlnovodu je charakteristika po stranách zploštělá a v řezu eliptická. Tato interpretace může být zavádějící z důvodu použití poměrného vyjádření v dB, je tedy pouze pro porovnání obdélníkového a čtvercového ústí.



Graf 11.2: Vyzařovací diagram čtvercového ozařovače v rovinách E a H vyjádřený v dB.



Graf 11.3: Průběhy axiálních poměrů vyjádřené bezrozměrně pro obě polarizace.

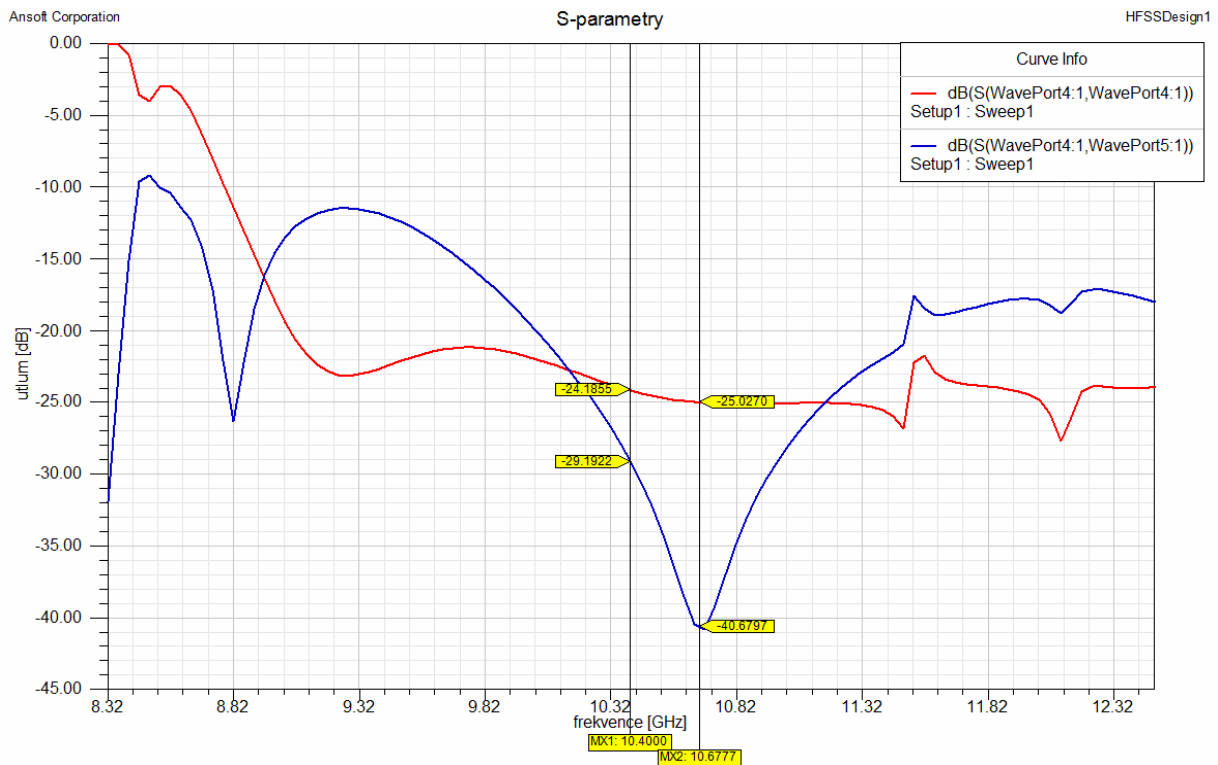
Na grafech 11.2 a 11.3 je výsledek práce v první části tohoto projektu. Grafy ukazují zásadní parametry ozařovače – vyzařovací diagram v rovinách E a H a souběh axiálních poměrů pravotočivé a levotočivé polarizace.

První graf ukazuje rozdíl intenzit elektromagnetického pole v rovině E a H. Toto označení rovin je dle mého názoru při použití kruhových polarizací zavádějící. Proto jsou označovány v grafech směrových charakteristik tyto roviny rovinou „přepážky“ a rovinou „kolmou na přepážku“. Toto označení vychází z fyzického uspořádání modelu. Na zmíněném diagramu je vidět, že ve směru záření (+90°) je patrný pouze jeden lalok s mírně zvlněnými stranami. Postranní laloky se nacházejí v opačném směru ke směru záření. Tento stav je pro záměr ozařovače parabolické antény velmi vhodný. Překrytí vyzařovacích diagramů v obou rovinách je dobré.

Z diagramu je také možno sledovat pokles úrovně záření od osy směru vyzařování. Ten je důležitý pro kvalitní ozáření parabolického zrcadla. Můžeme odečíst, že maximum v ose je 23 dB a středový úhel, při němž poklesne úroveň signálu o 8 dB je 120°.

Druhý diagram ukazuje poměr axiální polarizace určující kvality kruhové polarizace pro oba smysly otáčení. Porovnáním poměrů obou smyslů otáčení zjistíme kvalitu souběhu obou polarizací, jenž je důležitý v případě vysílání a příjmu s rozdílnou polarizací. Nebo obecně interpretováno – požadujeme univerzálnost soustavy pro možnost volby při přeladění na opačně polarizovaný signál.

Důležitým parametrem ozařovače, který v této práci zatím nebyl sledován je izolační vlastnost mezi jednotlivými branami ozařovače, tedy pronikání signálu z buzené brány na bránu určenou pro příjem.



Graf 11.4: Rozptylové parametry S_{11} (červeně) a S_{12} (modře).

Graf 11.4 zobrazuje rozptylové parametry S_{11} – odraz na vstupním portu a S_{12} – přenos mezi portem 1 (WavePort4) a 2 (WavePort5).

S_{11} – činitel odrazu postupné vlny na napájecím vlnovém portu ρ jenž je definován

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} \quad [\text{komplexní číslo}] \quad (11.1)$$

kde E_r je velikost amplitudy odražené vlny (reflected)
 E_i je velikost amplitudy postupné vlny (incident)

Bývá uváděn v napěťových decibelových hodnotách.

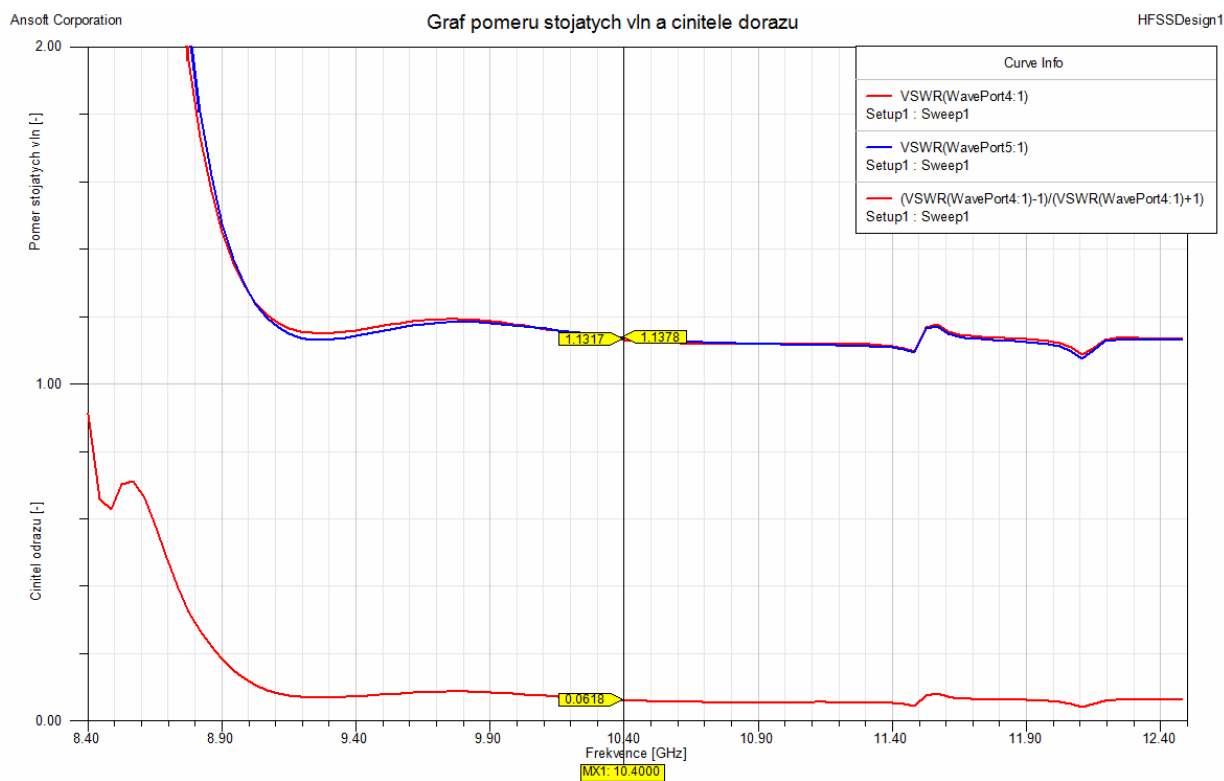
$$\rho_{[dB]} = -20 \cdot \log \frac{E_r}{E_i} \quad (11.2)$$

Z grafu vyplývá, že impedanční přizpůsobení je v rozsahu 9–11,3 GHz vyrovnané. To je důležitým faktorem pro budoucí použití ve větším rozsahu pracovních frekvencí.

S_{12} v tomto případě prezentující izolační podmínky mezi portem přijímacím a vysílacím. Charakteristika S_{12} je díky geometrické symetričnosti ozařovače shodná s parametrem S_{21} . Opět jsou podmínky vyjádřeny v decibelové míře. Pro izolační vlastnosti byl vznesen vedoucím práce požadavek na izolaci mezi porty nejlépe méně jak -20 dB. Na průběhu S_{12} výše uvedeného diagramu je pro základní frekvenci 10,4 GHz izolace -24 dB, minimum průběhu je však mimo tuto frekvenci na pozici 10,67 GHz s hodnotou -40 dB. Pro zajištění minima na námi používané frekvenci bude potřeba vhodně ladit fyzické rozměry ozařovače. To ovšem u tohoto modelu nemá smysl z důvodu jeho jednoduchosti. Ladění konkrétních parametrů je

vhodné provádět na komplexnějším modelu s reálnějšími vlnovodovými přívody pro buzení. Izolace se u složitějšího modelu bude měnit s předpokladem k horším hodnotám průběhů.

Dle diagramu obsahují průběhy parametrů několik lokálních maxim a minim. V levé části od 9 GHz níže jsou tyto jevy způsobeny mezními vlnovými délkami pro tvorbu dominantního vidu vycházejícího z rozměrů vlnovodu. Naopak v pravé části od frekvence 11,3 GHz jsou zvlnění, jejichž původ není objasněn. Je předpokládáno, že původem zniku mohou být ostré hrany na ústí ozařovače nebo nežádoucí rezonanční vazby mezi jednotlivými schody přepážky.

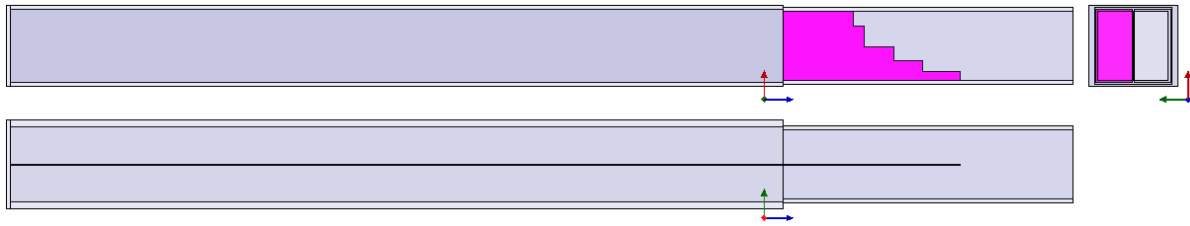


Graf 11.5: Poměr stojatých vln a činitel odrazu.

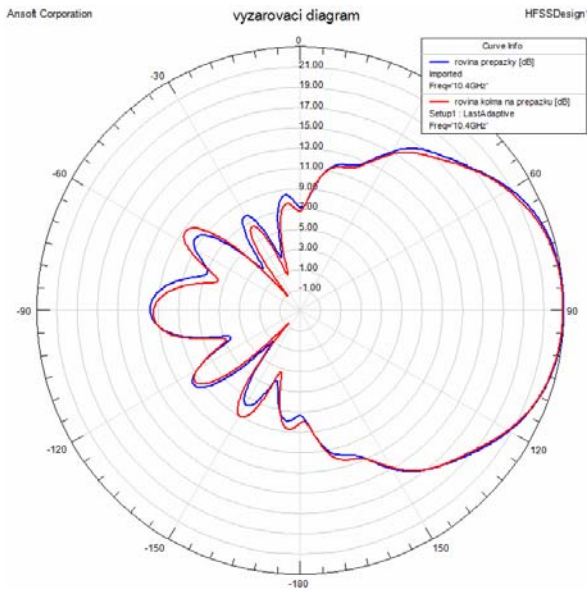
Diagram 11.5 je obdobou výše uvedeného diagramu s rozptylovými parametry S_{11} . Činitel odrazu ρ je zde zobrazen bezrozměrně ve své základní podobě. Na námi sledované frekvenci je hodnota $\rho = 0,0618$ což znamená, že se z amplitudy postupné vlny vrátí 6,18 % amplitudy jako vlna odražená. Ztráty nepřizpůsobením pak jsou ρ^2 [%] z dodaného výkonu do zátěže.

Na obr. 11.6 vidíme reálnější model s vlnovodovými přívody typu R120. Tento typový rozměr vlnovodu byl zvolen dle požadavku vedoucího, který disponuje dalším vybavením s přírubami R120. Délku přívodů jsem zvolil 20 cm.

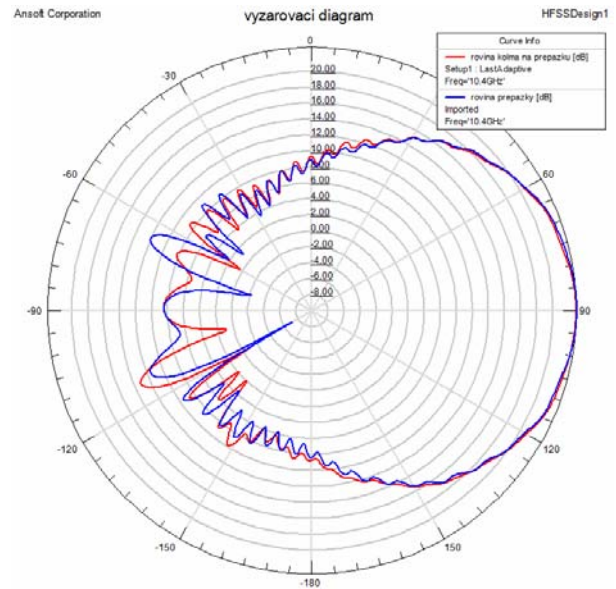
Z níže uvedeného diagramu směrové charakteristiky je patrné, že došlo ke vzniku velkého množství malých laloků po stranách a mírnému vlnění průběhu hlavního laloku. Tyto změny by neměly mít výrazný dopad na vyzařovací charakteristiku celé soustavy. Úroveň ve směru šíření je 22 dB.



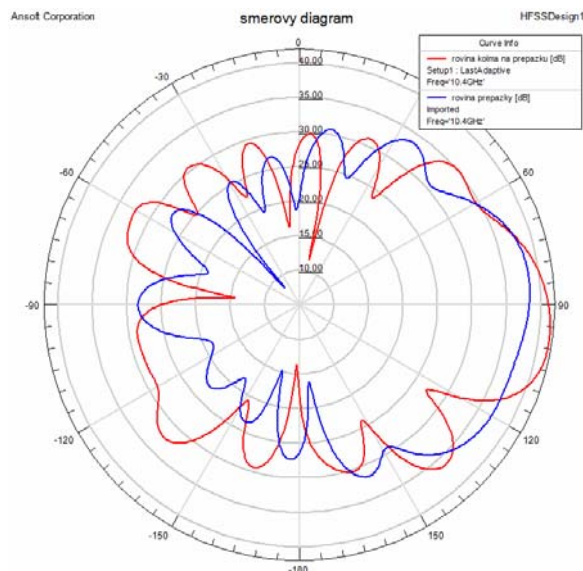
Obr. 11.6: Zářič s čtvercovým průřezem buzený dvěma vlnovody R120.



Graf 11.6: Vyzařovací diagram – čtvercový ozařovač buzený ideálním vlnovodem.



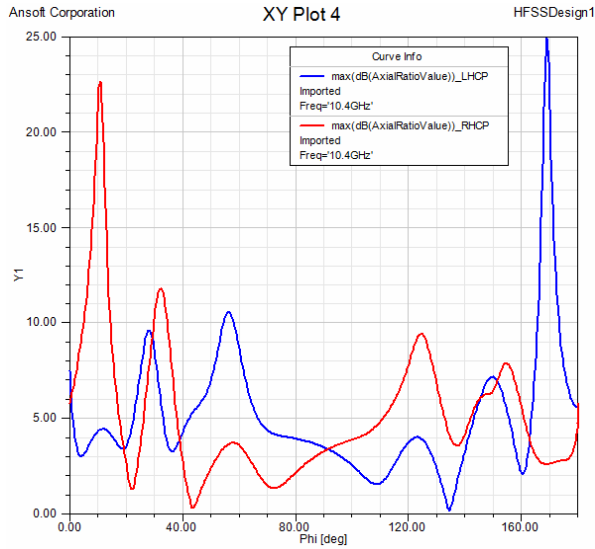
Graf 11.7: Vyzařovací diagram – čtvercový ozařovač buzený vlnovodem R120.



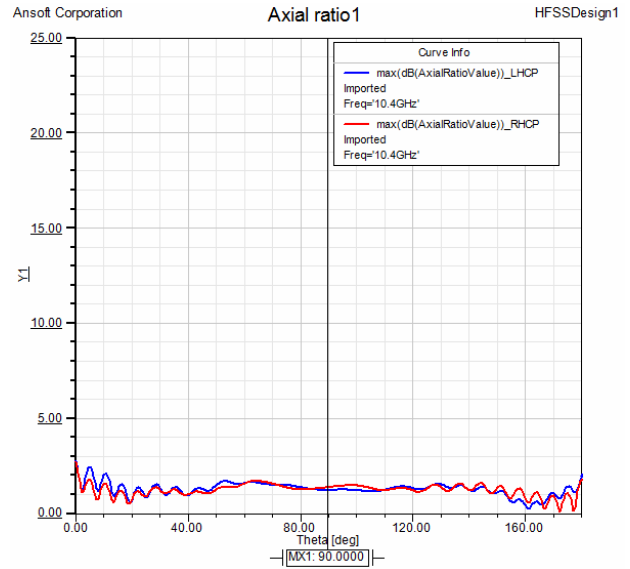
Graf 11.8: Vyzařovací diagram – čtvercový ozařovač buzený proudovou sondou.

Na posledním z vyzařovacích diagramů je uveden průběh pro čtvercový ozařovač buzený proudovou sondou. Tento je oproti předchozím dvěma průběhům značně nejednotný. Hlavní lalok téměř splývá s laloky postranými. Směrnosti v rovině přepážky i v rovině kolmé na

přepážku se neshodují. Ze vzájemné neshody ortogonálních rovin lze předpokládat špatné axiální poměry pro obě polarizace. Pro porovnání jsou zde uvedeny grafy axiálních poměrů pro oba pokročilejší simulační modely ve stejném měřítku. Na levé straně je diagram vlnovodu buzeného proudovou sondou, na pravé straně buzeného vlnovodem R120.



Graf 11.9: Axiální poměry pro ozařovač s buzením SMA.



Graf 11.10: Axiální poměry pro ozařovač s buzením R120.

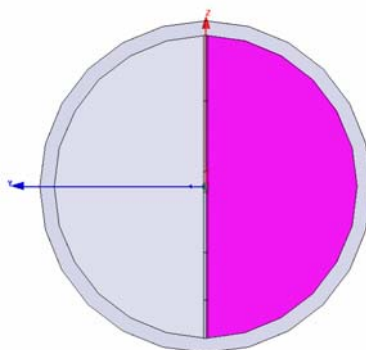
11.3. Ozařovač s kruhovým ústím

Toto řešení bylo převzato se svolením pana Davida Powise, který jej realizoval v praxi. Bohužel vypočtená prepážka vychází ze stejného zdroje jako ozařovač výše uvedený čtvercový, tedy od p. Samka. Zde jsou rozměry ozařovače původně navrženého pro frekvenci 9160 MHz.

Frequency:	9160	MHz
Calcul of wave length:	32.751	mm
Messe distance in mm		
A	11.1	Long of tooth
B	19.6	
C	28.4	
D	31.5	
E	52.4	
F	2.6	Brite of tooth
G	5.8	
H	9.9	
I	16.1	
J	20.5	
Messe in mm		
Distance from output on feed and transformer	33	K
Distance beetven dipol and rear wall	6	L
Dipol long	6	M
Thickness of septum transformer sheet	0.262	No critical parameter
Total of feed lenght	85	Total

Obr. 11.7: Snímek výpočetní šablony s hodnotami pro 9,16 GHz.

Doporučený vnitřní průměr vlnovodu $0,8 \lambda$ pro paraboly $0,35-0,4 f/d$, tedy 23,076 mm
V simulaci použitý průměr 20,54 mm. Pro hlubší paraboly se průměr zmenšuje.

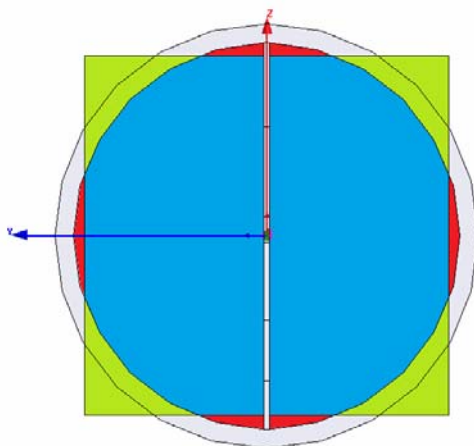


Obr. 11.8: Buzení kruhového vlnovodu párem tvarovaných (ideálních) vlnových portů (zvýrazněn jeden z nich).

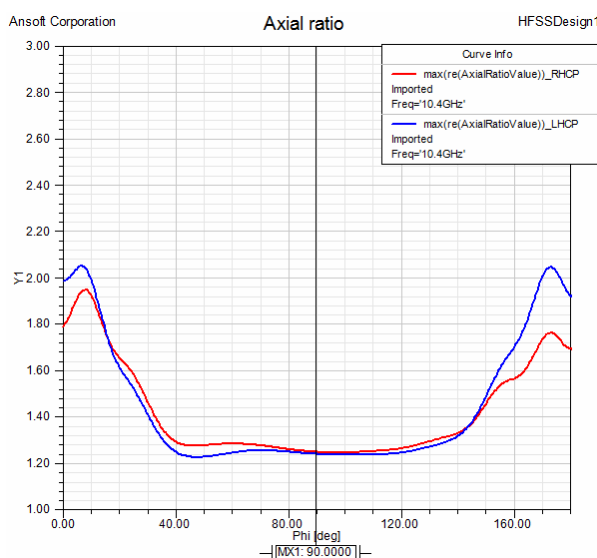


Obr. 11.9: Ozařovač kruhového průřezu s napojenými vlnovody R120.

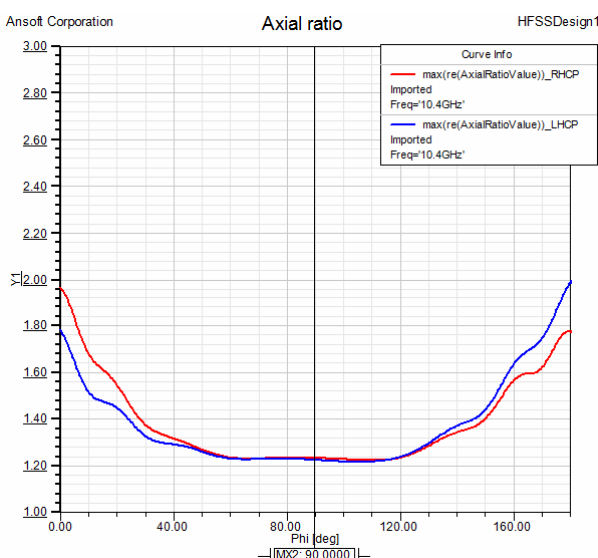
Na obr. 11.10 níže je vidět překrytí dvou budících vlnovodů typu R120 ústím vlnovodu kruhového. Zejména v rozích obdélníkových vlnovodů jsou slepá místa (zeleně), dále pak v určitých místech kruhového vlnovodu je tento nedosvícen (červeně). Oba tyto fakty, po kontrole simulovaných elektromagnetických polí, mají minimální dopad na výsledné vyzařovací charakteristiky i PSV.



Obr.11.10: Buzení kruhového ozařovače obdélníkovým vlnovodem R120.



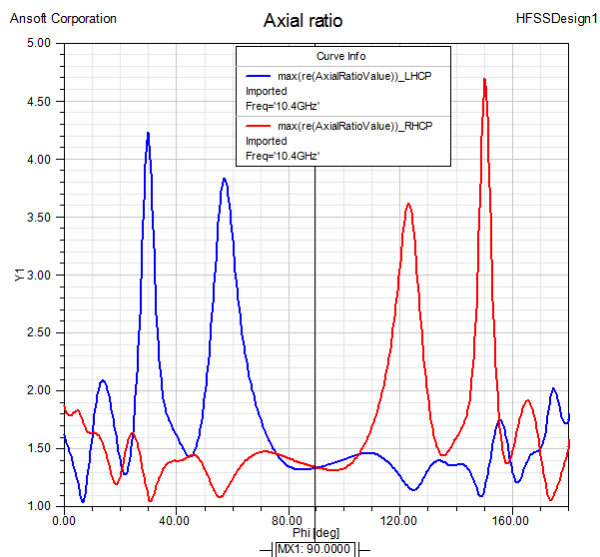
Graf 11.11: Axiální poměry pro kruhový ozařovač s buzením ideálním vlnovodem.



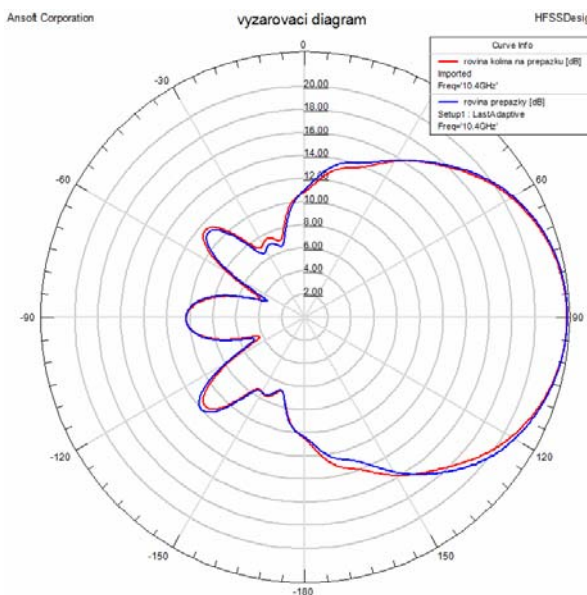
Graf 11.12: Axiální poměry pro ozařovač buzený vlnovodem R120.

Z diagramů je vidět, že v případě porovnání jednoduššího modelu s modelem reálnějším nedošlo k zhoršení.

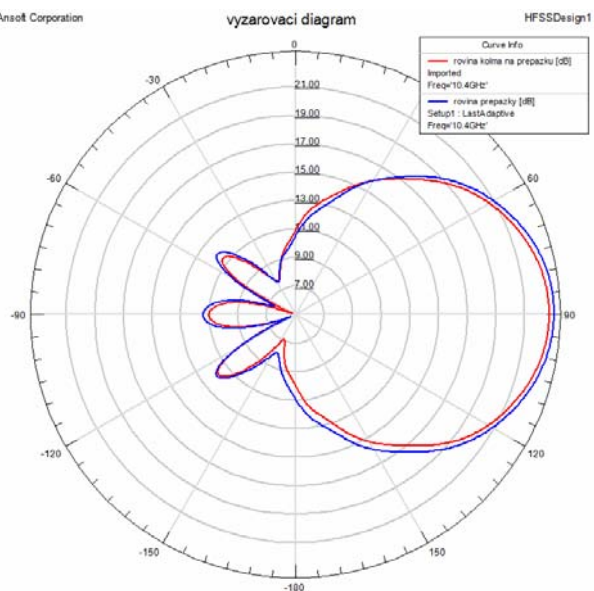
Na následujícím grafu je uvedena nevyrovnaná charakteristika axiálního poměru kruhového ozařovače buzeného proudovou sondou.



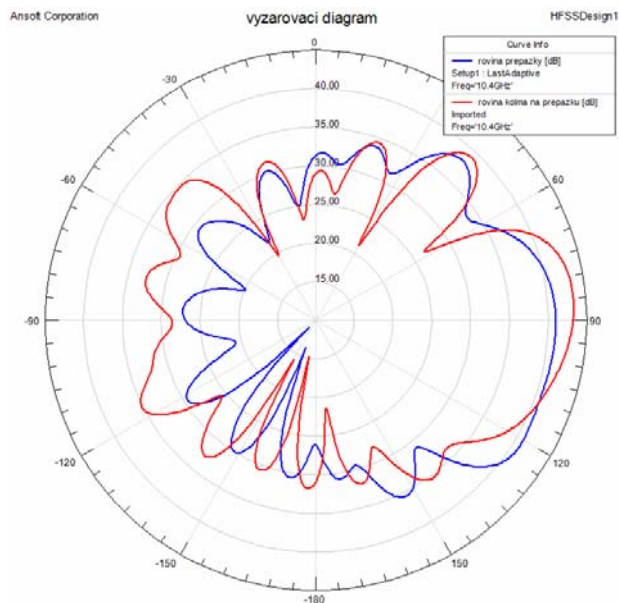
Graf 11.13: Axiální poměr kruhového ozařovače buzeného proudovou sondou.



Graf 11.14: Vyzařovací diagram – kruhový ozařovač buzen ideálním vlnovodem.

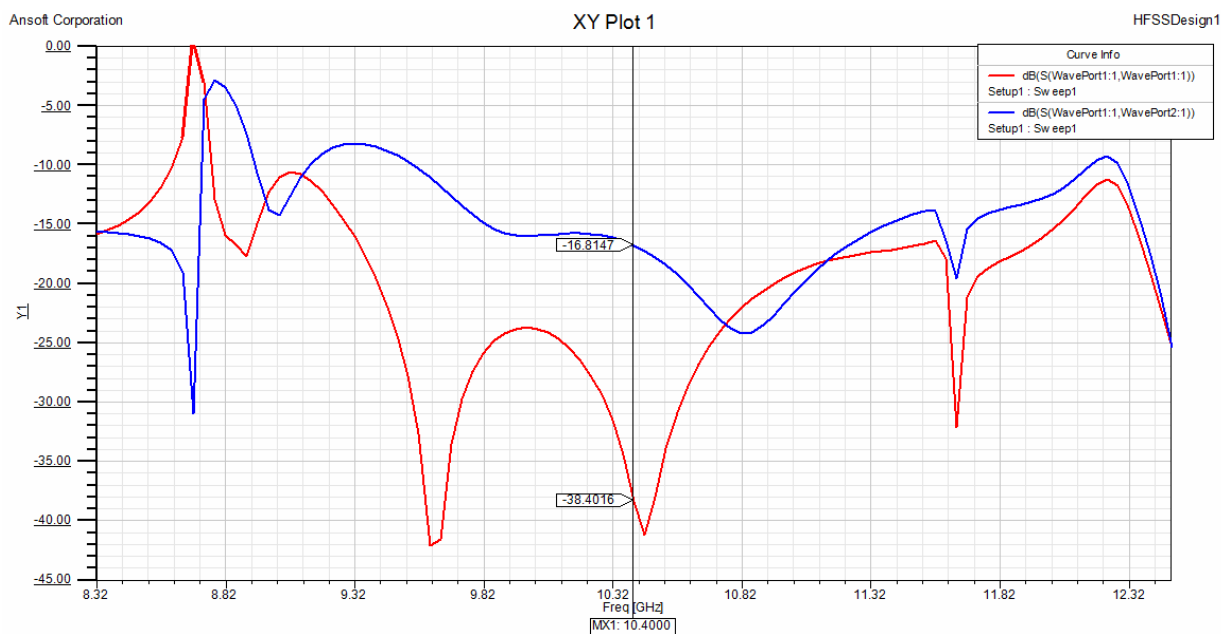


Graf 11.15: Vyzařovací diagram – kruhový ozařovač buzený vlnovodem R120.

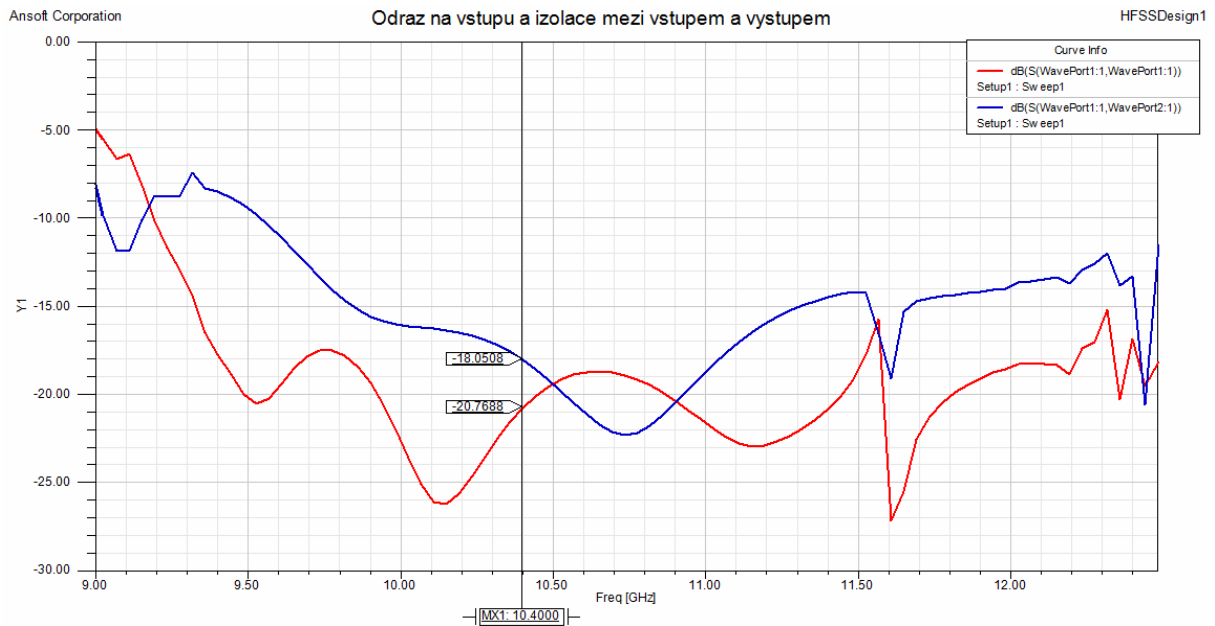


Graf 11.16: Vyzařovací diagram – kruhový ozařovač buzený proudovou sondou.

Z grafů směrových charakteristik se potvrzují špatné výsledky výstupů simulací pro buzení proudovou sondou. Vedlejší laloky jsou velmi výrazné a to i ve směru vysílání. Navíc se jednotlivé roviny svou vyzařovací charakteristikou neshodují, čímž zabraňují tvorbě kvalitní kruhové polarizace.



Graf 11.17: Rozptylové parametry S_{11} a S_{12} ozařovače napájeného ideálním vlnovodem, S_{11} (červeně) S_{12} (modře).

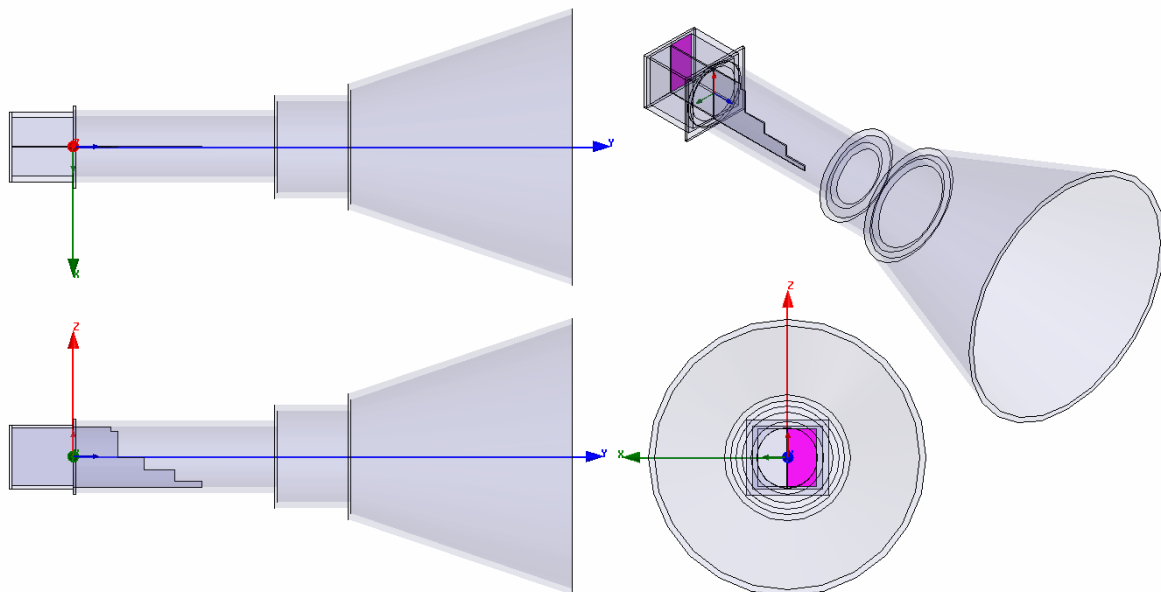


Graf 11.18: Rozptylové parametry ozařovače buzeného vlnovodem R120, S_{11} (červeně), S_{12} (modře).

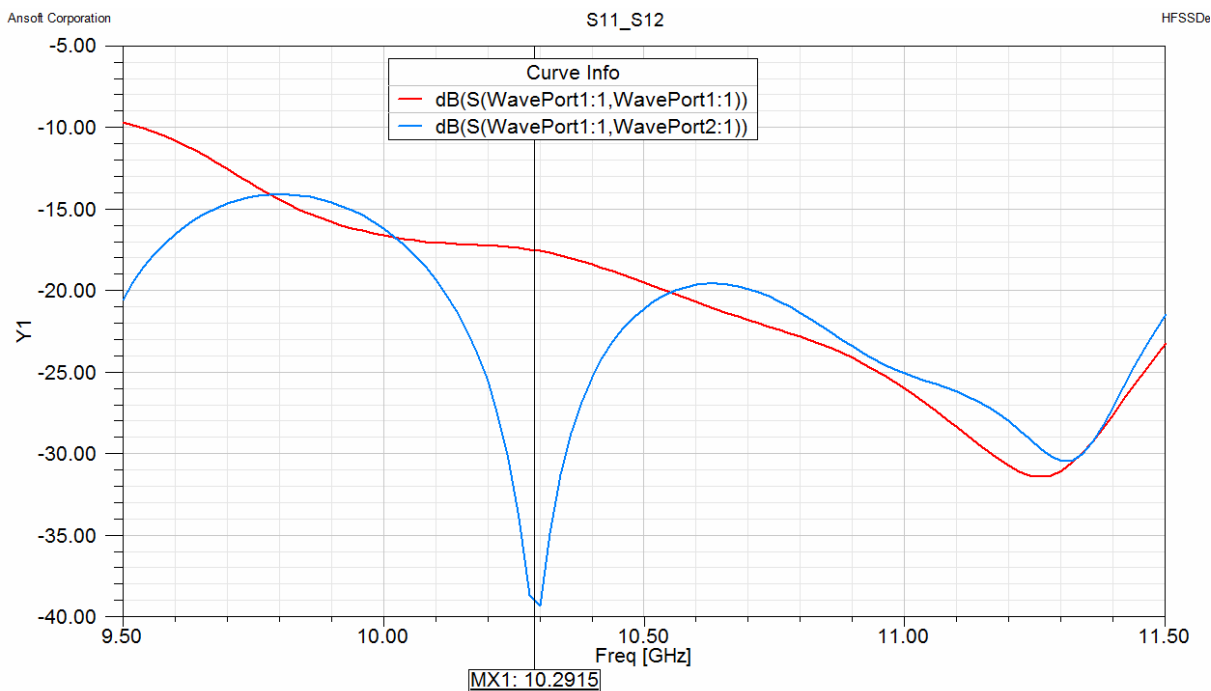
Ozařovač s připojeným vlnovodovým vedením vykazuje větší izolační hodnoty mezi porty oproti základnímu modelu. Tento fakt je pochopitelný z důvodu několikanásobně delší trasy mezi porty. Oproti tomu se přizpůsobení viditelně zhoršilo. Průběhy jsou charakterem z principu funkce podobné výše popsanému ozařovači s čtvercovým průřezem. Na nejnižších kmitočtech se projevuje limitace rozměry vlnovodu vůči šíření dominantního vidu. Na vyšších kmitočtech nejsou zlomy v průbězích vysvětleny.

11.4. Ozařovač s trychtýřovým kruhovým ústím

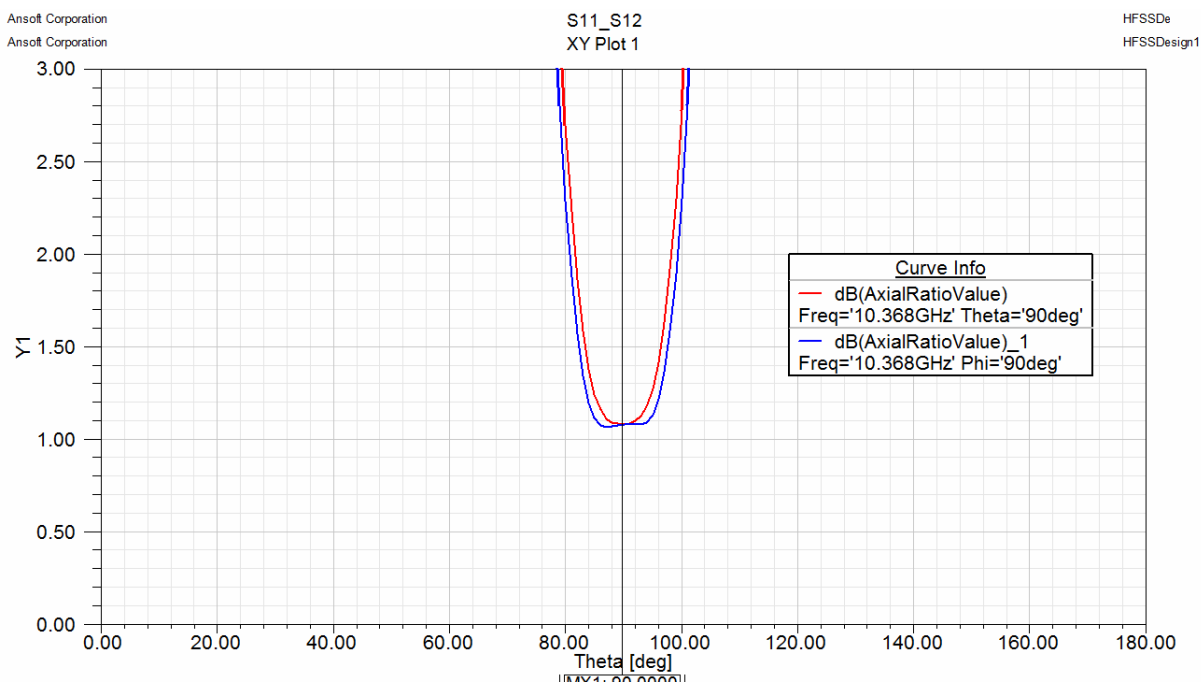
Autorem je Dmitriev Dmitry působící pod mezinárodním volacím znakem RA3AQ. Navrhovaná frekvence 10368 MHz.



Obr. 11.11: Kruhový zářič s trychtýřovým ústím buzený dvěma vlnovody R120.



Graf 11.19: Rozptylové parametry S_{11} a S_{12} kruhového zářiče s trychtýřovým ústím.



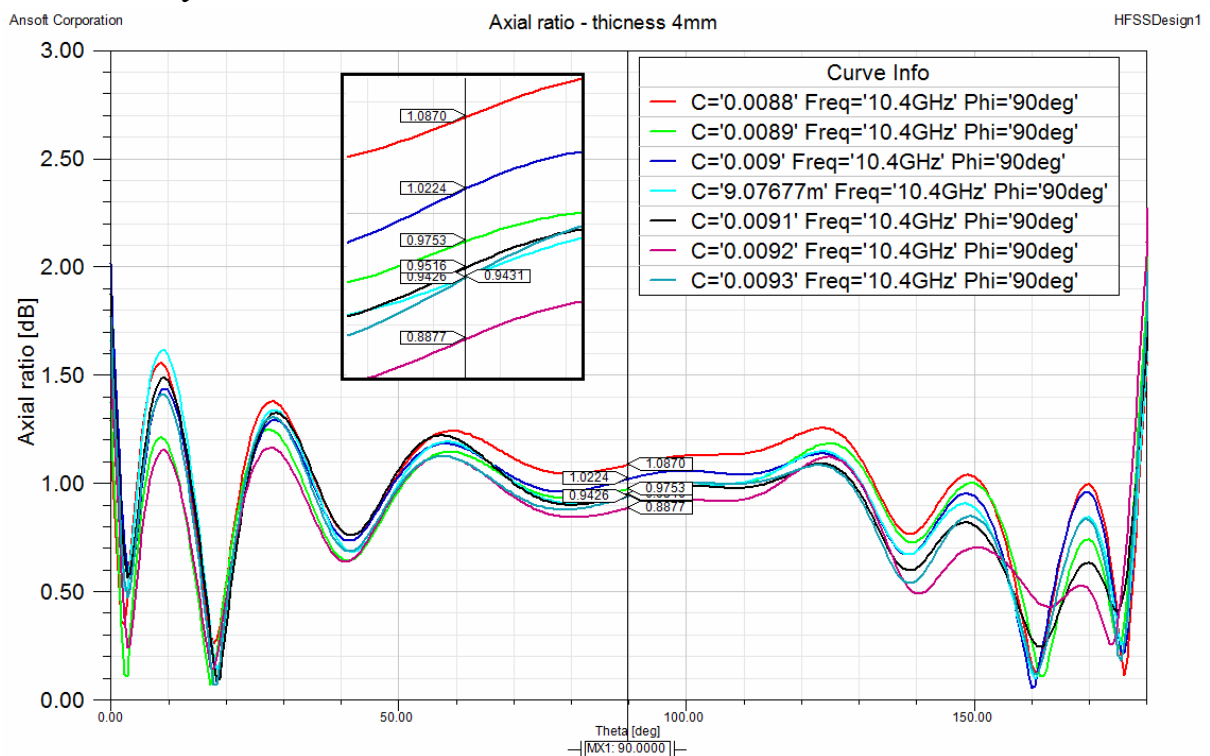
Graf 11.20: Axiální poměr kruhového zářiče s trychtýřovým ústím.

Charakteristika axiálních poměrů obou polarizací tohoto ozařovače s trychtýřovým ústím je velmi úzká. Přizpůsobení vstupního portu není vysoké a výrazné minimum v meziportové izolační charakteristice má šířku pouze 100 MHz na úrovni -30 dB.

12. Ladění ozařovače

V předchozích kapitolách byli srovnávány dvě konstrukční řešení a dvě napájecí varianty. Tyto převzaté řešení nejsou dostatečně přizpůsobeny požadovaným parametřům tohoto zadání. Například výše uvedený kruhový ozařovač byl navržen pro jinou pracovní frekvenci. Nyní je třeba optimalizovat požadované charakteristiky fyzickým naladěním ozařovačů. Simulacemi je nutné dosáhnout nejlepších možných hodnot, protože v reálném ztvárnění budou tyto hodnoty kvalitativně horší z důvodu částečně idealizovaných podmínek simulací. Samotnou přepážku lze modifikovat v několika směrech. Lze upravovat výšku schodu, délku schodu, tloušťku přepážky a počet schodů. Nepotvrzenou myšlenkou je předpoklad, že každý jednotlivý schod je možné ladit samostatně.

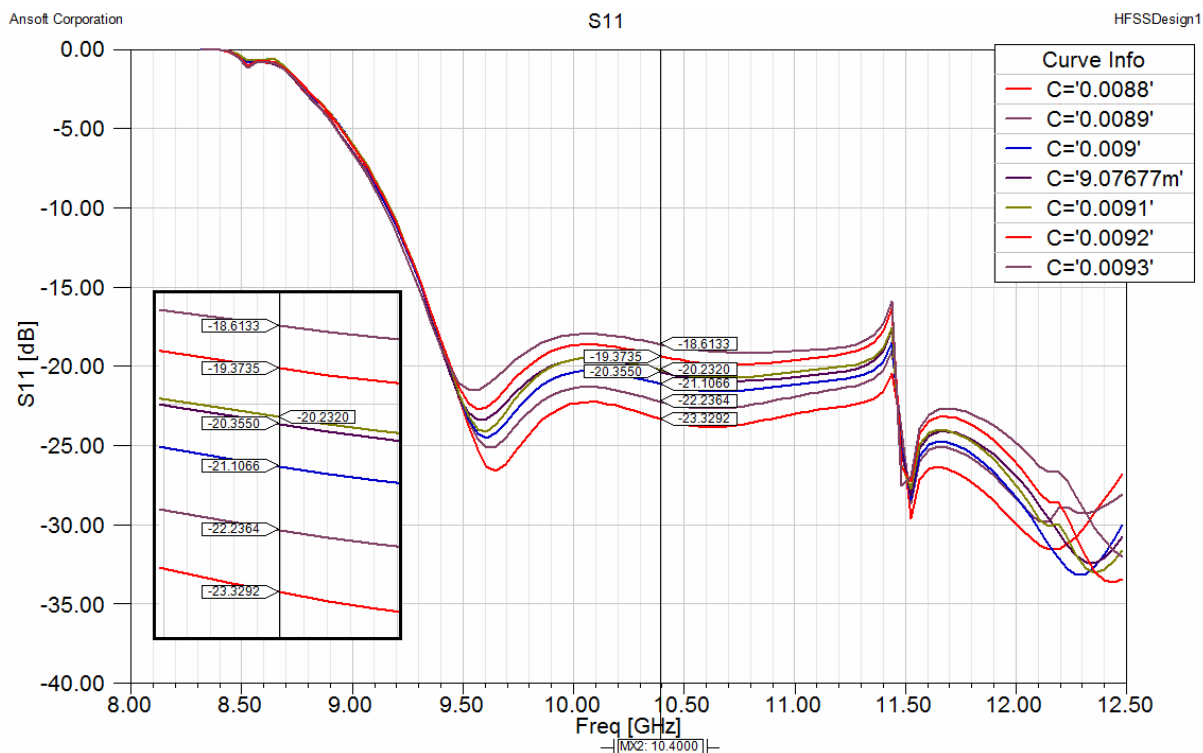
12.1. Výška schodů



Graf 12.1: Axiální poměry pro laděnou výšku jednoho schodu přepážky – krok 0,1 mm.

Z uvedené charakteristiky je vidět závislost změny výšky schodu v krocích po desetínách milimetru. Axiální poměr se zde mění v řádu setin dB a to v neuspořádaných skocích kolem střední hodnoty. Jinak je tomu u charakteristiky S_{11} – přizpůsobení vstupního portu. Zde s rostoucí výškou schodu klesá přizpůsobení lineárně. Navýšení o desetinu milimetru znamená zhoršení o jeden dB. Stejný druh závislosti platí i pro meziportovou izolaci se zhoršením v krocích po +0,5 dB. Při optimalizaci všech schodů je zlepšení axiálního poměru asi 0,3 dB, což není mnoho. A jak se dále ukázalo, ladění jiných rozměrů ozařovače je účinnější.

Optimalizace výšky schodů, ať už váhovou optimalizační analýzou, nebo pouhým výběrem z parametrického řešení je značně časově a výpočetně náročná.

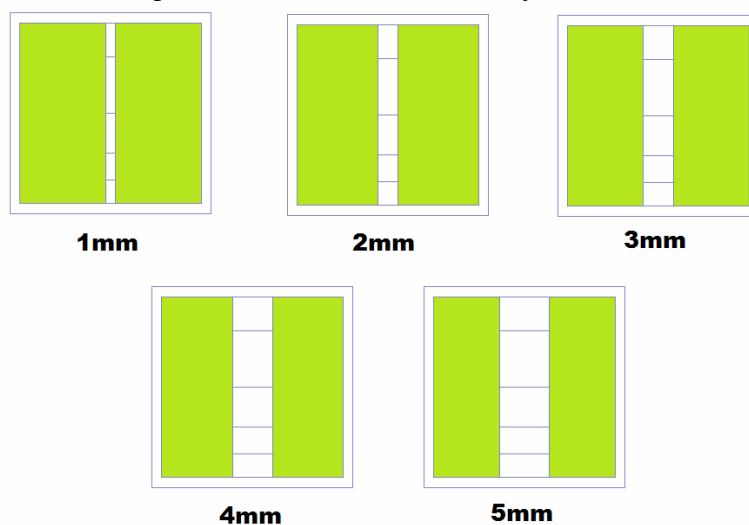


Graf 12.2: Přizpůsobení portu pro laděnou výšku jednoho schodu přepážky – krok 0,1 mm.

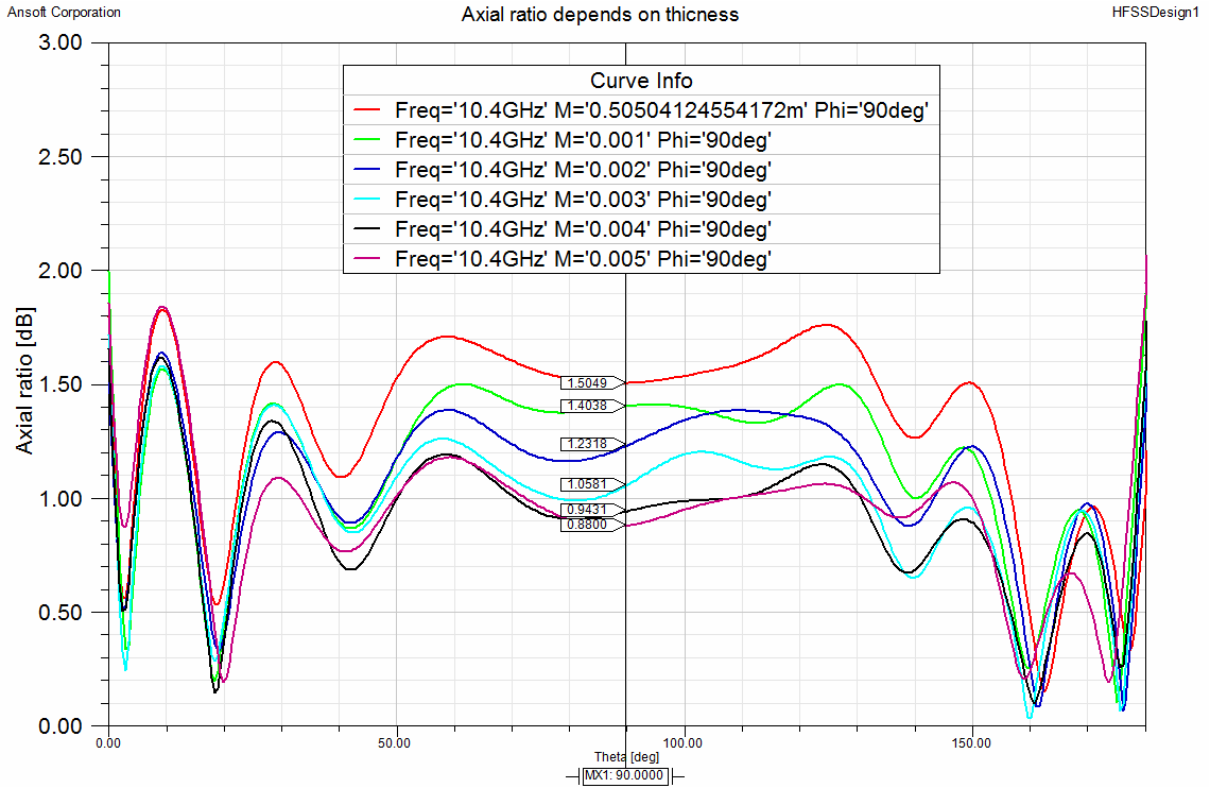
12.2. Tloušťka přepážky

Změna tloušťky je v tomto uvedeném případě pouze ilustrativní. Se zvětšující se tloušťkou přepážky se zmenšuje velikost činné plochy ideálních budících portů (zeleně) bez dalších vlnododových přívodů. Nejsou dodrženy horizontální rozměry typizovaných vlnododů R120. Proto nevzniknou slepá místa na rozhraní dvou vlnododových přívodů a zadní části čtvercového ozařovače.

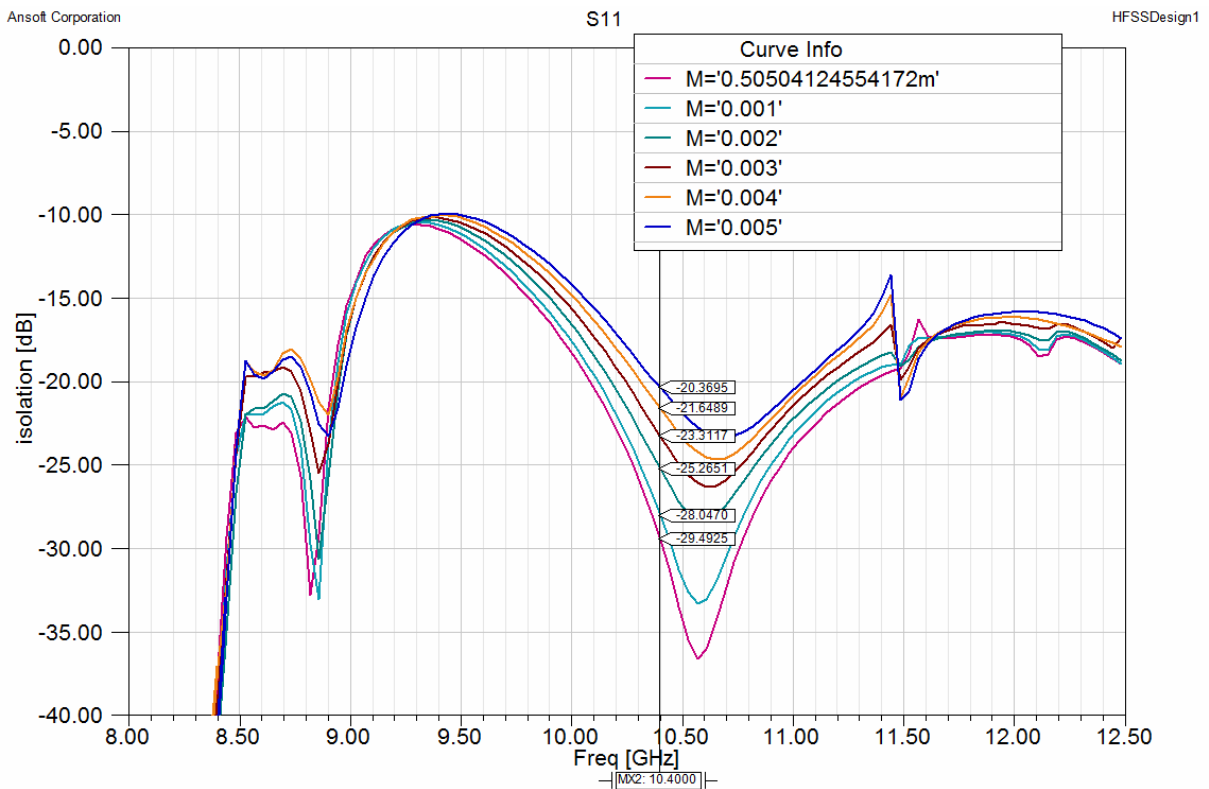
I přes tyto omezení tento zjednodušený model ukazuje možnosti ladění ozařovače. Při změně tloušťky přepážky o 1 mm nastává zlepšení axiálního poměru o 0,1-0,2 dB. Při zvětšení tloušťky přepážky až na 5 mm nastává snížení axiálního poměru o 0,7 dB. Charakteristika S_{11} v tomto případě není průkazná. Na charakteristice meziportové izolace je však vidět s rostoucí tloušťkou přepážky vyrovnávání charakteristiky a zánik výrazného minima. Tento stav lze hodnotit jako zhoršení. Pro příliš úzké minimum může být tento efekt žádoucí.



Obr. 12.1: Zářič s čtvercovým průřezem – změna šířky přepážky i aktivní plochy vlnododů.



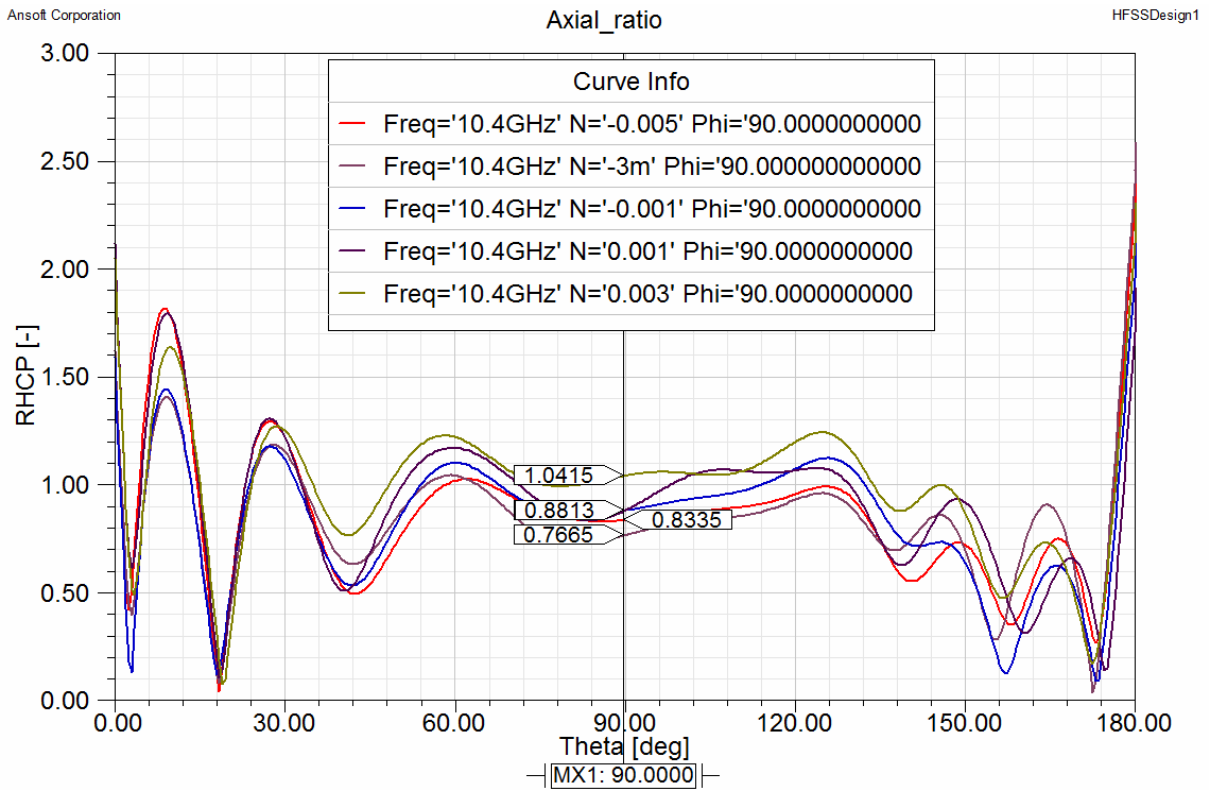
Graf 12.3: Axiální poměry pro změnu šířky přepážky i aktivní plochy vlnodů.



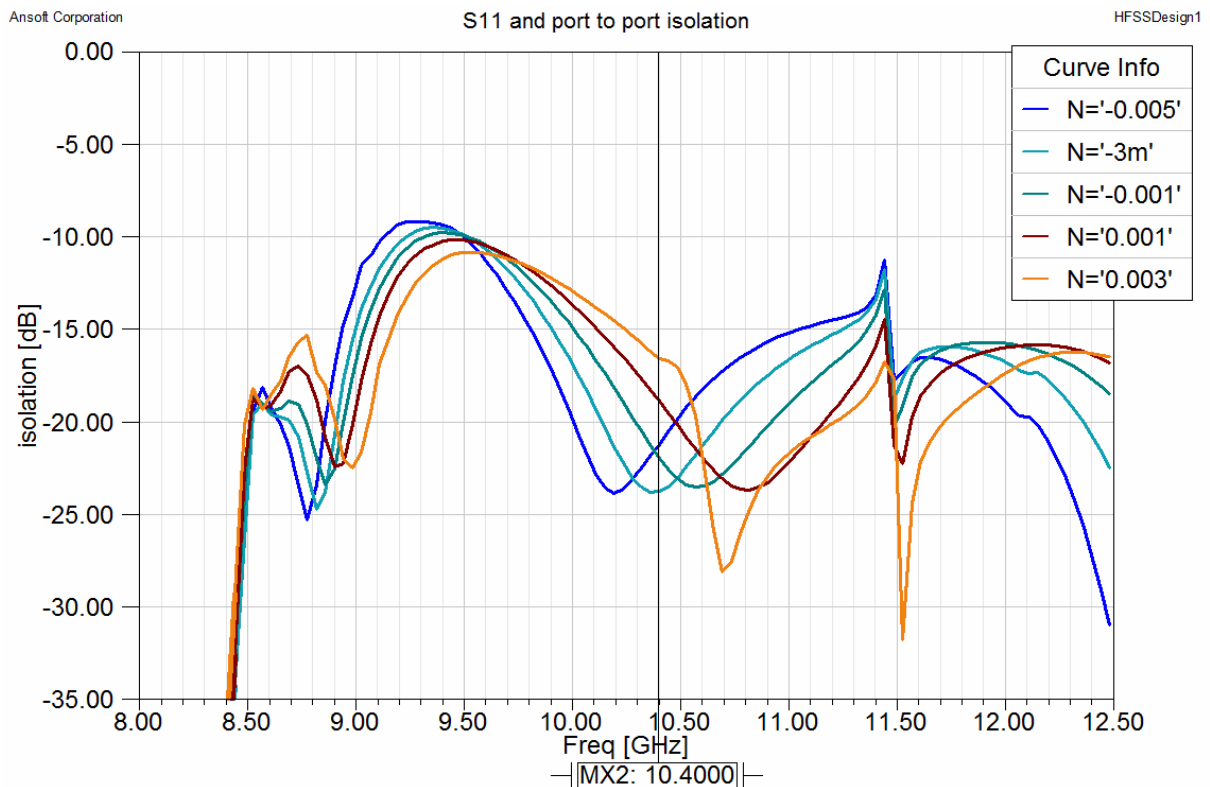
Graf 12.4: Izolační poměry mezi porty v závislosti na změně tloušťky přepážky.

12.3. Posuv přepážkou

Posuv přepážkou směrem k ústí nebo od něj je velmi účinným pro zlepšení axiálního poměru. Ale především umožňuje naladit minimum v meziportové izolační charakteristice na požadovaný střední kmitočet. Každý 1 mm posune charakteristiku o 100 MHz. Posuvem směrem k ústí kmitočet minima roste.



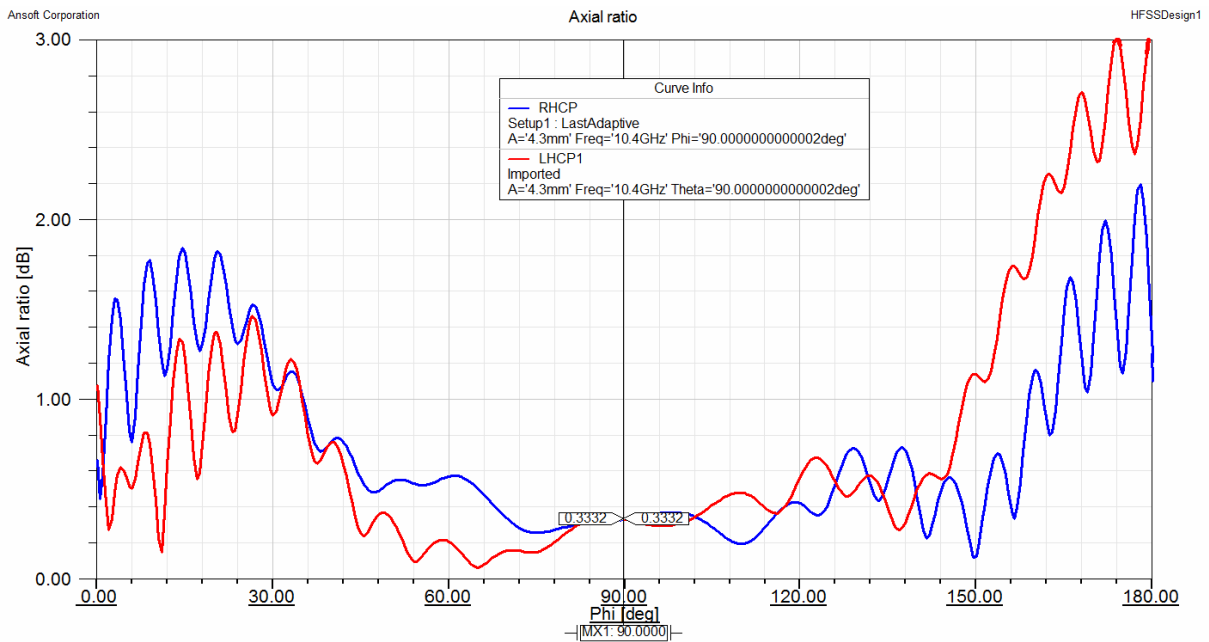
Graf 12.5: Axiální poměry pro posuv přepážkou – kladné kroky reprezentují posuv přepážky k ústí zářiče.



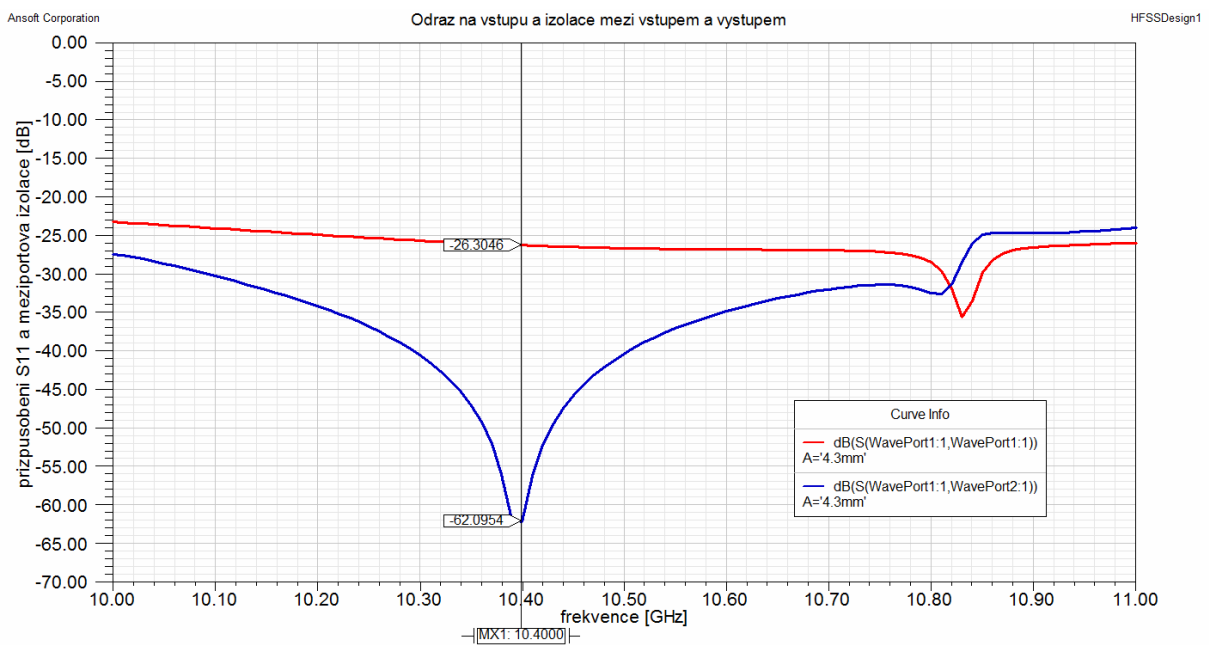
Graf 12.6: : Izolační poměry mezi porty v závislosti na posuvu přepážkou k ústí zářiče.

12.4. Velikost ústí

Změnou velikosti ústí ozařovače měníme frekvenci dominantního vidu. Zvětšováním ústí omezujeme mrtvé místa ve spojení ozařovač – napájecí vlnovody. Negativem je posunutí dominantního vidu k nižším frekvencím a možnost vzniku dalších vidových kombinací. Zmenšením slepých míst by se měl zlepšit axiální poměr, ten se v praxi nemění. Zlepšují se však dílčí parametry – přizpůsobení a izolace mezi porty. Na níže uvedených snímcích jsou zachyceny průběhy ozařovače s čtvercovým ústím s šířkou a výškou stejnou s delší stranou vlnovodu R120. Tím zcela odpadají slepá místa. Nevýhodou je ve frekvenční charakteristice meziportové izolace velmi úzké minimum. Toto minimum svou šířkou vyhovuje pro přijímaný signál, jehož šířka pásma je přibližně stejná. Nevýhoda úzké šířky pásma minima spočívá v citlivosti celé konstrukce na výrobní tolerance a nepřesnosti. Při minimální změně se dané minimum velmi pravděpodobně odladí z požadované frekvence zcela pryč. Proto je žádoucí minimum rozšířit dalším laděním a zajistit tím větší výrobní tolerance.



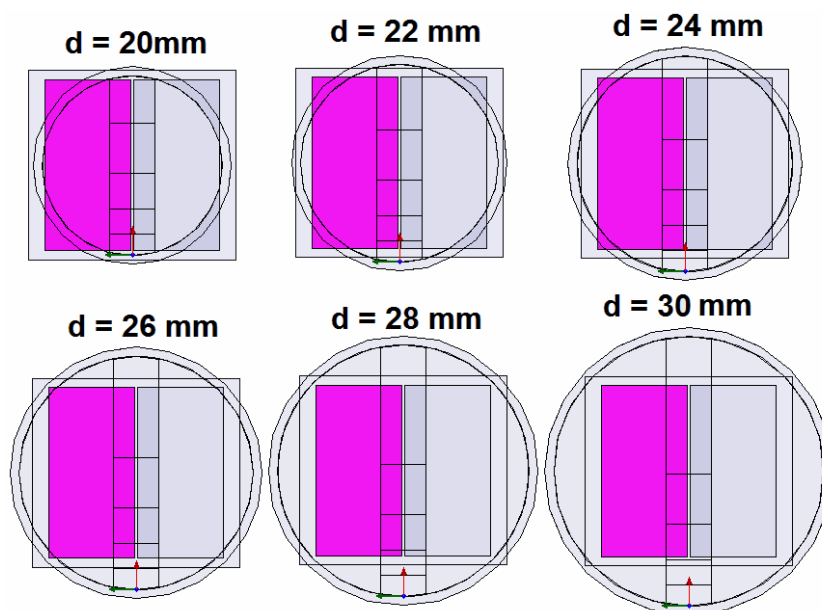
Graf 12.7: Axiální poměry pro ozařovač s čtvercovým ústím.



Graf 12.8: Přizpůsobení portů (červeně), izolace mezi porty (modře).

Na obrázku je jedna z variant sledující vazbu mezi napájecími obdélníkovými vlnovody velikosti R120 a tělem ozařovače kruhového průřezu. Zobrazena je zkoumaná varianta přepážky o tloušťce 5 mm.

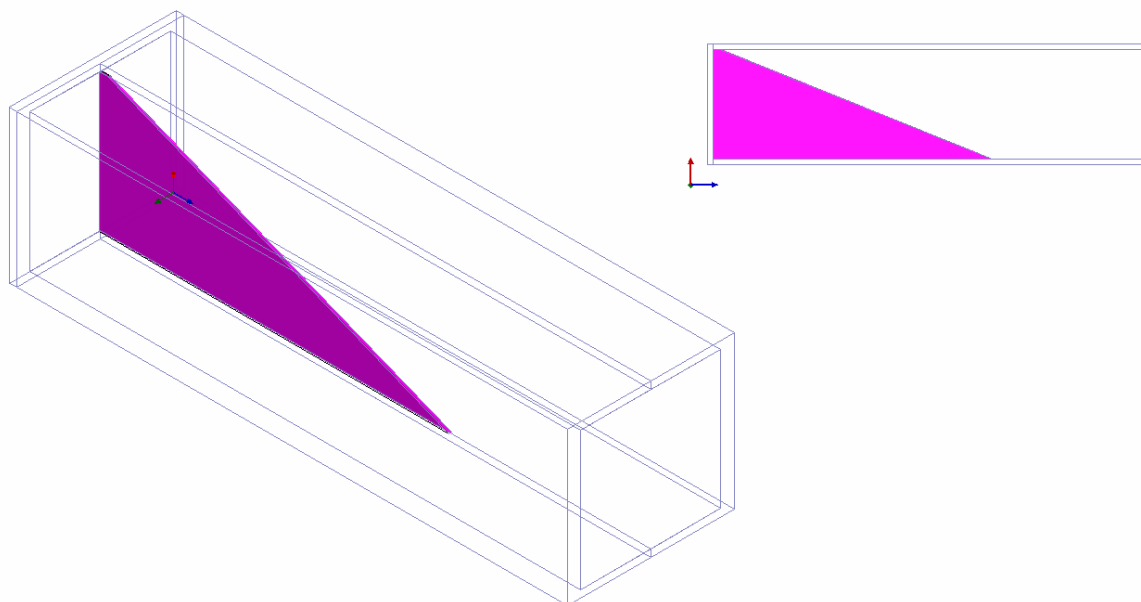
Tato variace s velkou tloušťkou přepážky nevykázala žádné vhodné výsledky.



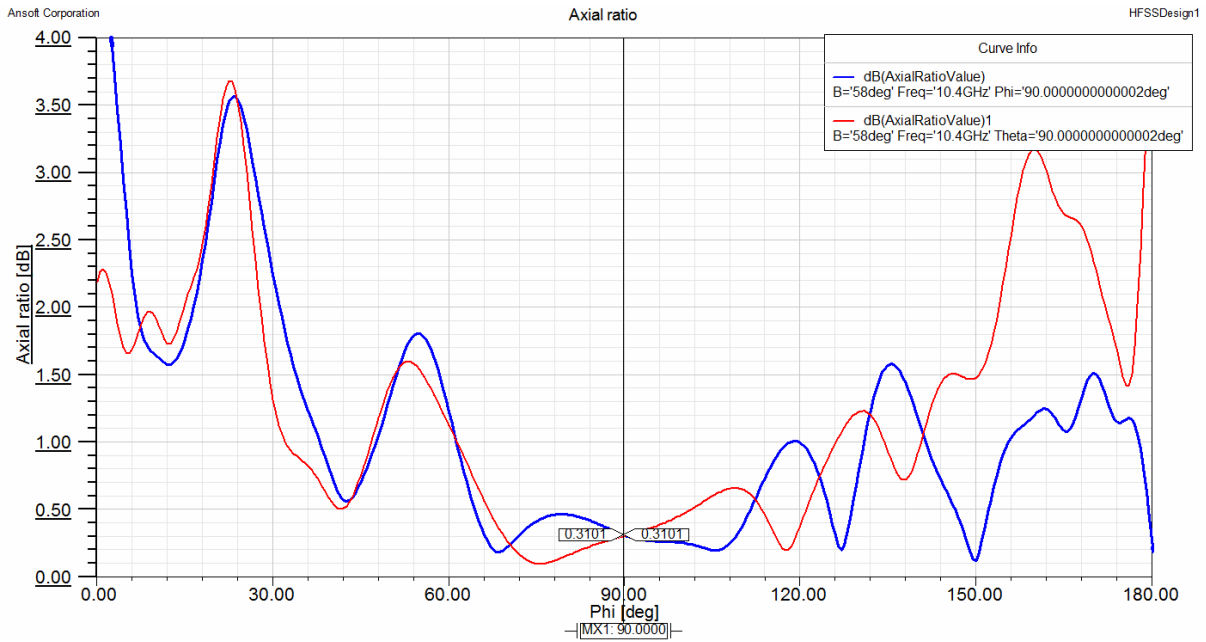
Obr. 12.2: Zářič s kruhovým průřezem buzený dvěma vlnovody R120.

12.5. Šikmá přepážka

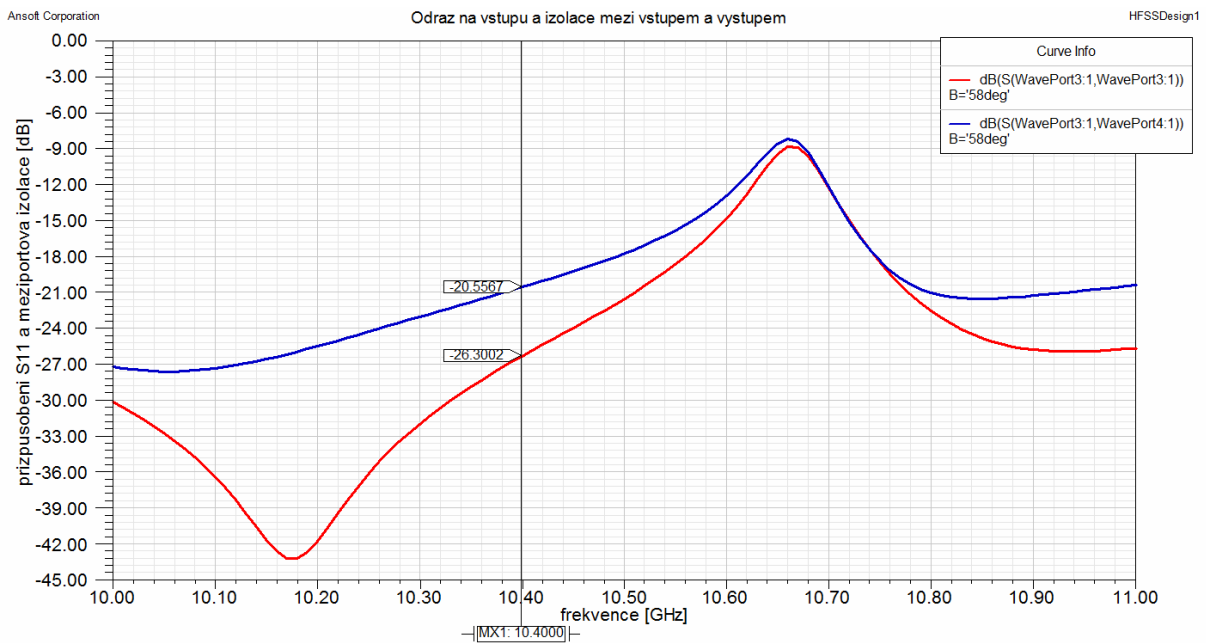
Přepážka je zvláštním případem. Lze označit za lineární. Parametrem pro ladění je zde úhel sklonu přepážky. Na uvedeném vyobrazení je sklon přepážky 22° , vhodným sklonem pro tento omezený model se ukázal sklon 32° . Charakteristika axiálního poměru je v požadovaném vyzařovacím úhlu značně nevyrovnaná. Pod úrovní axiálního poměru 1 dB je šířka charakteristiky přibližně 60° .



Obr. 12.3: Zářič s čtvercovým průřezem a šikmou lineární přepážkou buzený ideálními vlnovodovými porty.



Graf 12.9: Axiální poměry pro ozařovač s čtvercovým ústím a šikmou lineární přepážkou.



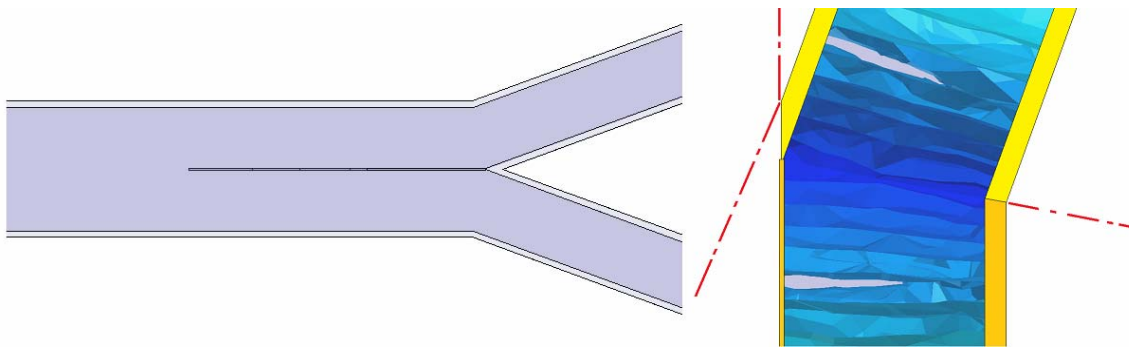
Graf 12.10: Přizpůsobení portů (červeně), izolace mezi porty (modře) ozařovače s lineární přepážkou.

13. Výsledné řešení

V závěru práce byli zvoleny dvě řešení pro budoucí realizaci. Ozařovač s kruhovým ústím napájený dvěma vlnovody R120 a přepážkou tloušťky 3 mm a ozařovač s čtvercovým ústím napájený taktéž dvěma vlnovody R120 a s přepážkou o tloušťce 0,4 mm.

Modely byly přepracovány do reálné konstrukční podoby. Ta se odvíjí od rozměrů dostupných napájecích vlnovodů. Jako nejlepší vhodné uspořádání přívodů se ukázalo souběžné paralelní přivedení. Další se zjišťovaných variant bylo přivedení vlnovodů pod mírným zkosením. Úhel zkosení obou přívodů je 20° . Tato realizační varianta umožňuje použití přepážky o menší tloušťce bez schodu na rozhraní přívodů a přepážky. Nevýhodou je obtížné dílenské zpracování s nutností precizního strojního obrábění.

V obou případech je nutností odstranění přírub vlnovodů v místě napojení na ozařovač z důvodu potřeby nejmenší šířky mezi vnitřními stěnami vlnovodů a tedy šířce přepážky na tyto stěny navazující. Samotná tloušťka stěn vlnovodů je 1,5 mm. Po složení dvou vlnovodů bez přírub k sobě svými delšími stranami vznikne vnitřní stěna tloušťky 3 mm.



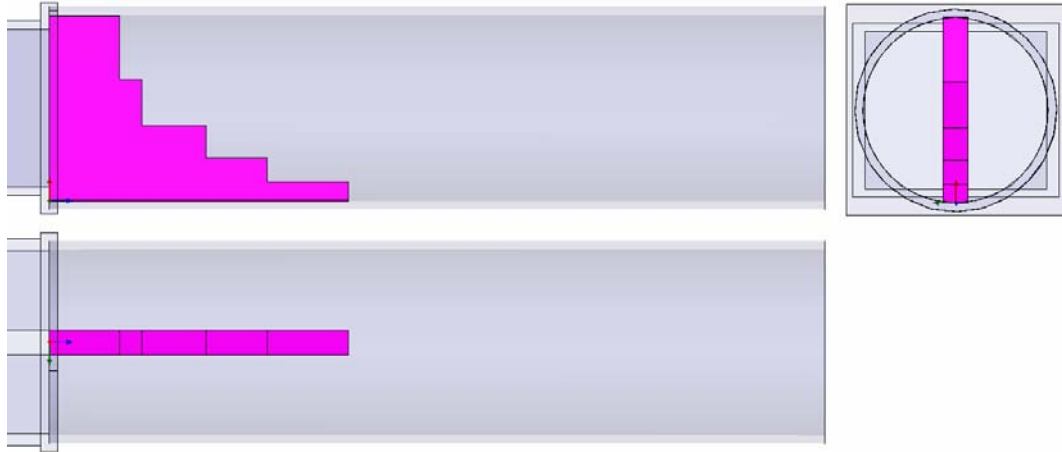
Obr. 13.1: Zářič s čtvercovým průřezem buzený dvěma vlnovody R120 zkosenými pod úhlem 20° , vpravo tělo přívodního vlnovodu (žlutě) a polovina těla ozařovače (oranžově).

V pravé části obrázku 13.1 je zachyceno elektromagnetické pole uvnitř vlnovodu se zkoseným napojením. Postupná vlna v takto napojeném vlnovodu musí překonat od napájecího portu k ústí ozařovače různou vzdálenost. Trasa postupné vlny po vnitřní stěně je delší než trasa po stěně vnější. Tento rozdíl vzniká právě na zkoseném napojení vlnovodů na ozařovač. Výsledná postupná vlna poté ústí do ozařovače s malým fázovým posunem. Dopad na charakteristiku axiálního poměru byl zanedbatelně malý.

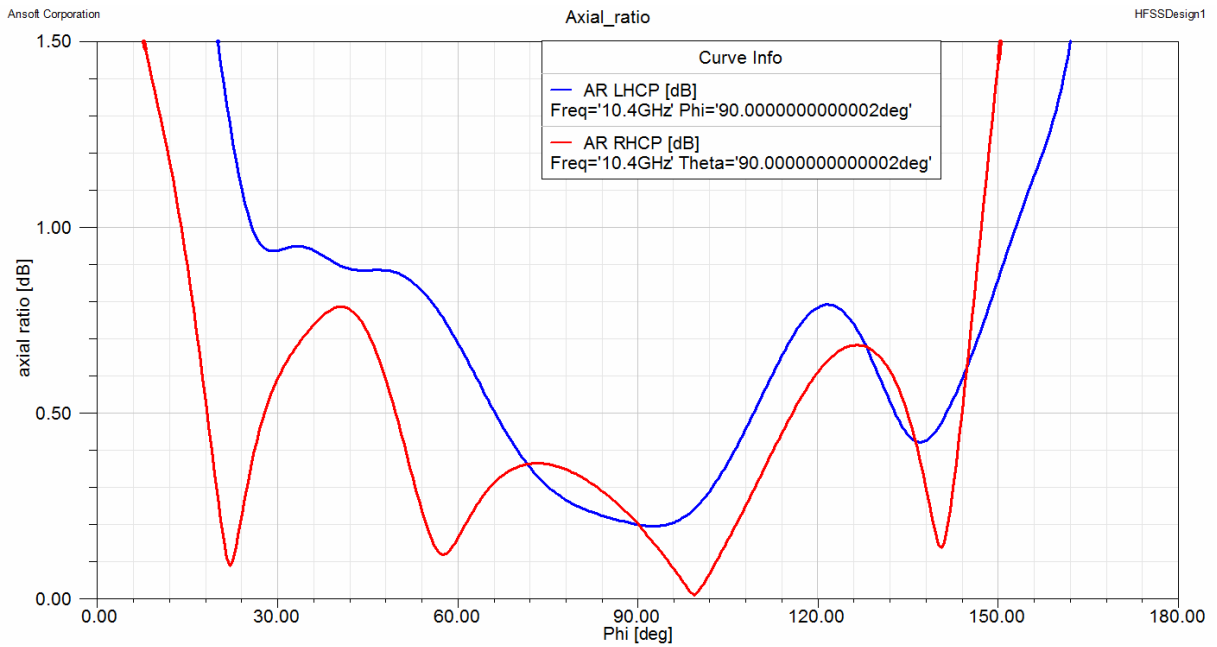
13.1. Ozařovač s kruhovým průřezem ústí

V případě ozařovače s kruhovým ústím byl kladen důraz při optimalizaci na použití přepážky shodné tloušťky, tedy 3 mm. Záměrem byla eliminace schodu v napojení přívodních vlnovodů a přepážkou. Nevyhnutelným negativem řešení s kruhovým ústím jsou slepá místa. Z celkové plochy obou vlnovodů zabírají 19 %.

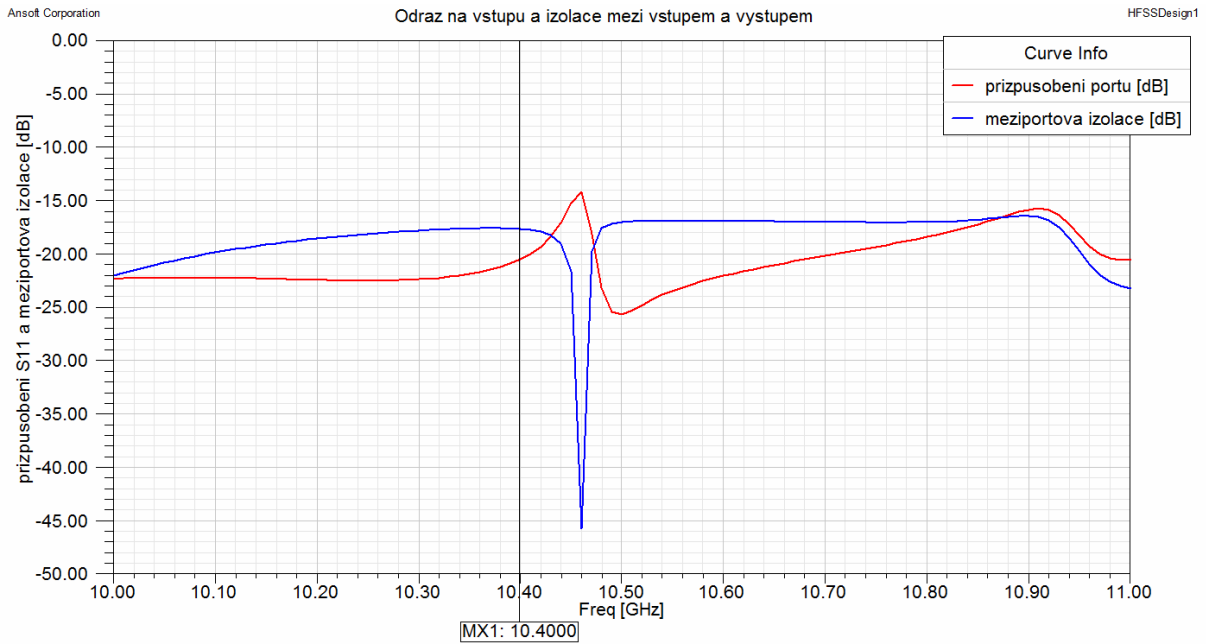
Všechny rozměry ozařovače byly pečlivě laděny především pro nejlepší dosažitelnou jakost axiálních poměrů. Tento sledovaný záměr se druhotně projevil na dalších parametrech ozařovače. Vyzařovací charakteristika v obou rovinách vykazuje pokles intenzity na okrajích požadované šíře svazku (120°) -7 dB. Přízpusobením odrazu energie na obou portech dosahuje hodnot (-20,5 dB), stejně tak izolační poměry mezi porty navzájem (-17,7 dB).



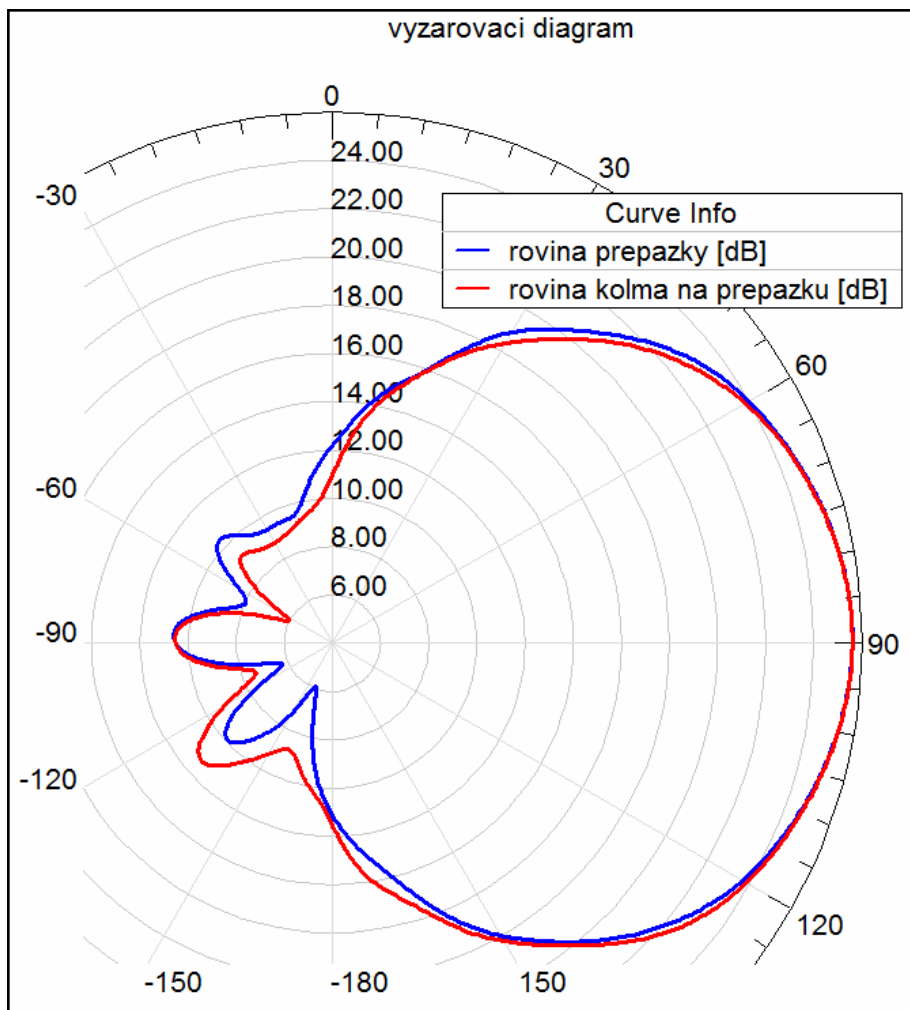
Obr. 13.2: Zářič s kruhovým průřezem buzený dvěma vlnovody R120.



Graf 13.1: Axiální poměry pro ozařovač s kruhovým průřezem ústí.



Graf 13.2: Přizpůsobení portů (červeně), izolace mezi porty (modře) ozařovače s kruhovým průřezem ústí.

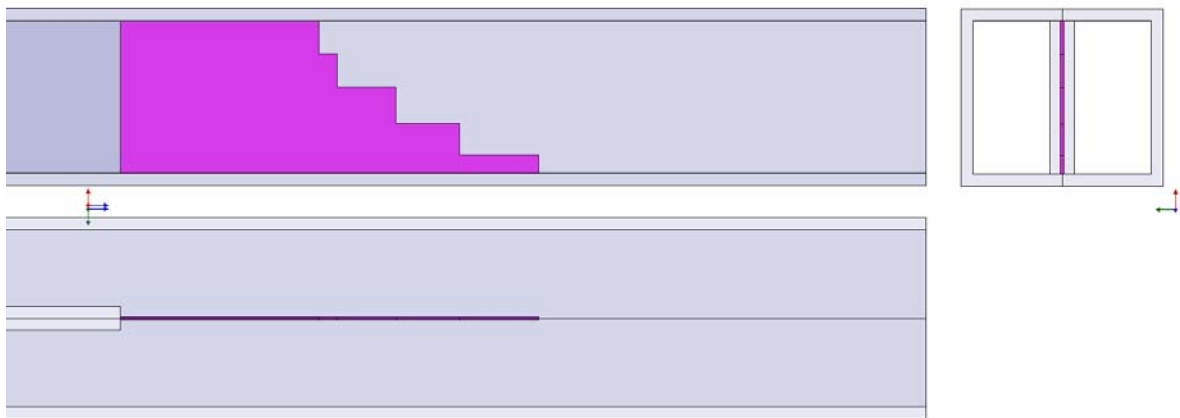


Graf 13.3: Vyzařovací diagram – ozařovač s kruhovým průřezem ústí.

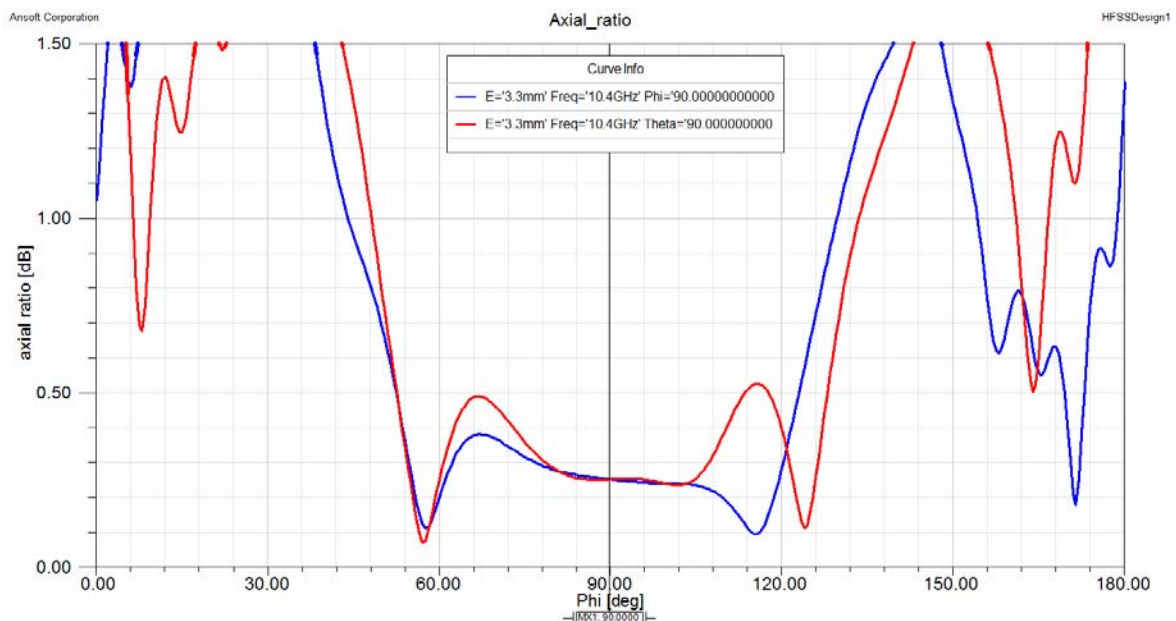
13.2. Ozařovač s čtvercovým průřezem ústí

Ozařovač s čtvercovým ústím byl modelován s rozdílným přístupem. Při shodném uspořádání napájení nebylo navázáno na vzniklou vnitřní stěnu o tloušťce 3 mm stejně silnou přepážkou, ale přepážkou o síle materiálu 0,4 mm. Ve spoji tedy vznikl z každé strany přepážky schod. Byla zkoumána i verze řešení s přepážkou o síle 3 mm, simulace neprokázaly požadované kvality ozařovače.

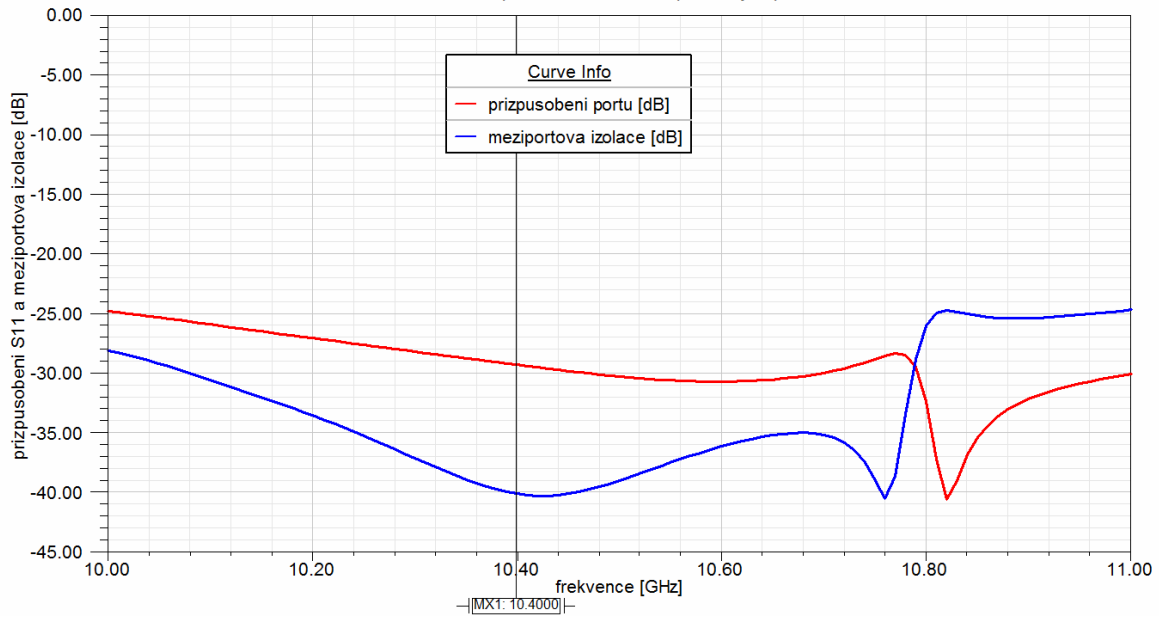
Charakteristiky axiálních poměrů pro oba směry polarizace dosahují velmi nízkých úrovní. Tyto úrovně jsou 0,3 dB pro šíří svazku 30° a 0,5 dB pro 75° . Pro šíří svazku 120° již není jakost axiálních poměrů dostačující, což není kritickým parametrem, protože s přibližováním se k okrajům parabolického zrcadla klesá úroveň intenzity ozáření. Dle vyzařovacích charakteristik v obou rovinách klesá intenzita k okrajům o -8 dB. Velkým pozitivem této varianty řešení je přizpůsobení portů a izolace mezi porty. Odraz na vstupním portu pro střední frekvenci je -29 dB a nevzrůstá nad -25 dB v rozsahu od 10 GHz do 11 GHz. Charakteristika izolačního odporu mezi porty je naladěna na hodnotu -40 dB pro střední pracovní frekvenci 10,4 GHz a nevzrůstá přes -30 dB v rozsahu od 10,1 GHz do 10,8 GHz.



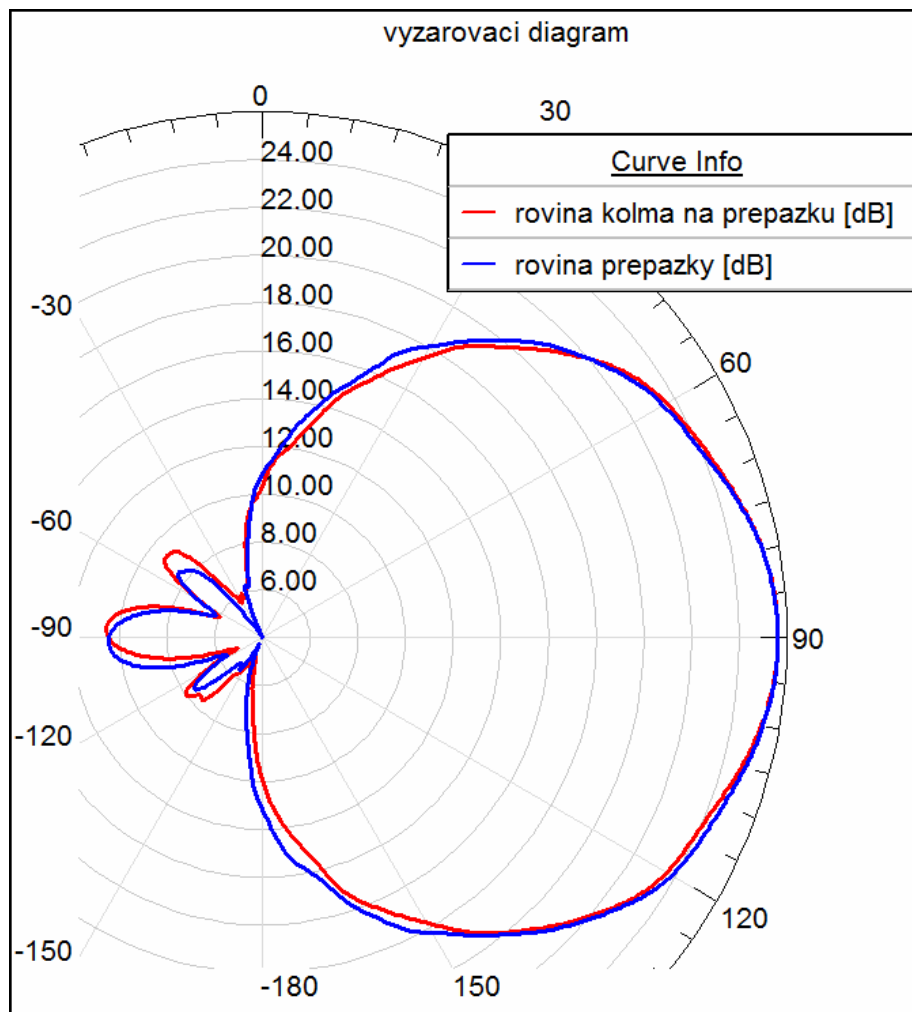
Obr. 13.3: Zářič s čtvercovým průřezem buzený dvěma vlnovody R120.



Graf 13.4: Axiální poměry pro ozařovač s čtvercovým průřezem ústí.



Graf 13.5: Přizpůsobení portů, izolace mezi porty ozařovače s čtvercovým průřezem ústí.



Graf 13.6: Vyzařovací diagram – ozařovač s čtvercovým průřezem ústí.

14. Závěr

V první části projektu jsem studoval základní poznatky problematiky vybuzení kruhové polarizace. Prozkoumal jsem různé přístupy ozařování parabolického zrcadla. Po několika konzultacích jsem byl nasměrován vedoucím práce k požadovanému typu řešení – vlnovodu se schodovitou přepážkou. Úspěšně jsem se seznámil s modelovacím a simulačním prostředím Ansoft HFSS. V tomto prostředí jsem provedl několik simulací vlnovodů. V dalších krocích jsem přistoupil k modelování požadovaného ozařovače. Jako závěrečný výsledek první části diplomové práce považuji realizovanou simulaci ozařovače se simulací elektromagnetického pole, která prokázala kruhovou polarizaci. Tuto jsem dále analyzoval a určil důležité parametry určující jakost ozařovače – axiální poměr vln RHCP a LHCP. Zjištěné parametry zjednodušeného ozařovače dle předlohy p. Samka jsou dobré.

V druhé části diplomové práce jsem modeloval ozařovače s různými tvary ústí a různými variantami napájení. Jednotlivé varianty vycházejí z již známých a ve světě používaných realizací. Povedlo se mi podstatně prohloubit znalosti ovládání a práce s prostředím HFSS. Výsledkem této části projektu jsou diagramy směrových charakteristik a axiálních poměrů pro všechny kombinace kruhových a čtvercových ústí ozařovače s různým druhem buzení. Dalšími podstatnými charakteristikami jsou frekvenční závislosti rozptylových parametrů S_{11} a S_{12} . Z těchto informací lze jasně určit, že nejvhodnějším řešením je ozařovač buzený vlnovodem. Rozhodnutí mezi čtvercovým a kruhovým ústím je příhodné k volbě lepšího impedančního přizpůsobení a lepších izolačních poměrů mezi porty (čtvercový), nebo vyrovnanějšími a nižšími axiální poměry vyzařovací charakteristiky (kruhový). Tato problematika ozařovačů je velmi obsáhlá a z dalších možných řešení nebyl zkoumán uváděný lichoběžníkový ozařovač.

V závěrečné části jsem ladil jednotlivé rozměry a parametry různých variant ozařovače pro dosažení nejlepších možných simulačních hodnot. Výsledkem jsou dvě zcela nové a originální řešení ozařovačů. Obě varianty svými kvalitami splňují požadavky zadání. Z důvodu nedostatku času a vhodných prostor pro měření nebyl žádný z ozařovačů realizován a jeho parametry ověřeny.

V průběhu celé diplomové práce jsem pravidelně konzultoval dílčí výsledky s vedoucím práce. Z těchto konzultací vyvstali další podněty zkoumání mimo hlavní obor této práce, které zde nejsou uvedeny. Například vliv zkosení vlnovodu pod různými úhly na procházející elektromagnetické pole a pozorování výsledných změn na připojeném septum ozařovači. Také jsem modeloval krátký úsek vlnovodu buzený proudovou sondou v podobě SMA konektoru. Tento model je určen pro ladění polohy proudové sondy od konce vlnovodového vedení. Obrazové ukázky těchto modelů jsem nezařadil z důvodu nežádoucího navýšení rozsahu této práce. Po celou dobu jsem pracoval s velkým množstvím zdrojů informací, z nichž jen ty nejpodstatnější jsem použil při citacích v odkazech na literaturu. V průběhu posledního semestru jsem se zúčastnil s malou prezentací konference Radioelektronika 2010.

Seznam literatury

[1] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Plán přidělení kmitočtových pásem*. Sokolovská 219, Praha 9, 2004. 245 s. Č.j.: 21047/04-605.

[2] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/13/12.2007-15 pro kmitočtové pásmo 10-12,5 GHz*. Sokolovská 219, Praha 9, 2007. 9 s. Č.j.: 71 211/2007-605.

[3] MARŠÁLEK, Aleš. *Multifrekvenční ozařovač malé parabolické antény s kruhovou polarizací*. [s.l.], 2006. 95 s. , obr. příl. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Miroslav Kasal, CSc. Dostupný z WWW: <www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/ukazkove_prace/Marsalek/Marsalek.pdf>.

[4] KASAL, Miroslav. *Směrové a družicové spoje*. Vysoké učení technické v Brně. 2. vyd. Brno : [s.n.], 2005. 107 s. ISBN 80-214-2496-6.

[5] COLEMANN, Brian. *G4NNS EME* [online]. c2006, [citováno 3.4.2009]. <<http://myweb.tiscali.co.uk/g4nns/G4NNSEME10G.html>>.

[6] *Antenna-Theory.com* [online]. c2009, [citováno 10.10.2009] <<http://www.antenna-theory.com/basics/antennapol.php>>.

[7] GALUŠČÁK, Rastislav, HAZDRA Pavel. *Circular Polarization and Polarization Losses*. [online]. c2006, [citováno 22.10.2009]. <http://www.attplus.eu/hamradio/projekty/article/cppl_b.pdf>.

[8] WIE, W.B., LIU, Q.Z., YIN, Y.Z., ZHOU, H.J. *Reconfigurable microstrip patch antenna wit switchable polarization*. In Progress In Electromagnetics Research. PIER 75. National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology Xidian University Xi'an 710071, Shaanxi, China, 2007. s. 63-68.

[9] SIDDALINGAIA, Madhu. *Helical antenna* [online]. c2005, aktualizováno 12.4.2009 [citováno 4.5.2009]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Helical_antenna>.

[10] NÁVARA, D. *Nízkošumový zesilovač a ozařovač pro pásmo S*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Špaček.

[11] SV1BSX. *Antenna Circular Polarization* [online]. c2006, [citováno 4.5.2009]. <<http://sv1bsx.50webs.com/antenna-pol/polarization.html>>.

[12] CUPIDO, Luis, BAUER, Willi. *Circular Polarized antenna feed* [online]. c1998, [citováno 11.12.2009]. <http://w3ref.cfn.ist.utl.pt/cupido/cp_feed_dmk06.pdf>.

[13] DMITRIEV, Dmitry. *Stepped Dual Mode Horn with improved septum for 23cm band* [online]. c2008, [citováno 20.4.2009]. <<http://www.ok1dfc.com/EME/technic/septum/ra3aq-23cm04fd.pdf>>.

[14] HANUS, Stanislav.- SVAČINA, Jiří. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2000. 208 s.

[15] POWIS, David. *CWST feed for 10GHz* [online]. c2002, aktualizováno 24.12.2007 [citováno 4.5.2009]. <<http://g4hup.com/Personal/septum.html>>.

[16] BORNEMANN, Jens, AMARI, Smain. *Septum polarizer design for antenna feeds produced by casting* [online]. c1995, aktualizováno 29.1.2007 [citováno 16.12.2009]. <<http://www.ece.uvic.ca/~jbornema/Conferences/056-97aps-ba.pdf>>.

[17] WADE, Paul. *Septum Polarizers and Feeds*[online]. c2003, [citováno 5.5.2009]. <<http://www.w1ghz.org/antbook/conf/SEPTUM.pdf>>.

[18] JESPER, Eddy. *Septum transformer in a round waveguide* [online]. [citováno 10.4.2009]. <http://www.on7un.net/round_septum_feed.htm>.

[19] GALUŠČÁK, Rastislav, HAZDRA Pavel. *Prime-focus circular waveguide feed with septum polarization transformer* [online]. c2006, [citováno 22.10.2009]. <http://www.attplus.eu/hamradio/projekty/article/Prime_focus_circular_waveguide_feed.pdf>

[20] GALUŠČÁK, Rastislav. *Ještě k tématu ozařovače Septum Feed* [online]. c2000, [citováno 30.9.2009]. <http://www.ok2kkw.com/septum_feed_om6aa.pdf>.

[21] OK1KIR. *OK1KIR EME Team* [online]. c2009, aktualizováno 12.7.2009 [citováno 18.12.2009]. <<http://www.ok1kir.cz>>.

[22] ANSOFT. *HFSS 3D Full-wave Electromagnetic Field Simulation* [online]. c2009, [citováno 1.5.2009]. <<http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>>.

[23] SCHURIG, Rico. *DF2CK*. <http://df2ck.de> [online]. c1995, aktualizováno 18.12.2005 [citováno 4.5.2009]. <<http://df2ck.de/tech/wg/>>.

[24] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Přednášky*. Skriptum FEKT VUT Brno.

[25] SAMEK, Zdeněk. *Septum polarization transformer-calculation sheet* [online]. c2001, [citováno 24.4.2009]. <<http://www.ok1dfc.com/EME/Technic/septum/calc.xls>>.

[26] ANSOFT. *HFSS online help*. [nápověda aplikace HFSS verze 11]. c2008.

[27] WADE, Paul. *Enhancing the OK1DFC Square Septum Feed With a Choke Ring*. [online]. c2003, [citováno 28.3.2010]. <http://www.ok1dfc.com/EME/technic/septum/septum_feed_with_ring.pdf>.

[28] REBOLLAR, Jesús M. ESTEBAN, Jaime. *Field theory C.A.D. of septum OMT-polarizers*. [online]. Grupo de Electromagnetismo Aplicado y Microondas. UPM. ETSI de Telecomunicación. Ciudad Universitaria. 28040-Madrid. Spain. 1992. 4 s.

[29] CHENGDU AINFO. *Flange drawing*. [online]. c2008, aktualizováno 27.5.2008, [citováno 20.3.2010]. <http://www.ainfoinc.com/en/pro_pdf/Flange.pdf>

[30] VIDYOUT YANTRA UDYOG. *Rectangular Waveguides*. [online]. [citováno 4.4.2010]. <<http://www.vyu-microwave.com/waveguides.html>>.

[31] CHEN, Huy Ming, TSANDOULAS, N.G. *A wide-band square-waveguide array polarizer*. M.I.T. Lincoln Lab., Lexington, MA, USA. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* Volume: 21 , Issue: 3 Publication Year: 1973 , s. 389 – 391.

Seznam zkratek

ČTÚ	Český telekomunikační úřad
EME	Země-Měsíc-Země [Earth-Moon-Earth]
HFSS	simulátor vysokofrekvenčních struktur [High Frequency Structure Simulator]
LHCP	levotočivá kruhová polarizace [Left Hand Circular Polarization]
LHEP	levotočivá oválná polarizace [Left Hand Elliptically Polarization]
LNA	nízkošumový zesilovač [Low Noise Amplifier]
PSV	poměr stojatých vln [VSWR]
RHCP	pravotočivá kruhová polarizace [Right Hand Circular Polarization]
RHEP	pravotočivá oválná polarizace [Right Hand Elliptically Polarization]
SHF	super krátké vlny [Super High Frequency]

Seznam symbolů

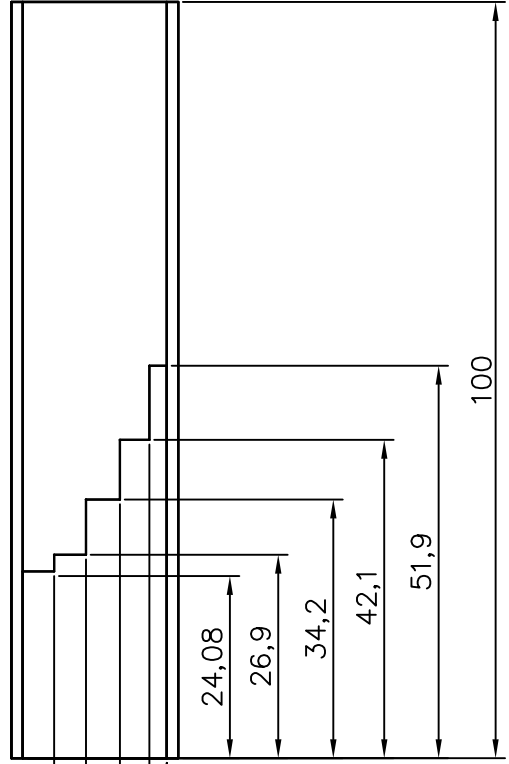
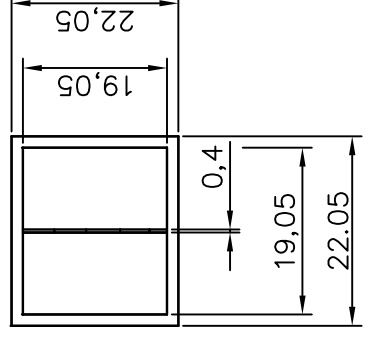
λ	vlnová délka
AR	axiální poměr [axial ratio]
E_{\max}	maximum intenzity elektrické složky pole
E_{\min}	minimum intenzity elektrické složky pole
PLF	ztráty polarizacemi
θ	úhel mezi rovinami polarizace vysílací a přijímací antény
ρ	činitel odrazu
F	ohnisková vzdálenost
D	velikost ústí
Ψ	uhel otevření
G_{\max}	maximální zisk antény
η	účinnost antény
S	reálná plocha apertury (nezastíněná)
S_{ef}	reálná funkční plocha apertury
S_{11}	činitel odrazu na vstupu
S_{22}	činitel odrazu na výstupu (druhý port)
S_{12}	napěťový přenos mezi porty
S_{21}	zpětný napěťový přenos mezi porty
E_r	amplituda odražené vlny (reflected)
E_i	amplituda postupné vlny (incident)

Seznam příloh

A Výkres ozařovače s čtvercovým ústím

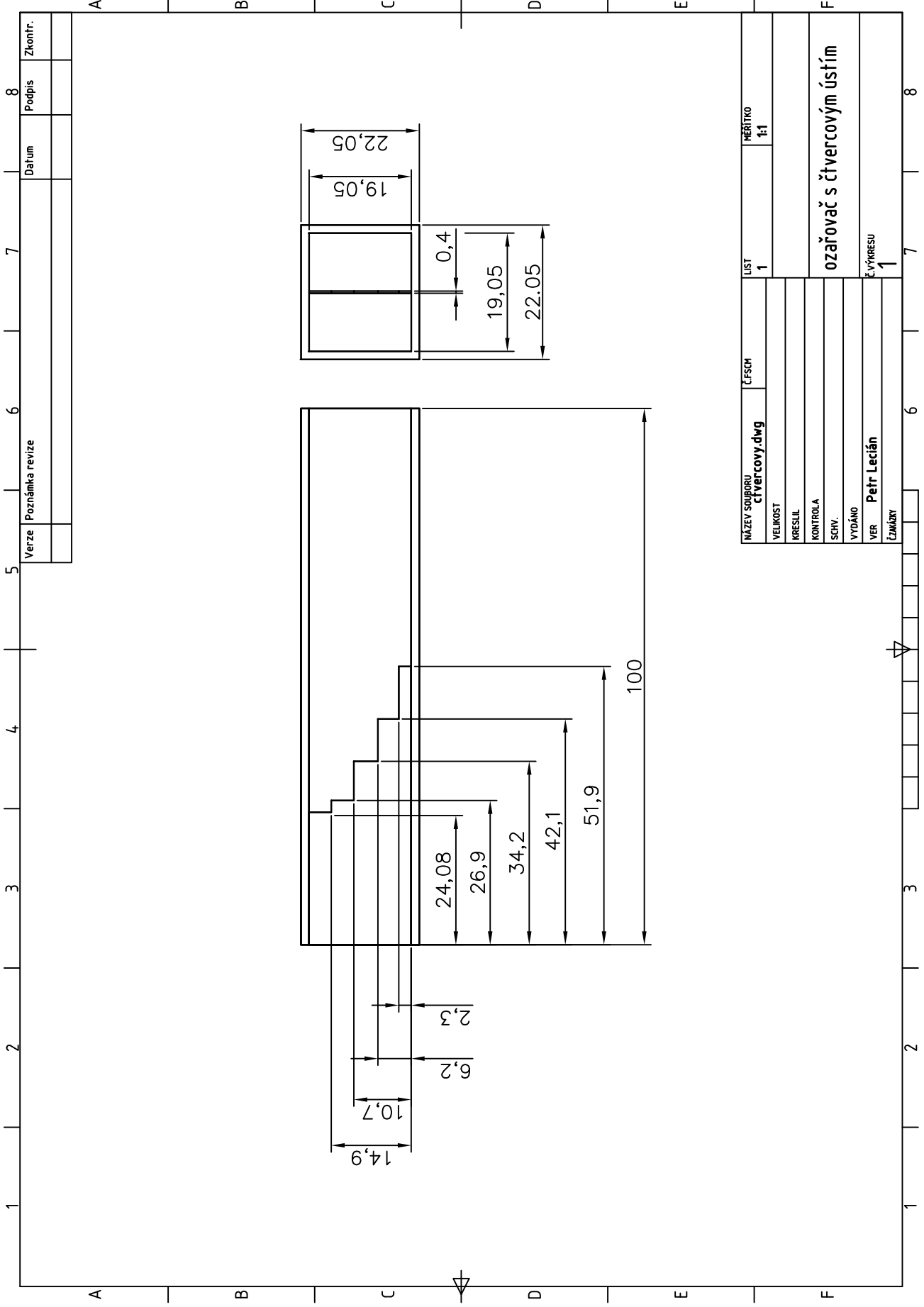
B Výkres ozařovače s kruhovým ústím

Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis	Zkontř.
5				
6				
7				
8				

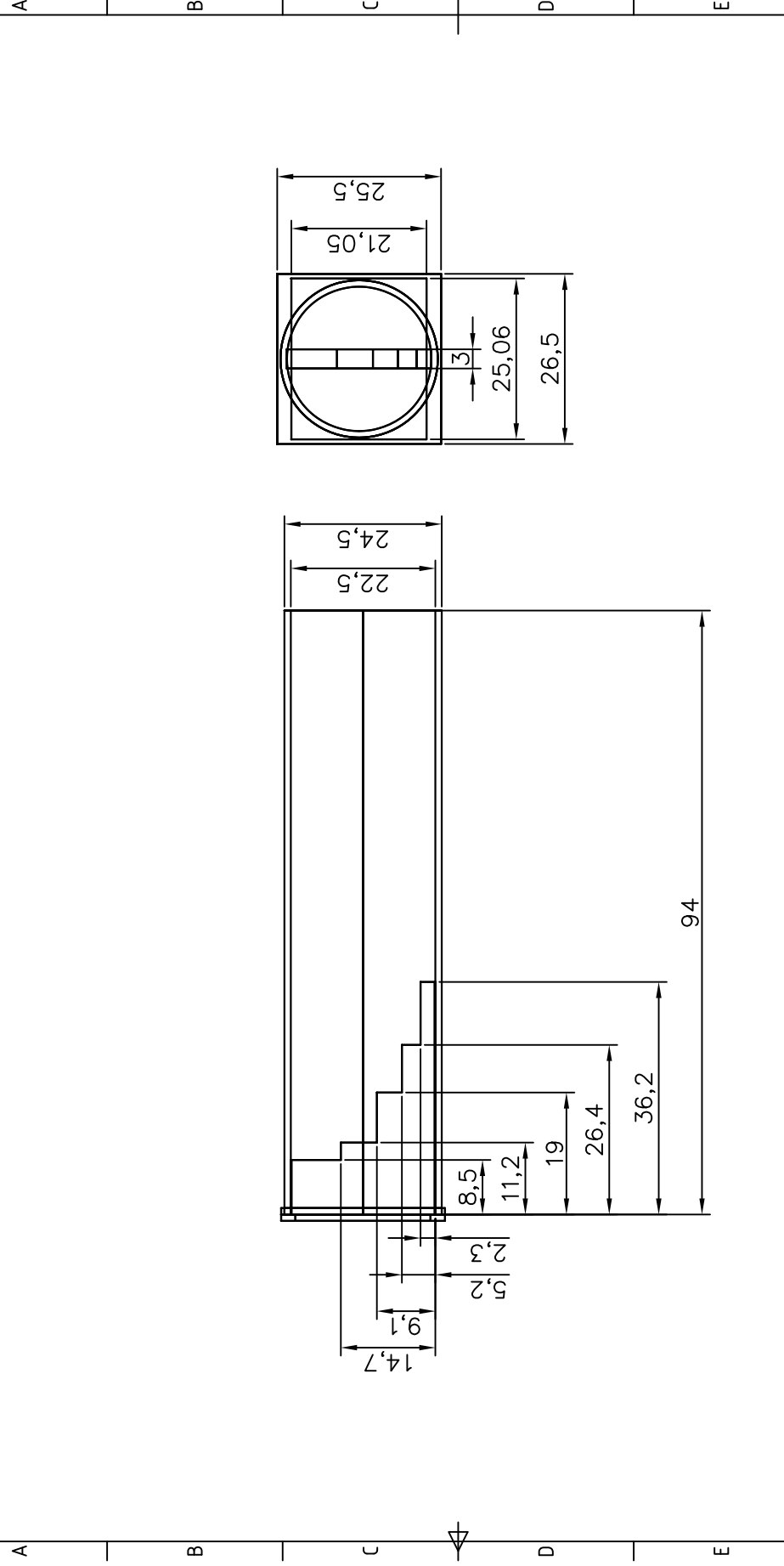


NAZEV SOUBORU	ČESCM	LIST	MĚŘÍTKO
čtvercovy.dwg		1	1:1
VELIKOST			
KRESLIL			
KONTROLA			
SCHV.			
VYDÁNO			
VER	Petr Leclán		
Č. VÝKRESU		1	
Č. KRESBY			

ozářovač s čtvercovým ústím



Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis	Zkontř.
5				
6				
7				
8				



NÁZEV Souboru	ČESK	LIST	MĚŘÍTKO
kruhovy.dwg		1	1:1
VELIKOST			
KRESLIL			
KONTROLA			
SCHV.			
VYDÁNO			
VER	Petr Lecián		
Č. VÝKRESU		1	
Č. KÓDY			

Ozařovač s kruhovým ústím

1	2	3	4	5	6	7	8
A	B	C	D	E	F		