



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

PŘECHODY VLNOVOD-SIW

WAVEGUIDE-SIW TRANSITIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Bednarský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Špůrek

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Vojtěch Bednarský

ID: 203399

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Přechody vlnovod-SIW

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte numerické modely dvou variant přechodů z klasického obdélníkového vlnovodu na vlnovod integrovaný do substrátu (SIW) pro kmitočet 94 GHz. V případě první varianty by měly být oba vlnovody v jedné rovině, v případě druhé varianty by měl být výstup obdélníkového vlnovodu orientován kolmo na širší stěnu vlnovodu integrovaného do substrátu. Porovnejte vlastnosti obou variant.

Obě varianty konvertujte na kmitočet 60 GHz, numerické modely rozšiřte tak, aby zpracováním a úrovní detailů odpovídaly reálnému přechodu. Diskutujte výsledky simulací. Z numerických modelů vygenerujte podklady pro výrobu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] POZAR, David M. Microwave engineering. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2012. ISBN 978-0-470-63155-3

[2] LI, Lin, Xiaoping CHEN, Roni KHAZAKA a Ke WU. A transition from substrate integrated waveguide (SIW) to rectangular waveguide. In: 2009 Asia Pacific Microwave Conference [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 2605-2608 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1109/APMC.2009.5385245. ISBN 978-1-4244-2801-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5385245/>

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Jan Špůrek

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato práce se zabývá návrhem přechodů vlnovodů. V práci jsou popsány dva typy rozšířených vlnovodů, a to klasický obdélníkový a integrovaný do substrátu v odborné literatuře nazývaný SIW. První část se zabývá popisem jednotlivých parametrů a vlastností vlnovodů. V druhé části jsou vypočteny numerické modely a k nim navržené přechody. Odsimulování numerických modelů bylo realizováno v programu CST Microwave Studio. Tvar přechodu je navržen ve dvou typech provedení, a to přechod příčný a přechod kolmý. Výsledkem první části jsou získané rozměry parametrů vlnovodů a z numerických modelů S-parametry jednotlivých struktur a přechodů. V druhé části jsou struktury přepočteny na nižší frekvenci a navržené do vyrobitelné podoby.

Klíčová slova

Vlnovod, přechod, SIW, RWG, CST Microwave Studio, přechody vedení

Abstract

This labour deals with the design of waveguide transitions. In this work, I describe two usually used types of waveguides and that is a classical rectangular waveguide. The second type is a waveguide integrated into the substrate called SIW. In the first part are numerical models of waveguides which has been calculated for two different work frequencies (94 GHz and 60 GHz). In the second part, the transitions are designed. Numerical models are simulated in CST Microwave Studio. Transitions are constructed in two types. Horizontal transition and orthogonal transition. The results of the first part are obtained dimensions of parameters from numerical models and S-parameters of transition sets. In the third part are structures and transitions, working on 94 GHz, being recalculated to lower frequencies (60 GHz) and designed to makable appearance.

Keywords

Waveguide, transition, SIW, RWG, CST Microwave Studio, guidance transition

Bibliografická citace:

BEDNARSKÝ, Vojtěch. Přechody vlnovod-SIW [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126094>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Jan Špůrek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Přechody vlnovod-SIW jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 4. června 2020

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Špůrkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 4. června 2020

.....
podpis autora

Obsah

ÚVOD	13
1. VLNOVODY.....	14
1.1 KOVOVÉ VLNOVODY OBDÉLNÍKOVÉHO PRŮŘEZU	15
1.1.1 <i>Základní parametry obdélníkového vlnovodu</i>	18
1.2 VLNOVODY INTEGROVANÉ DO SUBSTRÁTU (SIW)	21
1.2.1 <i>Základní parametry a vlastnosti SIW</i>	23
2. NÁVRH STRUKTUR	25
2.1 NÁVRH OBDÉLNÍKOVÉHO VLNOVODU (94 GHz)	25
2.2 NÁVRH SIW (94 GHz).....	27
2.2.1 <i>Volba materiálu</i>	27
2.2.2 <i>Návrh struktury SIW</i>	27
2.3 PŘEPOČET VLNOVODŮ NA 60 GHz.....	30
2.3.1 <i>Obdélníkový vlnovod</i>	30
2.3.2 <i>SIW</i>	32
3. NUMERICKÉ MODELY (94 GHz)	33
3.1 OBDÉLNÍKOVÝ VLNOVOD.....	34
3.2 SIW.....	36
4. PODÉLNÝ PŘECHOD VEDENÍ.....	40
4.1 PŘECHOD KONSTRUOVANÝ NA FREKVENCI 94 GHz.....	40
4.2 PŘECHOD KONSTRUOVANÝ NA FREKVENCI 60 GHz.....	45
5. PŘÍČNÝ PŘECHOD VEDENÍ	49
5.1 PŘECHOD KONSTRUOVANÝ NA FREKVENCI 94 GHz.....	49
5.2 PŘECHOD KONSTRUOVANÝ NA FREKVENCI 60 GHz.....	52
6. MĚŘÍCÍ SESTAVA PŘECHODŮ.....	57
6.1 PODÉLNÝ PŘECHOD.....	57
6.2 PŘÍČNÝ PŘECHOD.....	58
ZÁVĚR.....	60
7. LITERATURA	62

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

WR-10	...	Standardizované provedení obdélníkového vlnovodu
SIW	...	Substrate Integrated Waveguide
CST MW	...	CST Microwave Studio
RWG	...	Rectangle Waveguide
DPS	...	Deska plošných spojů
Prokov	...	Zkratovací kolík
S-parametry	...	Rozptylové parametry
TEM	...	transverzálně elektromagnetická vlna
PEC	...	Perfektně elektrický vodič
LTCC	...	Low Temperature Co-fired Ceramic

Symboly:

VSWR	...	poměr stojatých vln	[-]
c	...	konstanta pro rychlost světla	[m/s]
f_{prac}	...	pracovní frekvence	[Hz]
f_{krit}	...	kritická frekvence	[Hz]
λ_{prac}	...	pracovní vlnová délka	[metr]
λ_{krit}	...	kritická vlnová délka	[metr]
λ_g	...	délka vlny ve vlnovodu	[metr]
ϵ_r	...	relativní permitivita	[-]
ω	...	úhlový frekvence	[s ⁻¹]
ϑ	...	úhel dopadu	[rad]
ϑ_k	...	kritický úhel dopadu	[rad]
S_{11}	...	činitel odrazu na vstupu	[dB]
S_{21}	...	činitel přenosu	[dB]
TE	...	transverzálně elektrická vlna	[-]
TM	...	transverzálně magnetická vlna	[-]
m	...	vidové číslo	[-]
n	...	vidové číslo	[-]
s	...	rozsah mezi prokovy	[mm]
d	...	průměr prokovů	[mm]
a	...	rozměr klasického vlnovodu	[mm]
b	...	rozměr klasického vlnovodu	[mm]
h	...	výška SIWu	[mm]
h_{gnd}	...	výška zemnicí kovové vrstvy	[mm]
h_{sub}	...	výška substrátu	[mm]
w	...	šířka ekvivalentního vlnovodu	[mm]
w_{siw}	...	šířka SIWu	[mm]
R_{LEAK}	...	koeficient úniku	[-]
E	...	intenzita elektrického pole	[V/m]

Seznam obrázků

Obr. 1-1 Ukázka kovového vlnovodu obdélníkového průřezu [10]	15
Obr. 1-2 Ukázka nejpoužívanějších příčných průřezů vlnovodů [4].....	16
Obr. 1-3 Znárodnění vlny TE na hraně vlnovodu [8]	16
Obr. 1-4 Znárodnění vlny TM v příčném směru [8]	16
Obr. 1-5 Vidy TE a TM, které mohou vzniknout ve vlnovodu [1].....	17
Obr. 1-6 Vid TE_{10} [1].....	17
Obr. 1-7 Odraz vlny ve vlnovodu [5].....	20
Obr. 1-8 Základní topologie technologie SIW (převzato z [10]).....	21
Obr. 1-9 Vlna TE_{10} , která prochází vlnovodem s měnicí se vzdáleností s [14].....	22
Obr. 1-10 Vlna TE_{10} v pravouhlém ohybu vedení SIW [12]	22
Obr. 2-1 Rozměry obdélníkového vlnovodu [13].....	25
Obr. 2-2 Rozdělení kritických frekvencí vidů TE (převzato z [1]).....	27
Obr. 2-3 Přepočet z obdélníkového vlnovodu na SIW (převzato z [1])	27
Obr. 2-4 Doporučená volba v parametru (převzato z [11])	29
Obr. 3-1 Struktura obdélníkového vlnovodu	35
Obr. 3-2 S-parametry činitele odrazu a přenosu pro dominantní vid TE_{10}	35
Obr. 3-3 S-parametr činitele přenosu pro oblast kritického kmitočtu TE_{10}	35
Obr. 3-4 Pásmo jednovidovosti pro obdélníkový vlnovod	36
Obr. 3-5 VSWR charakteristika pro obdélníkový vlnovod	36
Obr. 3-6 Ekvivalentní obdélníkový vlnovod se substrátem Cuclad 217	37
Obr. 3-7 S-parametry pro dominantní vid.....	37
Obr. 3-8 Struktura SIW.....	38
Obr. 3-9 Rozmítání poměru s/d v závislosti na šířce w_{siw}	38
Obr. 3-10 Výsledná charakteristika pro návrh SIW pro vid TE_{10}	39
Obr. 3-11 SIW pásmo jednovidovosti	39
Obr. 3-12 Šíření transversální elektrické vlny	39
Obr. 4-1 Struktura SIW se zúžením	40
Obr. 4-2 S-parametry SIW pro vid TE_{10}	41
Obr. 4-3 S-parametry SIW pro dva nejnižší vidy TE_{10} , TE_{20}	41
Obr. 4-4 Struktura rovinného přechodu	42

Obr. 4-5 Rozmítání parametru <i>step</i> v rovinném přechodu	42
Obr. 4-6 Rozmítání parametru <i>high</i> v rovinném přechodu.....	42
Obr. 4-7 Sestava rovinného přechodu.....	43
Obr. 4-8 S-parametry sestavy SIW-přechod-RWG pro dominantní vid TE_{10}	43
Obr. 4-9 Detailní zobrazení činitele přenosu vidu TE_{10}	44
Obr. 4-10 Šíření vlny TE podélnou strukturou	44
Obr. 4-11 Podoba složené struktury pro podélný přechod na 60 GHz	45
Obr. 4-12 Detailní pohled na schodovitý přechod vně struktury	45
Obr. 4-13 Rozmítání parametru <i>high</i> , zobrazení činitele odrazu pro vid TE_{10}	46
Obr. 4-14 Vnitřní pohled na SIW	46
Obr. 4-15 S-parametry pro oblast kritického kmitočtu pro vid TE_{10}	46
Obr. 4-16 S-parametry pro oblast pracovního kmitočtu pro vid TE_{10}	47
Obr. 4-17 Detailní zobrazení činitele přenosu pro vid TE_{10}	47
Obr. 4-18 S-parametry činitele přenosu pro dva nejnižší vidy	47
Obr. 4-19 Šíření vlny TE podélným přechodem.....	48
Obr. 5-1 upravený SIW pro ortogonální přechod	49
Obr. 5-2 Rozmítání parametru <i>o</i> , zobrazení činitele odrazu	50
Obr. 5-4 S-parametry pro oblast kritického kmitočtu, vid TE_{10}	50
Obr. 5-3 Ortogonální přechod dvou vlnovodů.....	50
Obr. 5-5 Detailní zobrazení činitele přenosu vidu TE_{10}	51
Obr. 5-6 S-parametry činitele přenosu pro dva nejnižší vidy	51
Obr. 5-7 Šíření vlny TE příčným přechodem	51
Obr. 5-8 Pohled shora	52
Obr. 5-9 Čelní pohled	53
Obr. 5-10 Vnitřní ořezaný pohled do přechodu	53
Obr. 5-11 Pohled z boku	54
Obr. 5-12 Rozmítání parametru <i>phigh</i>	54
Obr. 5-13 S-parametry pro oblast kritického kmitočtu, vid TE_{10}	54
Obr. 5-14 S-parametry pro oblast pracovního kmitočtu, vid TE_{10}	55
Obr. 5-15 Detailní zobrazení činitele přenosu pro vid TE_{10}	55
Obr. 5-16 S-parametry činitele přenosu pro dva nejnižší vidy	55
Obr. 5-17 Šíření vlny TE podélným přechodem.....	56

Obr. 6-1 Pohled na složenou strukturu dvou podélných přechodů.....	57
Obr. 6-2 S-parametry složené sestavy podélného přechodu, vid TE_{10}	57
Obr. 6-3 Činitel odrazu a přenosu pro oblast pracovního kmitočtu, vid TE_{10}	57
Obr. 6-4 Pohled na složenou strukturu dvou příčných přechodů	58
Obr. 6-5 Vnitřní pohled	58
Obr. 6-6 S-parametry složené sestavy příčného přechodu, vid TE_{10}	58
Obr. 6-7 Činitel odrazu a přenosu pro oblast pracovního kmitočtu, vid TE_{10}	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání vlastností základních typů vedení [5].....	14
Tabulka 2 Normalizované hodnoty pro obdélníkový vlnovod	25
Tabulka 3 Výpočet kritických frekvencí vidů TE	26
Tabulka 4 Tabulka parametrů materiálu CuClad 217.....	27
Tabulka 5 Normalizované hodnoty obdélníkového vlnovodu.....	30
Tabulka 6 Výpočet kritických frekvencí vidů TE	31
Tabulka 7 Srovnání vlastností obdélníkových vlnovodů na frekvenci 94GHz	37
Tabulka 8 Hodnoty parametrů z grafu	38
Tabulka 9 S-parametry SIWu	39
Tabulka 10 S-parametry na frekvenci 94 GHz	41
Tabulka 11 Sumarizace výsledků pro $f = 94$ GHz.....	44
Tabulka 12 Rozměry parametrů pro podélný přechod	44
Tabulka 13 Sumarizace výsledků pro $f = 60$ GHz.....	48
Tabulka 14 Rozměry parametrů pro podélný přechod	48
Tabulka 15 Sumarizace výsledků pro $f = 94$ GHz.....	52
Tabulka 16 Rozměry parametrů pro příčný přechod	52
Tabulka 17 Sumarizace výsledků pro $f = 60$ GHz.....	56
Tabulka 18 Rozměry parametrů pro příčný přechod.....	56
Tabulka 19 Složená sestava podélného přechodu.....	58
Tabulka 20 Složená sestava příčného přechodu	59
Tabulka 21 Cuclad 217LX.....	65
Tabulka 22 Normalizovaný přehled rozměrů obdélníkového vlnovodu	66

ÚVOD

Běžná vedení, mezi které patří například dvoulinka či koaxiální kabel, jsou v mikrovlnné technologii do určitých kmitočtů použitelné jen omezeně [4]. Každý typ vedení je vhodný pro určité frekvence. Pro velmi vysoké frekvence (řádově desítky GHz) jsou běžná vedení nevhodná z důvodu velkých ztrát.

Pro přenos vysokých frekvencí se začaly využívat vlnovody. Vlnovod může mít jakýkoliv příčný tvar, ale nejčastěji se používá tvar obdélníkového průřezu z vodivého materiálu, aby se v něm mohly vlny odrazet a tím i šířit.

S rozmachem mikrovlnných konstrukcí a částečnou neefektivitou klasických obdélníkových vlnovodů (RWG), které jsou využitelné pro frekvence v řádu GHz, se vymyslel typ vlnovodu pod názvem SIW (Substrate Integrated Waveguide), neboli vlnovod zabudovaný do substrátu [6]. Hlavní výhodou je nenáročnost a možnost sériové výroby, větší frekvenční pásmo od MHz až po GHz. Jeho strukturu tvoří zkratovací kolíky, dále nazývané prokovy, které jsou zabudované do desky plošných spojů (DPS). Prokovy spojují vrchní a spodní vodivou masku. Vedení obdélníkového vlnovodu a SIW jsou komplementární, oba typy najdou uplatnění v různých směrech mikrovlnné technologie.

Někdy je potřeba propojit dva různé typy vlnovodů. V našem případě budeme propojovat starší typ kovového obdélníkového vlnovodu s vlnovodem zabudovaným do substrátu (dále používaný název SIW). Abychom tohle spojení mohli realizovat, je nutné vyrobit speciální tvar přechodu, který se vloží mezi dva různé typy vlnovodů. Možností výběru přechodů existují celé řady od technologie „finline“, pomocí vložené sondy nebo přechodu schodovitého tvaru. Cílem výběru je snaha minimalizovat ztráty a přenést signál s nejnižším útlumem.

V úvodu práce jsou popsány základní informace o obdélníkovém vlnovodu a jeho základní parametry. Dále se blíže seznámíme s šířením vlny v SIWu a nastíníme si různé typy vedení. Vypočtené parametry využijeme jako vstupní rozměry struktur v simulacích, kde se budeme snažit získat nejlepší vlastnosti obou typů vlnovodů. Ve čtvrté a páté kapitole jsou vytvořeny dva různé přechody mezi vlnovody, a to přechod příčný a podélný. Oba tvary přechodů jsou vypočteny pro dvě různé frekvence, aby bylo možné přechody vyrobit a změřit je dostupnou měřicí technikou. Snahou je se dostat k nejlepším vlastnostem činitele odrazu a přenosu, aby signál procházející vedením byl, co nejméně utlumen.

1. VLNOVODY

Elektromagnetická vlna se nemusí přenášet jen koaxiálním nebo otevřeným vedením. Existuje také přenos elektromagnetické vlny pomocí dutého vedení, které má vodivé stěny a jeho příčný tvar může mít vícero podob. Duté vedení bylo nazváno pouze pro lepší představu, odborně se vedení nazývá vlnovod. U vlnovodu neplatí, tak jako je tomu u klasického napájení elektrického obvodu, že proud musí uzavřít vodivou cestu zpět do zdroje. Rádiové a světelné vlny jsou vlny elektromagnetické, a ty se v dutém vodiči šíří odrazem od vodivé plochy, na kterou pod určitým úhlem dopadají. [3]

Pásmo mikrovln (300 MHz – 300 GHz) se zvolilo kvůli tomu, že se mohou využívat nová a zatím méně obsazená kmitočtová pásma, přenášet větší objemy dat a také je zde možnost dosáhnout značné rychlosti přenosu. Při pozemní a družicové komunikaci se hlavně využívá přímočarého šíření mikrovlnné energie.

Základem prvkem přenosových soustav komunikace je vedení. Vedení má v příčném směru mnohonásobně menší rozměry, než je délka vlny. Elektromagnetické pole má v příčném směru stacionární charakter. Je-li délka vlny srovnatelná s příčnými rozměry je rozložení pole v podélném i příčném směru vlnového charakteru. Potom se takové vedení nazývá vlnovod. [1] Elektromagnetická vlna se skládá ze dvou složek. Složky elektrického pole, dále označované E , a složky magnetického pole H . Typem vedení vlnovod se mohou šířit dva typy vln. Vlna magnetická, dále označovaná TM , a vlna elektrická TE . První písmeno ve zkratce je z anglického slova transversally, v překladu příčně elektrická nebo magnetická vlna. Vektor intenzity elektrického pole má nenulové složky jen ve směru příčném. [4]

Tabulka 1 Srovnání vlastností základních typů vedení [5]

Typ vedení	Příklad	vlna	f_{krit}	λ_g	v_f	vidy
dvoudrátové	dvoulinka, koaxiální v.	TEM	0	$\leq \lambda_0$	$\leq c$	TEM + vyšší
vlnovod	vlnovod	TE, TM	\approx GHz	$> \lambda_0$	$> c$	mnoho
jednodrátové	GUBO, světlovod	TE, TM, (TEM)	≥ 0	λ_0	$\approx c, \sim \epsilon_r$	různé

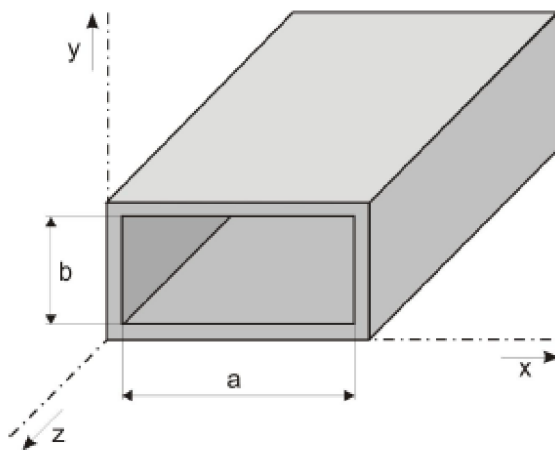
Vlna, která se šíří uzavřeným vlnovodem, může vykazovat různé rozložení intenzit vně dutiny vlnovodu. Například může být vysoká složka intenzity elektrického pole ve středu vlnovodu a s postupnou vzdáleností od středu ke stěně se může intenzita rapidně měnit. Možností, jak se může rozdělit intenzita vně vlnovodu je velká škála a jsou popsány vidovými čísly (módy). Každý vid je

popsán nezáporným, celým číslem, například vid TE_{mn} (TM_{mn}). Číslo m a n vyjadřuje počet půlvln, s tím že parametr m je udáván pro stranu a (např. u obdélníkového vlnovodu se většinou jedná o šířku) a n pro stranu b (např. výška obdélníkového vlnovodu, dle standardního značení). Pokud je jedno z čísel rovno nule, je příslušné pole konstantního charakteru.

Nejužívanějším rozdělení energie ve vlnovodu se nazývá dominantní přenosový mód. Podmínka pro správné šíření dominantní vidu je, aby šířka vlnovodu byla větší, než je polovina vlnové délky z rovnice (1.4). [3] Při praktických aplikacích se většinou využívá dominantní vid v pásmu jednovidovosti (vid s nejnižší frekvencí). Vyšší řády vidů bývají často komplikací, protože by vlny spolu mohly interferovat.

1.1 Kovové vlnovody obdélníkového průřezu

Obdélníkové vlnovody jsou duté a vnitřním prostředím nejčastěji bývá vakuum nebo vzduch. Obal vlnovodu tvoří profil z kovového materiálu jako je například měď, zlato nebo stříbro. Jejich vlastnosti jsou použitelné až do řádově desítek GHz a jsme schopni přes ně posílat vysoké výkony v řádech kW až MW. Vlnovody mají také dobré stínící vlastnosti, a proto se hojně využívají v družicové komunikaci pro radiolokátory, kde fungují pro přenos energie z vysokofrekvenčního generátorů do vstupu antén, ale taky naopak. [7]



Obr. 1-1 Ukázka kovového vlnovodu obdélníkového průřezu [10]

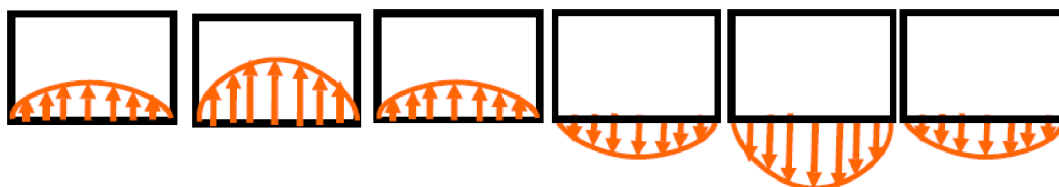
Nejužívanější příčné profily vlnovodů, se kterými je možné se setkat, jsou znázorněny na Obr. 1-2. Tvary mohou být obdélníkové, viz Obr. 1-1, kruhové, ale i jinak tvarované. Tvary do písmene H nebo Π jsou frekvenčně univerzálnější, protože lze s nimi přenášet signál v širším frekvenčním pásmu oproti obdélníkovým vlnovodům, avšak s nižším přenášeným výkonem. [4]



Obr. 1-2 Ukázka nejpoužívanějších příčných průřezů vlnovodů [4]

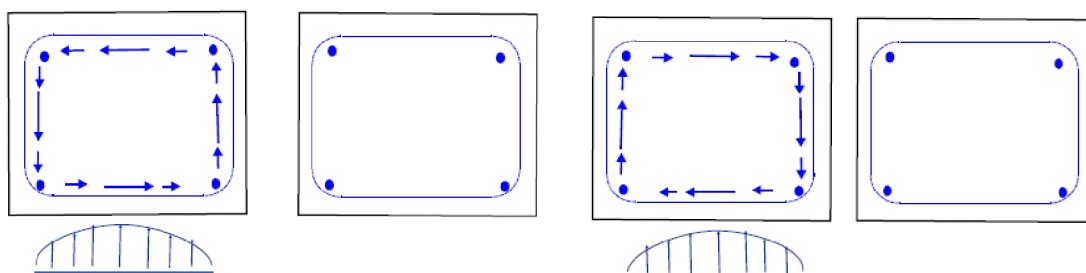
U šíření vlny obdélníkovým vlnovodem je dobré si představit, že vybuzená vlna šikmo dopadá na stěny vlnovodu a od nich se odráží, čímž se v podélném směru šíří vlnovodem. Superpozicí dopadajících a odražených vln vznikne celkové pole, které bude mít v pohledu na podélný směr podobu postupné vlny a v pohledu na příčný směr podobu vlny stojaté. [8]

Bližší je vysvětlena podoba stojatého vlnění na stěnách obdélníkového vlnovodu. Na Obr. 1-3 je znázorněna vlna TE s vidovým číslem $m = 1$ a $n = 0$, kde je vykreslen její průběh v různých časových okamžicích. Největší hodnoty nabývá vlna uprostřed stěny a , kde je kmitna vlny. [8]



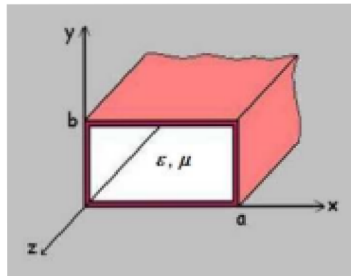
Obr. 1-3 Znázornění vlny TE na hraně vlnovodu [8]

Půlvlny stojaté vlny magnetického pole v příčném směru, jsou znázorněny na Obr. 1-4. Kmitna magnetické vlny je uprostřed stěny a její směr se cyklicky mění. Na rozdíl od vlny elektrické, vlna magnetická musí mít ve stykovém bodě vodorovné a svislé stěny intenzitu magnetického pole nulovou. [8]



Obr. 1-4 Znázornění vlny TM v příčném směru [8]

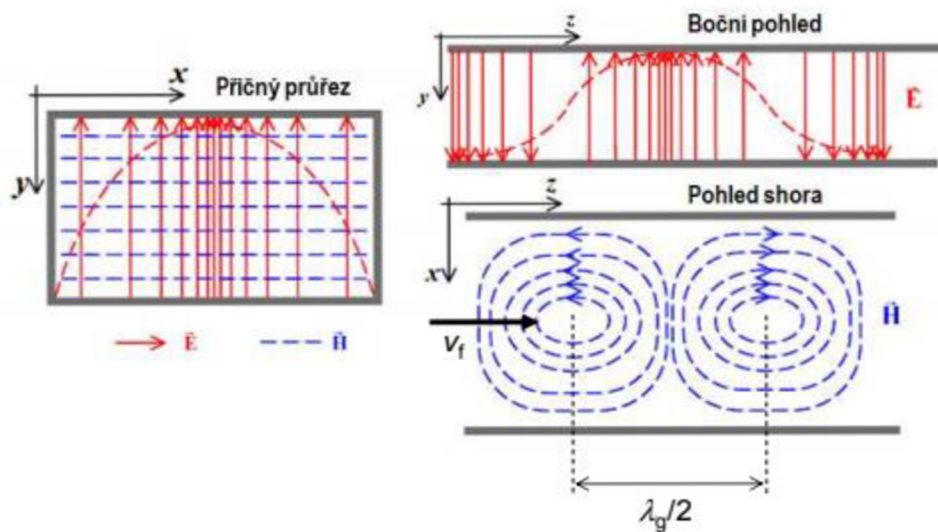
V obdélníkovém vlnovodu může existovat nekonečně různých vln *TE* nebo *TM*. Existují určité vidy, které nemohou nikdy nastat, protože by jejich pole nespĺňovalo okrajové podmínky ve vodivém plášti vlnovodu. Proto ve vlnovodu nemůže nikdy vzniknout například vid TM_{10} . Vidy, které mohou vzniknout ve vlnovodech, jsou vyznačeny na obrázku Obr. 1-5. [1]



$$TM_{mn} = \begin{cases} m = 1, 2, 3 \dots \\ n = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad TE_{mn} = \begin{cases} m = 0, 1, 2, 3 \dots \\ n = 1, 2, 3 \dots \\ \text{nebo} \\ m = 1, 2, 3 \dots \\ n = 0, 1, 2, 3 \dots \end{cases}$$

Obr. 1-5 Vidy TE a TM, které mohou vzniknout ve vlnovodu [1]

Na Obr. 1-6 je znázorněno rozložení intenzity magnetického a elektrického pole pro vid TE_{10} .



Obr. 1-6 Vid TE_{10} [1]

1.1.1 Základní parametry obdélníkového vlnovodu

Zatímco vedení jednodrátové a dvoudrátové vede v celém frekvenčním pásmu, vlnovod začne vést až od určité kritické frekvence viz podmínka (1.1). Kritickou frekvenci lze vypočítat z rovnice (1.2) nebo (1.11). λ_{krit} je kritická vlnová délka, kterou lze vypočítat z rovnice (1.4) pro obdélníkový vlnovod nebo obecně z rovnice (1.3).

$$f_{prac} > f_{krit} \quad \text{nebo} \quad \lambda_{prac} > \lambda_{krit} \quad (1.1)$$

U frekvenční podmínky (f) se musí počítat kromě vnitřních rozměrů i s parametry permitivita a permeabilita, které se vztahují k prostředí uvnitř vlnovodu. Zatímco pro kritickou vlnovou délku (λ) závisí hodnota pouze na vnitřních rozměrech vlnovodu.

Pro výpočet kritických frekvencí jednotlivých vidů šířících se v obdélníkovém vlnovodu lze použít rovnici (1.2) z [1].

$$f_{krit} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1.2)$$

Kde parametr a je vnitřní šířka vlnovodu, parametr b je vnitřní výška vlnovodu. Parametry m a n ve vzorci představují vidová čísla. Teorie vidů je popsána v podkapitole výše. Konstanta pro rychlost světla ve vakuu se značí c . Z rovnice je patrné, že nejnižší mezní (kritická) frekvence nastane u dominantního vidu $m = 1, n = 0$. Dále při zvyšování pracovní frekvence budou vznikat další, vyšší vidy, které budou mít kritickou frekvenci na vyšších kmitočtech. Takže zatímco u dominantního vidu bude vlnovodem procházet pouze jedna vlna jednoho vidu (tzv. pásmo jednovidovosti), tak se zvyšující se pracovní frekvencí se lze dostat k případu, kdy se vlnovodem bude šířit vln vícero a s různými vidovými čísly, což může vést k velkým komplikacím a je dobré si vyšší vidy při návrhu pohlídat.

Výpočet kritické vlnové délky pro obdélníkový vlnovod je možné získat i ze vzorce (1.4), známe-li údaj parametru šířky a obdélníkové vlnovodu. Nebo obecný výpočet kritické vlnové délky vypočteme z rovnice (1.3). Kde f_{krit} je kritická frekvence, c je rychlost světla ve vakuu a ϵ_r je relativní permitivita dielektrika z [1].

$$\lambda_{krit} = \frac{c}{f_{krit} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.3)$$

$$\lambda_{krit} = 2 \cdot a \quad (1.4)$$

Rovnice (1.6) slouží pro výpočet fázové rychlosti (v_f). Jde o rychlost vlny, s níž se ve vlnovodu pohybují konstantní místa fáze v podélném směru. Kde v je rychlost rovinné vlny v neomezeném prostoru tvořeného μ a ε z (1.5). Je zde dobré si uvědomit, že pro daný případ se rychlost $v = c$, kde c je rychlost světla ve vakuu. Protože f_{krit} je nižší než f_{prac} nebo λ_{krit} větší, než λ_{prac} z toho vyplývá, že fázová rychlost bude větší než rychlost v (c). [1]

$$v = \left(\frac{1}{\mu\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (1.5)$$

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{krit}}{f_{prac}}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2}} \quad (1.6)$$

Pro výpočet rychlosti vícero kmitočtů, například pro rychlost modulační obálky nebo přenos energie vlny v podélném směru, se použije vzorec (1.7), kterým se vypočte skupinová rychlost (v_{sk}). [1].

$$v_{sk} = v \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{krit}}{f_{prac}}\right)^2} = v \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2} \quad (1.7)$$

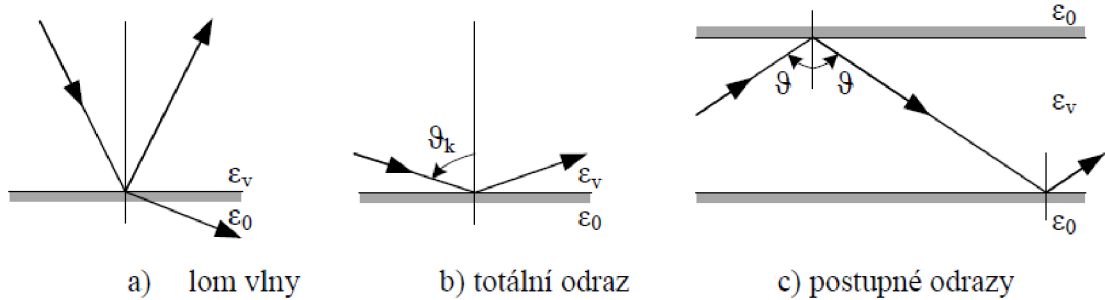
Kde v je vypočtena podle vzorce (1.5). Protože je f_{krit} nižší než f_{prac} nebo λ_{krit} větší než λ_{prac} , z toho vyplývá, že skupinová rychlost bude menší než rychlost v (c). [1]

Délka vlny ve vlnovodu (λ_g), nezaměňovat s vlnovou délkou (λ_{prac}), je vzdálenost, kterou urazí vlna rychlostí v_f za jednu periodu T . Vypočte se pomocí vzorce (1.8) z [1]. Nejprve si musíme vypočítat vlnovou délku pro pracovní frekvenci (λ_{prac}) a vlnovou délku pro kritickou frekvenci (λ_{krit}).

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{prac}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2}} \quad (1.8)$$

Aby se vlna vlnovodem šířila beze ztrát, je nutné splnit podmínku, takzvaného totálního odrazu vlny. V podélném směru se šíří vlna pod úhlem ϑ , po dráze lomené čáry. Šířící se vlna, která dopadá na stěny dutiny vlnovodu. Na stěnách vlnovodu může nastat jev takzvaného lomu vlny. Tento jev je nežádoucí a může

u něj dojit k úniku energie. Proto je dobré splnit podmínku, která zaručí totální odraz vlny ze vztahu (1.9) z [5]. Na Obr. 1-7 je zobrazen úhel lomu ϑ , který je menší než úhel kritický a vlna se lomí ven z dutiny vlnovodu. Jedná se o nežádoucí jev. Druhá varianta, kdy je úhel lomu ϑ větší než úhel kritický a dojde k totálnímu odrazu vlny. Třetí obrázek za c) popisuje šíření vlny v dutině vlnovodu.



Obr. 1-7 Odraz vlny ve vlnovodu [5]

Ze vztahu (1.9) lze konstatovat, že bude-li permitivita dielektrika ε_v uvnitř vlnovodu větší než permitivita prostředí ε_0 , dojde k totálnímu odrazu vlny.

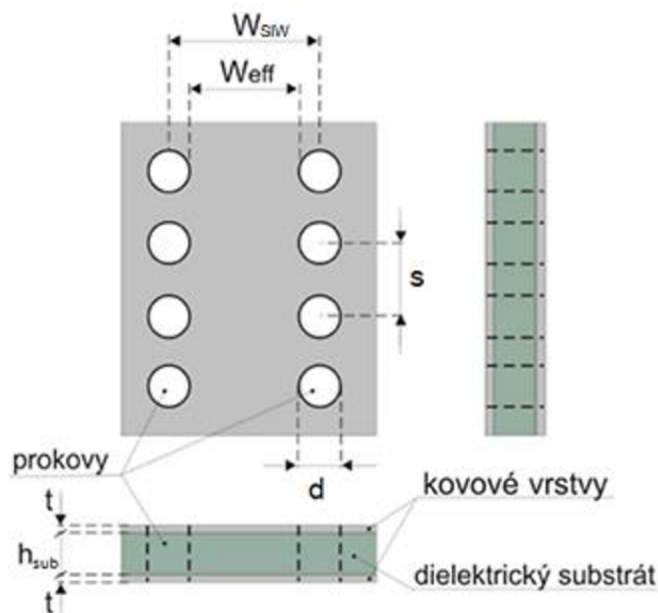
$$\sin \vartheta_k = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_v}} \quad (1.9)$$

Kde ε_0 je permitivita okolního prostředí a ε_v permitivita dielektrika uvnitř vlnovodu. Je dobré zmínit, že úhel ϑ nezávisí pouze na permitivitě, ale také na kmitočtu. Budeme-li se přibližovat s f_{prac} k frekvenci f_{krit} , tak úhel ϑ se bude blížit k hodnotě 90° z pohledu podélného šíření vlny. [1]

1.2 Vlnovody integrované do substrátu (SIW)

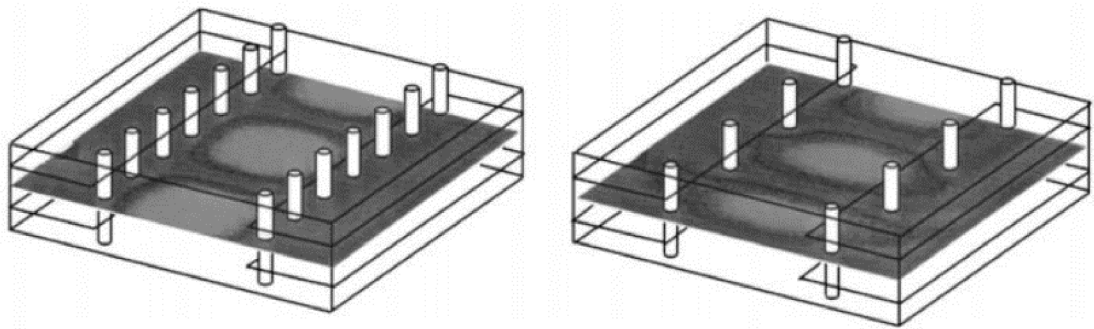
Strukturu SIW můžeme považovat za speciální typ obdélníkového vlnovodu s periodickou strukturou prokovů na obou svislých stěnách vlnovodu. Největší využití najde tahle struktura pro oblast milimetrových vln.

Vedení SIW je tvořeno substrátem výšky h_{sub} , na který je z obou stran napařena tenká kovová vrstva h_{gnd} . Obě kovové vrstvy jsou spojeny vodivými prokvy. Slovo prokov (anglicky: metallic post) nese význam díry, jejíž stěny jsou potaženy vodivým materiálem. Šířka vlnovodu je značena písmenem w_{SIW} . Základní parametry jsou vyznačeny na Obr. 1-8 pro lepší orientaci. [6], [10], [11]



Obr. 1-8 Základní topologie technologie SIW (převzato z [10])

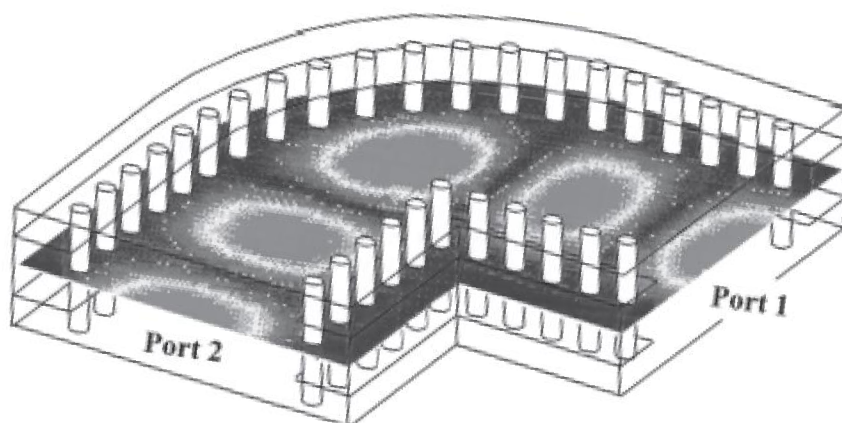
Zvolí-li se správně rozměr s (vzdálenost mezi prokvy) a d (velikost průměru prokovu), vlnovod se bude chovat podobně jako klasický obdélníkový s dielektrikem. Zvolí-li se naopak velmi velká vzdálenost s , mohla by energie vlny vyzařovat z vlnovodu ven, jak je naznačeno na Obr. 1-9. Proto je dobré splnit podmínku rozmezí prokovů ($0,5 < d/s < 0,8$) z [15]. Únik signálu skrze prokovy lze vypočítat z rovnice (1.16).



Obr. 1-9 Vlna TE_{10} , která prochází vlnovodem s měnicí se vzdáleností s [14]

Důvodem, proč se v obdélníkových vlnovodech šíří obě vlny TE , TM a v SIWu pouze vlna TE je ten, že vložené prokvy, které tvoří dvě stěny vlnovodu, umožňují únik transverzální magnetické vlny do okolí. Podoba vlny TE šířící se strukturou SIW je zobrazena na Obr. 1-9. [9]

- Nevýhodou SIWu je možný vznik ztrát průchodem vlny skrze prokvy. Avšak lze to ovlivnit vzdáleností mezi prokvy (parametr s). Také je dobré si dát pozor na ztráty, které vznikají v dielektriku a jsou způsobené nedokonalou vodivostí materiálu.
- Velkou výhodou této technologie je možnost realizace kompletního obvodu (pasivních i aktivních součástek) v planární formě, což vede k úspoře místa a menší náročnosti na výrobu. Tyto komponenty mohou být vytvořeny základní technologií pro výrobu plošných spojů, ale i technologií *LTCC* (anglicky Low Temperature Co-fired Ceramic), která je výhodnou volbou pro lepší tepelnou vodivost, je levná, spolehlivá, nenáročná a vhodná i pro vysoké frekvence. [11]



Obr. 1-10 Vlna TE_{10} v pravoúhlém ohybu vedení SIW [12]

Se strukturou SIW lze realizovat specifické tvary vedení, protože vlnovod zachová polarizaci vlny, i když se v půlce vedení např. pravouhle ohne, viz Obr. 1-10. [12]

Základem dobré funkce vlnovodu je správný výběr substrátu, ve kterém se bude elektromagnetická vlna dobře šířit. Níže je zmíněno pár bodů, na které je dobré si dávat pozor z [9] :

- Vybrat si materiál, který bude mít relativní permitivitu (ϵ_r) konstantní v celém pracovním pásmu.
- Materiál by měl mít malou hodnotu ztrátového činitele $\tan\delta$ a měl by mít, co nejhladší povrch materiálu.
- Také by měl by mít dobré fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti (pevnost, křehkost, pružnost apod.).
- Mít vysokou tepelnou vodivost a homogenost.
- Vybrat si správně výšku substrátu pro daný materiál, různá výška se hodí jen pro určité frekvence.

1.2.1 Základní parametry a vlastnosti SIW

Určení kritické vlnové délky pro SIW lze vypočítat ze vzorce (1.10) nebo pomocí již zmíněného obecného vzorce (1.3) z [7].

$$\lambda_{krit} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{h}\right)^2}} \quad (1.10)$$

Kde parametry m a n představují vidová čísla, h je výška substrátu a w je ekvivalentní šířka obdélníkového vlnovodu, kterou lze vypočítat ze vzorce (1.13).

$$f_{krit} = \frac{c}{\lambda_{krit} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.11)$$

Výpočet kritické frekvence pro SIW, kde ϵ_r je relativní permitivita dielektrika a c je konstanta šíření světla ve vakuu, λ_{krit} je kritická vlnová délka.

Relativní permitivita kvantitativně vyjadřuje schopnost polarizace dané látky. Určí se ze vzorce (1.12), kde E_0 je vnější elektrické pole a E je elektrické pole uvnitř dielektrika. Je důležité brát v potaz, že veličiny jsou závislé na frekvenci. [6]

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E} \quad (1.12)$$

Výpočet ekvivalentní šířky obdélníkového vlnovodu w , kde c je rychlost světla, f_{krit} je kritická frekvence vlnovodu a ϵ_r je relativní permitivita, v našem případě se jedná o substrát Cuclad 217 s relativní permitivitou 2,17 z [15].

$$w = \frac{c}{2 \cdot f_{krit} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.13)$$

Ze známé šířky w , lze dopočítat efektivní šířku pro strukturu SIW viz (1.14), kde s je rozteč mezi prokvy, d je průměr prokovů. [15].

$$w_{siw} = w + s \left(0,766 \cdot e^{0,4482 \cdot \frac{d}{s}} - 1,176 \cdot e^{-1,214 \cdot \frac{d}{s}} \right) \quad (1.14)$$

Zda dojde uvnitř vlnovodu k totálnímu odrazu vlny se určí pomocí vzorce (1.9) nebo pomocí vzorce (1.15). Na Obr. 1-7 je názorně zobrazen úhel lomu ϑ uvnitř vlnovodu z [12].

$$\cos \vartheta = \frac{n \lambda_{prac}}{2W_{SIW}} \quad (1.15)$$

Ze vzorce je vypočten úhel šíření vlny v SIWu (pro módy TE_{n0}). Kde n je vid vlnovodu, λ_{prac} je pracovní vlnová délka rov. (2.10) a W_{SIW} je efektivní šířka pro zvláštní typ vlnovodu SIW. Viz rovnice (1.14), která je založena na ekvivalentní šířce obdélníkového vlnovodu (1.13).

Pokud je uvážena podobnost mezi obdélníkovým vlnovodem a SIW, tak lze pomocí vztahu (1.16), určit koeficient vyjadřujícího míru úniku R_{leak} . [12]

$$R_{leak} = 1 - \frac{d}{s \cdot \cos \vartheta} \quad \vartheta < \vartheta_k \quad (1.16)$$

S pomalu se zvyšující pracovní frekvencí roste koeficient úniku R_{leak} skrze prokvy. Parametry použité ve vzorci jako úhel ϑ , průměr prokovů d a rozteč mezi prokvy s .

Další parametry, které již byly zmíněny výše, jako jsou λ_g (1.8), fázová rychlost (1.6), skupinová rychlost (1.7), jsou popsány a vysvětleny v podkapitole Základní parametry obdélníkového vlnovodu a lze je použít i pro strukturu SIW.

2. NÁVRH STRUKTUR

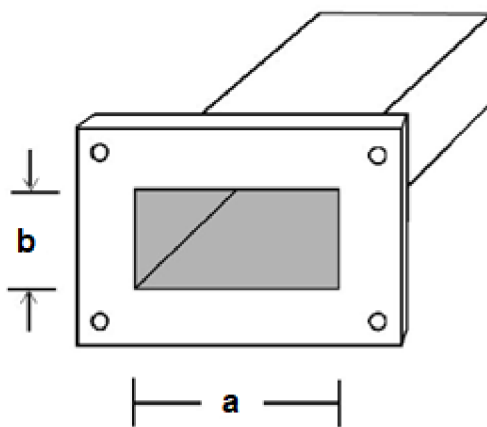
V této kapitole jsou vypočteny parametry pro jednotlivé struktury. Z těchto výpočtů se dále vychází a jsou použity jako vstupní hodnoty k simulacím v programu CST studio.

2.1 Návrh obdélníkového vlnovodu (94 GHz)

Při návrhu RWG struktury existují již normalizované rozměry, které pro určitou oblast pracovní frekvence předurčí rozměr obdélníkového vlnovodu. Na internetu je celá řada podkladů, odkud lze odečíst název a normalizované rozměry. V Tabulka 2 jsou vypsány parametry pro naši pracovní frekvenci. Celá Tabulka 22 je uvedena v příloze dokumentu.

Tabulka 2 Normalizované hodnoty pro obdélníkový vlnovod

EIA Name	Frek. rozsah (GHz)	Materiál	Vnitřní rozměry (mm)	Vnější rozměry (mm)	Kritická frekvence TE ₁₀ (GHz)	Tolerance (mm)
WR10	75-110	Měď Bronz	2.54(a) x 1,27(b)	4,57 x 3,30	59,01	0.0127



Obr. 2-1 Rozměry obdélníkového vlnovodu [13]

Pro tento vlnovod byly odečteny vnitřní rozměry $a = 2,54$ mm, $b = 1,27$ mm. Dielektrikem bude uvažováno vakuum. Nejprve je dobré si určit kritickou frekvenci obdélníkového vlnovodu z vnitřního rozměru a viz vztah (1.4).

$$\lambda_{krit} = 2 \cdot a = 2 \cdot 2,54 \cdot 10^{-3} = 5,08 \text{ mm} \quad (2.1)$$

$$f_{krit} = \frac{c}{\lambda_{krit}} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,08 \cdot 10^{-3}} = 59,01 \text{ GHz} \quad (2.2)$$

$$\lambda_{prac} = \frac{c}{f_{prac} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{94 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{1}} = 3,19 \text{ mm} \quad (2.3)$$

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_{prac}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_{krit}}\right)^2}} = \quad (2.4)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{3,19 \cdot 10^{-3}}\right)^2 - \left(\frac{1}{5,08 \cdot 10^{-3}}\right)^2}} = 4,10 \text{ mm}$$

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2}} = \quad (2.5)$$

$$= \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,19 \cdot 10^{-3}}{5,08 \cdot 10^{-3}}\right)^2}} = 385,21 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$v_{sk} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2} = \quad (2.6)$$

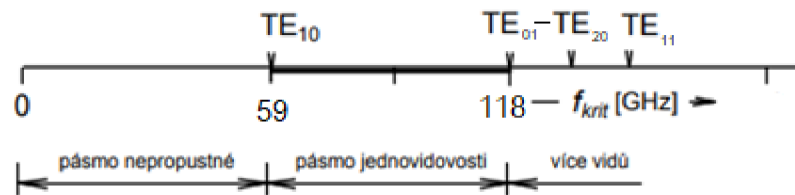
$$= c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{3,19 \cdot 10^{-3}}{5,08 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 233,31 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Parametry použité v rovnicích jsou blíže vysvětleny a popsány v kapitole Základní parametry obdélníkového vlnovodu.

Tabulka 3 Výpočet kritických frekvencí vidů TE

Vid	TE ₁₀	TE ₂₀	TE ₀₁	TE ₁₁
$\lambda_{krit} [-]$	$2 \cdot a$	a	$2 \cdot b$	$2 \cdot a \cdot b / \sqrt{a^2 + b^2}$
$f_{krit} [\text{GHz}]$	59,01	118,03	118,03	131,96

Jelikož je žádoucí pracovat v pásmu jednovidovosti, budeme se pohybovat s pracovní frekvencí mezi videm TE₁₀ a TE₂₀. Zadaná pracovní frekvence 94 GHz odpovídá pásmu jednovidovosti.



Obr. 2-2 Rozdělení kritických frekvencí vidů TE (převzato z [1])

2.2 Návrh SIW (94 GHz)

2.2.1 Volba materiálu

Vhodnou volbou materiálu je ovlivněna celková funkce. Nejdříve je vybrán vhodný substrát, kterým byl zvolen materiál s názvem CuClad 217LX. Měření relativní permitivity nebylo prováděno. Hodnoty z Tabulka 4 jsou odečteny z katalogového listu výrobce. Celá Tabulka 21 je uveden v příloze na konci dokumentu.

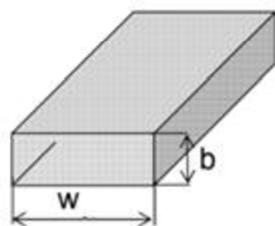
Tabulka 4 Tabulka parametrů materiálu CuClad 217

Substrát	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	Výška h [mm]	Výška pokovení [μm]
CuClad 217	2,17	0,0009	0,508	35

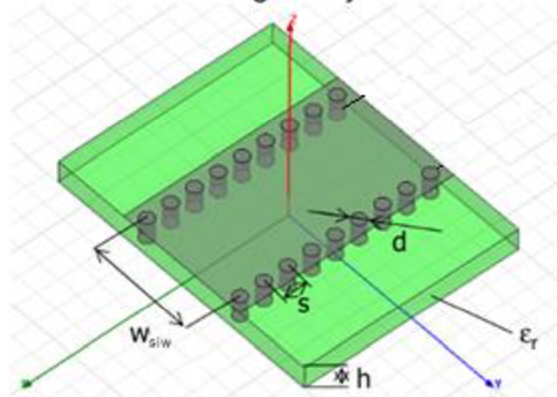
2.2.2 Návrh struktury SIW

Strukturu SIW je možné ladit pomocí tří parametrů, a to šířkou vlnovodu w_{siw} , průměrem proků d a vzdáleností mezi proky s .

Vlnovod obdelníkového průřezu



Vlnovod integrovaný do substrátu



Obr. 2-3 Přepočet z obdelníkového vlnovodu na SIW (převzato z [1])

Mezní frekvence f_{krit} byla již vypočtena pro klasický obdelníkový vlnovod (2.2). Snahou je docílit toho, že správnou volbou ekvivalentní šířky w je nalezena stejná kritická frekvence pro SIW (2.9). Nejprve je vypočtena ekvivalentní šířka w ,

znázorněna na Obr. 2-3, která odpovídá přepočtu šířky a obdélníkového vlnovodu, ale s jinou relativní permitivitou substrátu viz výpočet (1.13).

$$w = \frac{c}{2 \cdot f_{krit} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2 \cdot 59,01 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2,17}} = 1,72 \text{ mm} \quad (2.7)$$

$$\lambda_{krit} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{h}\right)^2}} = \quad (2.8)$$

$$= \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{1 \cdot \pi}{1,72 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{0 \cdot \pi}{0,508 \cdot 10^{-3}}\right)^2}} = 3,44 \text{ mm}$$

$$f_{krit}^{TE_{10}} = \frac{c}{2 \cdot w \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \quad (2.9)$$

$$= \frac{c}{2 \cdot \sqrt{2,17} \cdot 1,72 \cdot 10^{-3}} = 59,1 \text{ GHz}$$

$$\lambda_{prac} = \frac{c}{f_{prac} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{94 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2,17}} = 2,16 \text{ mm} \quad (2.10)$$

Parametry použité v rovnicích jsou blíže vysvětleny a popsány v kapitole Základní parametry a vlastnosti SIW.

Díky známým λ_{krit} a λ_{prac} je dále dopočtena délka vlny ve vlnovodu. Použije se k tomu již použitý vzorec (1.8).

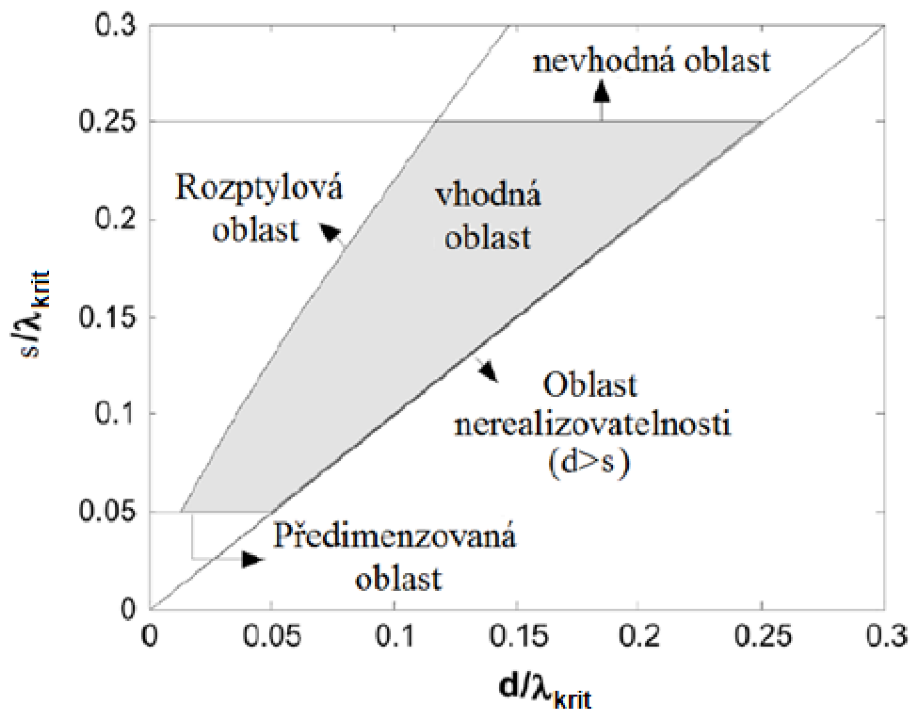
$$\lambda_g = \frac{\lambda_{prac}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2}} = \frac{2,16}{\sqrt{1 - \left(\frac{2,16}{3,44}\right)^2}} = 2,78 \text{ mm} \quad (2.11)$$

Dále na šířce w ekvivalentního obdélníkového vlnovodu budeme stavět (2.7) a vypočteme si z ní šířku w_{siw} struktury SIWu (1.14). Avšak nejprve je nutné zvolit rozměry parametrů s a d , které jsou určeny tak, aby splňovaly doporučenou podmínku viz rovnice (2.12). Další praktickou pomůckou je zvolit počet řad prokůvů menší jak 10, což zajistí vyšší efektivitu a stabilitu vlnovodu. Pro začátek byla zvolena střední hodnota doporučeného intervalu, avšak dále se podle výsledků ze simulací upraví na nejvhodnější, přesnější hodnotu. S ohledem na výrobní možnosti byl zvolen průměr prokovu $d = 0,4 \text{ mm}$.

$$s = \frac{d}{0,65} \quad (0,5 < d/s < 0,8) \quad (2.12)$$

Vypočtená velikost parametru $s = 0,615$ mm, která se dosadí do rovnice (2.13), aby bylo možné vypočítat šířku w_{SIW} .

$$\begin{aligned} w_{SIW} &= w + s \left(0,766 \cdot e^{0,4482 \cdot \frac{d}{s}} - 1,176 \cdot e^{-1,214 \cdot \frac{d}{s}} \right) = \\ &= 1,72 + 0,62 \left(0,766 \cdot e^{0,4482 \cdot \frac{0,4}{0,62}} - 1,176 \cdot e^{-1,214 \cdot \frac{0,4}{0,62}} \right) = \\ &= 2,025 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.13)$$



Obr. 2-4 Doporučená volba v parametru (převzato z [11])

Ověření, zda se zvolily správné parametry je možné i z obrázku Obr. 2-4, kde λ_{krit} lze vypočítat z rovnice (1.3). Úhel ϑ , pod kterým se bude šířit vlna v SIW pro dominantní vid TE_{10} ze vztahu (1.15).

$$\cos \vartheta = \frac{n\lambda_{prac}}{2W_{SIW}} = \frac{1 \cdot 2,16}{2 \cdot 2,03} = 0,532 \quad (2.14)$$

$$\vartheta = \cos^{-1}(0,532) = 57^{\circ}51' \quad (2.15)$$

Ještě poslední zmínka k numerickému návrhu vlnovodu. Je dobré si před návrhem dobře zjistit, jaké jsou možnosti technologie výroby a podle toho zvolit parametr s a d . Typicky možné výrobní hodnoty prokovů je v tomto případě dobré volit okolo rozměru 0,5 mm.

2.3 Přepočítání vlnovodů na 60 GHz

Zatím byla uvažovaná situace pro pracovní frekvenci 94 GHz. Avšak z důvodu měření pomocí dostupné měřicí techniky, která by změřila a ověřila funkčnost návrhů a výpočtů, je nutné přepočítat modely na pracovní frekvenci 60 GHz. V této podkapitole jsou použity již známe vzorce a jsou pouze přepočteny na nižší pracovní frekvence.

2.3.1 Obdélníkový vlnovod

Pro danou pracovní frekvenci se vybral normalizovaný rozměr WR-15, který platí pro určitou frekvenční oblast 50-75 GHz. V Tabulka 5 jsou vypsány parametry pro naši pracovní frekvenci. Celá Tabulka 22 je uvedena v příloze dokumentu a některé informace jsou čerpány ze zdroje [18]. Dielektrikem uvnitř vlnovodu bude vakuum.

Tabulka 5 Normalizované hodnoty obdélníkového vlnovodu

EIA Name	Frek. rozsah (GHz)	Materiál	Vnitřní rozměry (mm)	Vnější rozměry (mm)	Kritická frekvence TE ₁₀ (GHz)	Tolerance (mm)
WR15	50-75	Měď Bronz	3,76(a) x 1,88(b)	5,79 x 3,91	39,88	0,0254

$$\lambda_{krit} = 2 \cdot a = 2 \cdot 3,76 \cdot 10^{-3} = 7,52 \text{ mm} \quad (2.16)$$

$$f_{krit} = \frac{c}{\lambda_{krit}} = \frac{3 \cdot 10^8}{7,52 \cdot 10^{-3}} = 39,88 \text{ GHz} \quad (2.17)$$

$$\lambda_{prac} = \frac{c}{f_{prac} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{60 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{1}} = 5,00 \text{ mm} \quad (2.18)$$

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_{prac}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_{krit}}\right)^2}} = \quad (2.19)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{5,00 \cdot 10^{-3}}\right)^2 - \left(\frac{1}{7,52 \cdot 10^{-3}}\right)^2}} = 6,69 \text{ mm}$$

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2}} = \quad (2.20)$$

$$= \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,19 \cdot 10^{-3}}{5,08 \cdot 10^{-3}}\right)^2}} = 385,21 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$v_{sk} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2} = \quad (2.21)$$

$$= c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{5,00 \cdot 10^{-3}}{7,52 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 223,93 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Parametry použité v rovnicích jsou blíže vysvětleny a popsány v kapitole Základní parametry obdélníkového vlnovodu.

Tabulka 6 Výpočet kritických frekvencí vidů TE

Vid	TE ₁₀	TE ₂₀	TE ₀₁	TE ₁₁
$\lambda_{krit} [-]$	$2 \cdot a$	a	$2 \cdot b$	$2 \cdot a \cdot b / \sqrt{a^2 + b^2}$
$f_{krit} [\text{GHz}]$	39,88	79,73	79,73	89,14

I zde je snahou navrhnout obdélníkový vlnovod jen pro pásmo jednovídnosti, proto se budeme pohybovat s pracovní frekvencí mezi videm TE₁₀ a TE₂₀.

2.3.2 SIW

Nejprve je vypočtena ekvivalentní šířka w , znázorněná na Obr. 2-3, která odpovídá přepočtu šířky a obdélníkového vlnovodu pro frekvenci 60 GHz s danou relativní permitivitou substrátu Cuclad 217 viz výpočet (1.13). Vzhledem k tomu, že mezní frekvence f_{krit} (2.17) byla již vypočtena pro klasický obdélníkový vlnovod (s pracovní frekvencí 60 GHz), je nyní snahou docílit toho, že správnou volbou ekvivalentní šířky w se nalezne podobná kritická frekvence i pro SIW (2.24).

$$w = \frac{c}{2 \cdot f_{krit} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2 \cdot 39,88 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2,17}} = 2,55 \text{ mm} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{krit} &= \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{h}\right)^2}} = \\ &= \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{1 \cdot \pi}{2,55 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{0 \cdot \pi}{0,508 \cdot 10^{-3}}\right)^2}} = 5,10 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} f_{krit}^{TE_{10}} &= \frac{c}{2 \cdot w \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \\ &= \frac{c}{2 \cdot \sqrt{2,17} \cdot 2,55 \cdot 10^{-3}} = 39,90 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\lambda_{prac} = \frac{c}{f_{prac} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{94 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2,17}} = 3,39 \text{ mm} \quad (2.25)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{prac}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2}} = \frac{3,39}{\sqrt{1 - \left(\frac{3,39}{5,10}\right)^2}} = 4,54 \text{ mm} \quad (2.26)$$

Parametry použité v rovnicích jsou blíže vysvětleny a popsány v kapitole Základní parametry a vlastnosti SIW.

Vypočtení šířky w_{siw} pro SIW z (1.14). Nejprve je nutné zvolit rozměry parametrů s a d , tenhle krok je podrobněji popsán v podkapitole Návrh SIW (94 GHz). S ohledem na výrobní možnosti byla zvolena velikost $d = 0,4$ mm.

$$s = \frac{d}{0,65} \quad (0,5 < d/s < 0,8) \quad (2.27)$$

Ze vzorce (2.27) byl vyjádřen parametr $s = 0,615$ mm.

$$\begin{aligned} w_{SIW} &= w + s \left(0,766 \cdot e^{0,4482 \cdot \frac{d}{s}} - 1,176 \cdot e^{-1,214 \cdot \frac{d}{s}} \right) = \\ &= 2,55 + 0,62 \left(0,766 \cdot e^{0,4482 \cdot \frac{0,4}{0,62}} - 1,176 \cdot e^{-1,214 \cdot \frac{0,4}{0,62}} \right) = \\ &= 2,85 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Úhel ϑ , pod kterým se šíří vlna v dutině SIW pro dominantní vid TE_{10} .

$$\cos \vartheta = \frac{n\lambda_{prac}}{2W_{SIW}} = \frac{1 \cdot 3,39}{2 \cdot 2,85} = 0,595 \quad (2.29)$$

$$\vartheta = \cos^{-1}(0,595) = 53^{\circ}30' \quad (2.30)$$

3. NUMERICKÉ MODELY (94 GHz)

V následující kapitole jsou provedeny simulace navržených vlnovodů. Vlnovody byly simulovány pro frekvenci 94 GHz, ale zároveň byla i snaha o co nejlepší konstantní charakteristiku činitele přenosu ve frekvenčním pásmu od 70 GHz až po 100 GHz. K simulaci byl použit program CST Microwave Studio. Vypočtené teoretické návrhy vlnovodů z kapitoly Návrh struktur po návrhu a simulaci modelu v programu nevykazovaly nejlepší požadované vlastnosti, a proto bylo nutné jejich hodnoty lehce optimalizovat. K optimalizaci nejlépe posloužila funkce parametrického rozmítání, díky které jsme si mohli doladit rozměry tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. Všechny následující numerické modely byly navrhovány s materiály jako je vakuum, PEC, abychom zanedbali ztráty v materiálech.

Kvalitním ukazatelem, jak se vlna chová ve vlnovodu, jsou rozptylové parametry (S-parametry), skrze které lze sledovat přenos vlnovodu (S_{21}) a odraz vlny na vstupu (S_{11}). Popisují obvody s rozloženými parametry, protože rozměry zařízení jsou stejné nebo větší než vlnová délka signálu. [14]

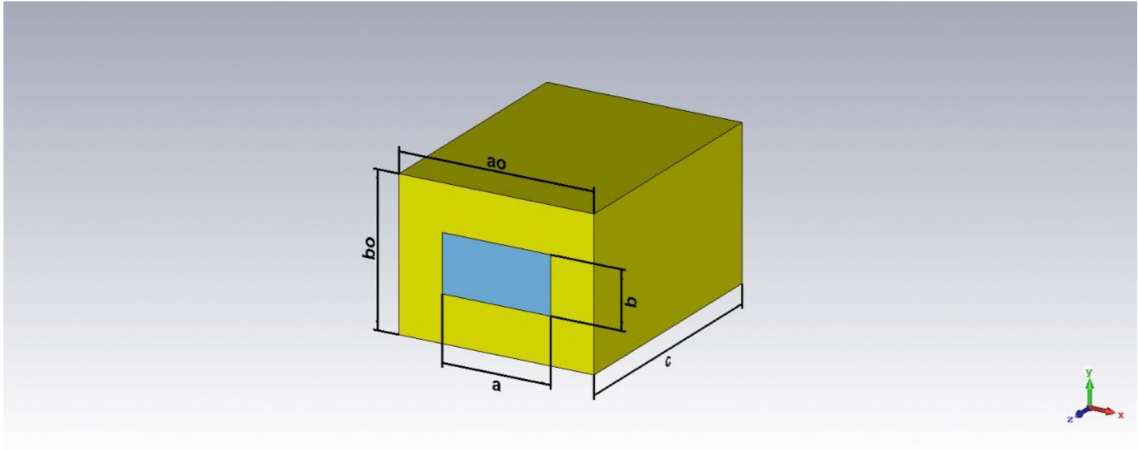
Nejčastěji se v naší charakteristice setkáme s S – *parametry*:

- $S_{1(1), 1(1)}$ - činitel odrazu pro první dominantní vid TE_{10}
- $S_{2(1), 1(1)}$ - činitel přenosu pro první dominantní vid TE_{10}
- $S_{1(2), 1(2)}$ - činitel odrazu pro druhý nejnižší vid TE_{20}
- $S_{1(1), 1(1)}$ - činitel přenosu pro druhý nejnižší vid TE_{20}

Parametr S_{21} je činitel přímého přenosu a S_{12} je činitel zpětného přenosu. Oba dva parametry vychází díky symetričnosti vlnovodu stejně, a proto se budeme dále zabývat pouze parametrem S_{21} .

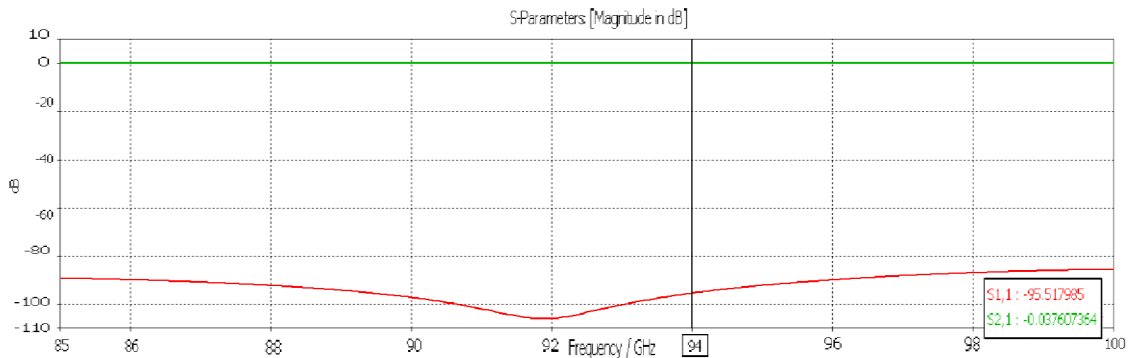
3.1 Obdélníkový vlnovod

Jednalo se o poměrně jednoduchý model návrhu, kde se použily normalizované rozměry a a b . Délka vlnovodu c nehrála při návrhu podstatnou roli, a proto byl zvolen rozměr $c = 3$ mm. Materiálem vlnovodu je čistá měď a vnitřním dielektrikem je vakuum. A_o a B_o jsou normalizované vnější rozměry vlnovodu, viz Tabulka 22.

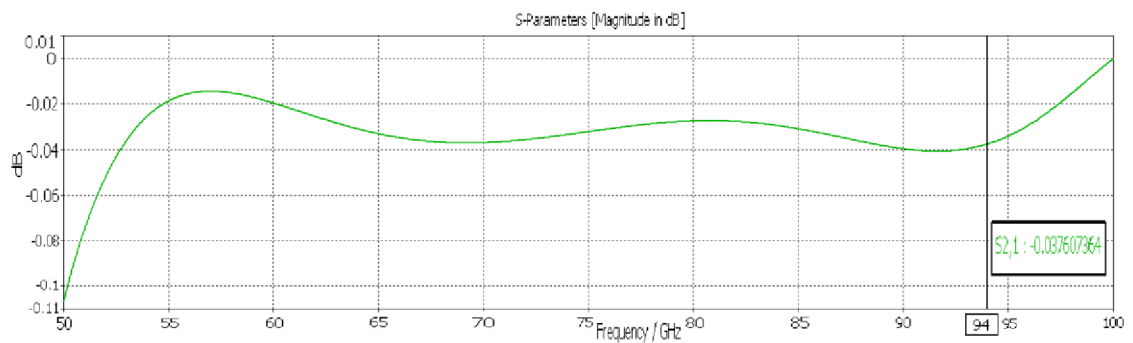


Obr. 3-1 Struktura obdélníkového vlnovodu

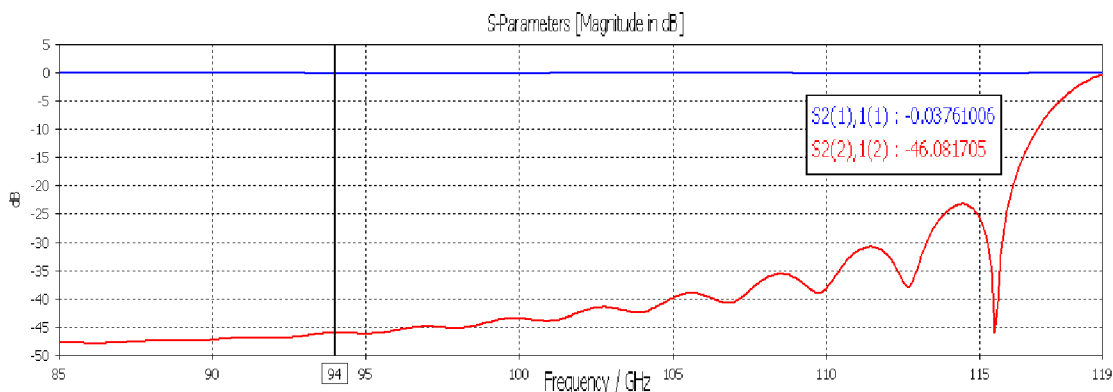
Na Obr. 3-2 jsou znázorněny S-parametry pro činitel odrazu a činitel přenosu dominantního vidu TE_{10} . Na Obr. 3-3 je podrobně zobrazena charakteristika činitele přenosu, kde se pohybujeme kolem hodnoty 0 dB. S činitelem odrazu se podařilo dostat pod hranici - 80 dB, proto lze konstatovat, že se jedná o velmi dobré vedení v celém znázorněném frekvenčním pásmu a v pásmu jednovídrovosti pracuje obdélníkový vlnovod do cca 118 GHz, což odpovídá teoretickému výpočtu z Tabulka 3. Zobrazeno na Obr. 3-4.



Obr. 3-2 S-parametry činitele odrazu a přenosu pro dominantní vid TE_{10}

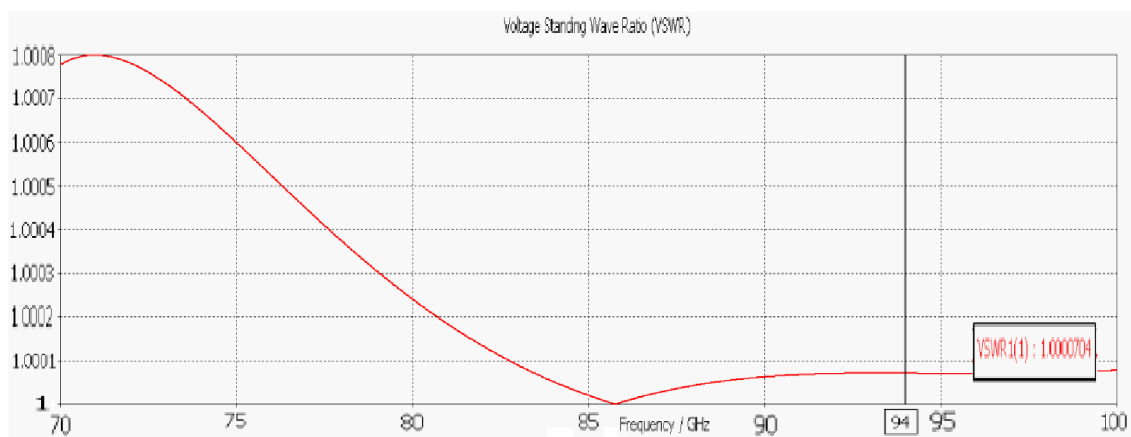


Obr. 3-3 S-parametr činitele přenosu pro oblast kritického kmitočtu TE_{10}



Obr. 3-4 Pásmo jednovydovosti pro obdélníkový vlnovod

V některých případech se vlastnosti vlnovodu lépe vyčtou z VSWR charakteristiky. Jedná se o charakteristiku znázorňující poměr stojatých vln (poměr maximální a minimální amplitudy vlny). Znázorněno na Obr. 3-5.

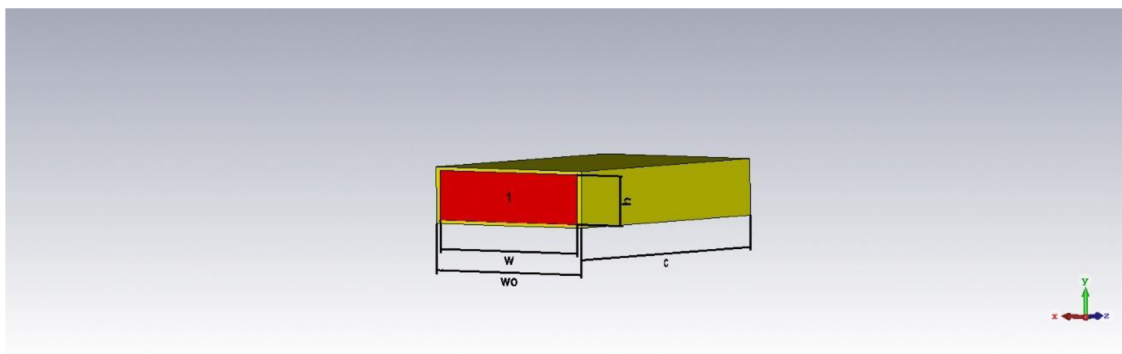


Obr. 3-5 VSWR charakteristika pro obdélníkový vlnovod

VSWR charakteristika potvrzuje velmi dobré vlastnosti vedení, protože je křivka na hodnotě 1.

3.2 SIW

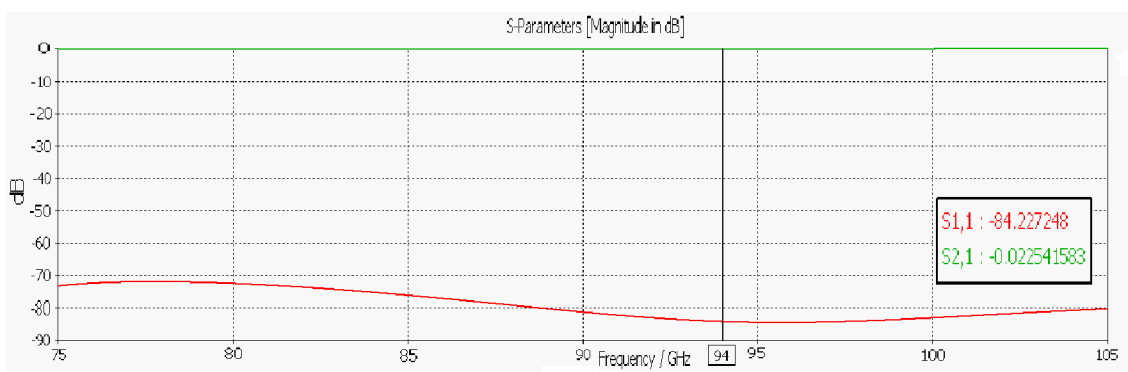
Jako vstupní parametry byly použity vypočtené hodnoty z kapitoly Návrh struktury. Činitel odrazu nedosahoval dostatečných výsledků, a proto se návrh SIWu rozdělili do dvou kroků, aby se dosáhlo lepších výsledků. Nejdříve byl sestaven model klasického obdélníkového vlnovodu se substrátem Obr. 3-6, který tvořil materiál Cuclad 217 s $\epsilon_r = 2,17$ materiálem tvořící kovovou vrstvu byla zvolena čistá měď. Zde byla ověřena správnost výpočtu parametru w . Hodnota činitele přenosu a odrazu je přibližně stejná jako u obdélníkového vlnovodu bez substrátu viz Tabulka 7, což potvrzuje správně zvolený parametr w .



Obr. 3-6 Ekvivalentní obdélníkový vlnovod se substrátem Cuclad 217

Tabulka 7 Srovnání vlastností obdélníkových vlnovodů na frekvenci 94 GHz

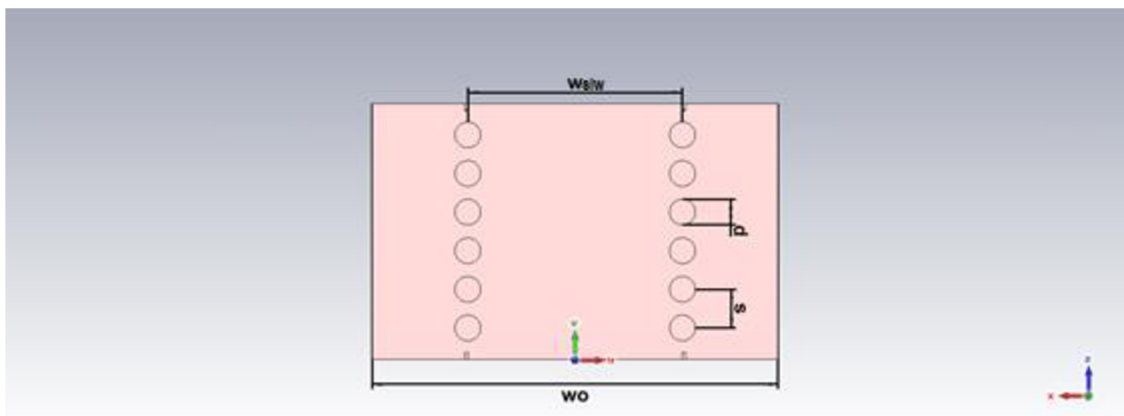
	S1(1), S1(1)	S2(1), S1(1)	VSWR
Obdélníkový vlnovod bez substrátu	-95,52 dB	-0,037 dB	1,00007
Obdélníkový vlnovod se substrátem	-84,23 dB	-0,023 dB	1,00012



Obr. 3-7 S-parametry pro dominantní vid

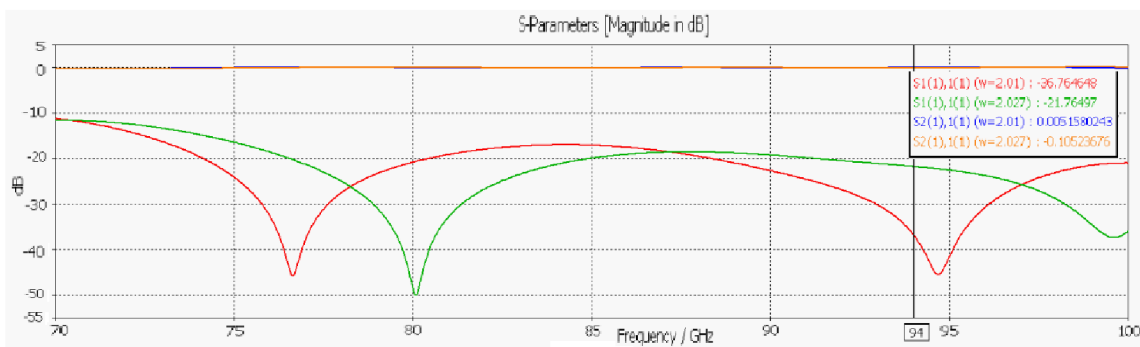
Dále se vyšlo z šířky w , ekvivalentního vlnovodu, a dopočítala se šířka w_{siw} (2.13) znázorněná na Obr. 3-8. Závislost šířky lze ovlivnit pomocí rozměru prokovu d a rozteče mezi prokovy s . V doporučeném intervalu poměru s/d byla jako vstupní hodnota zvolena $s/d = 0,65$. Avšak s použitím rozmítání parametrů se podařilo najít přesnější poměr, který vykazuje lepší výsledky. Proto se pro tento případ bude dále používat nový poměr z rovnice (3.1) namísto z rovnice (2.12).

$$s = \frac{d}{0,585} \quad (3.1)$$



Obr. 3-8 Struktura SIW

Na Obr. 3-9 jsou zobrazeny rozmítané charakteristiky, ze kterých se vybere křivka, která obsahuje nejlepší vlastnosti S-parametrů. Určující je, aby činitel odrazu (S_{11}) byl nižší jak -20 dB a činitel přenosu (S_{21}) byl alespoň větší jak -2 dB. Dále se hledí na celkovou charakteristiku v celém frekvenčním pásmu. [10] Mění se parametr s/d , ale přitom se mění i parametr w_{siw} ze vzorce (2.13).

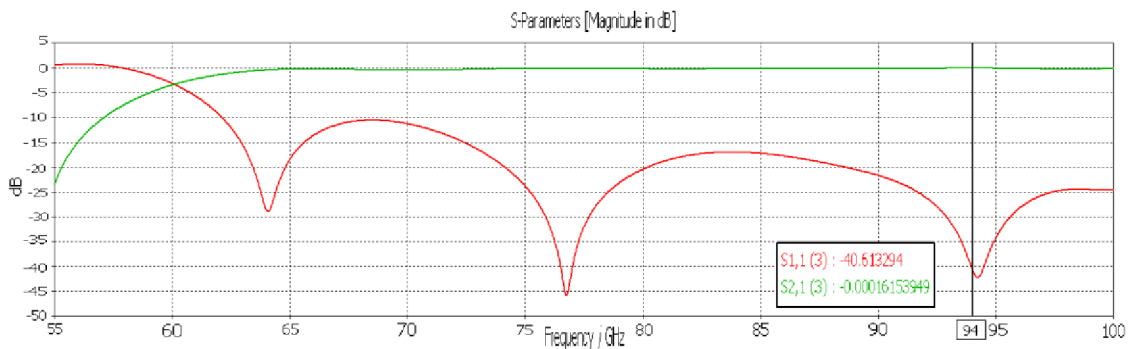


Obr. 3-9 Rozmítání poměru s/d v závislosti na šířce w_{siw}

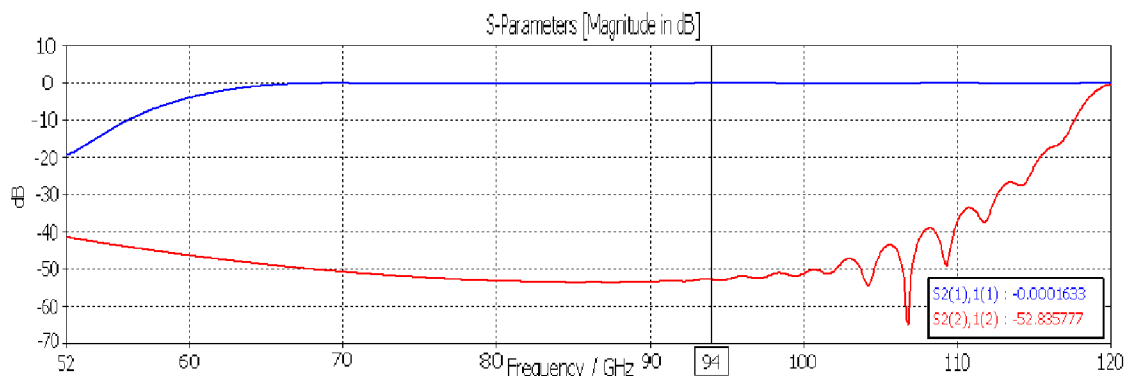
Tabulka 8 Hodnoty parametrů z grafu

w_{siw}	s/d	s	d	w_0
2,027 mm	0,650	0,615 mm	0,4 mm	6 mm
2,010 mm	0,585	0,684 mm	0,4 mm	6 mm

Výsledné S-parametry pro SIW na kmitočtu 94 GHz pro dominantní vid TE_{10} jsou znázorněny na obrázku Obr. 3-10 a číselně v Tabulka 9. Šířka pro SIW, která se dále v simulacích bude používat je $w_{siw} = 2,01$ mm. Na Obr. 3-12 je znázorněno šíření vlny TE_{10} substrátem vlnovodu.



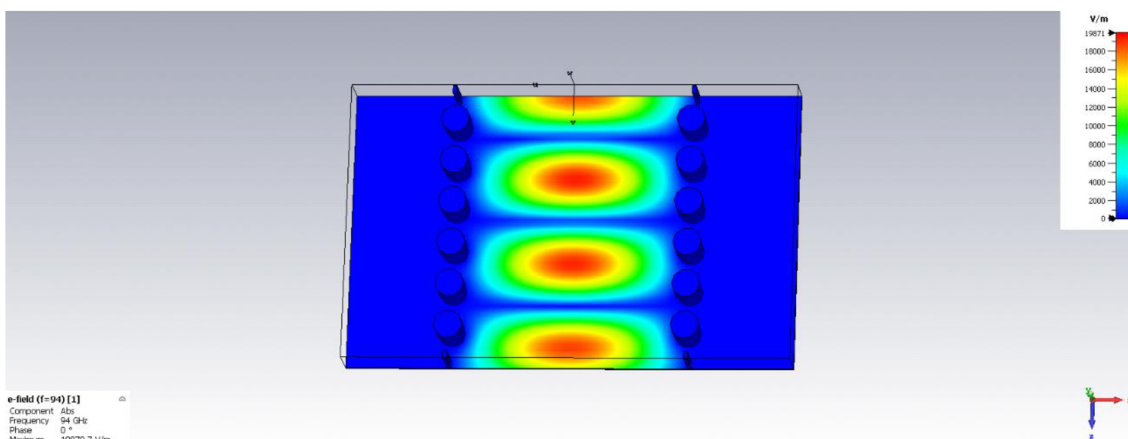
Obr. 3-10 Výsledná charakteristika pro návrh SIW pro vid TE_{10}



Obr. 3-11 SIW pásmo jednovidovosti

Tabulka 9 S-parametry SIWu

	S1(1), S1(1)	S2(1), S1(1)	VSWR
SIW ($w_{siw}=2,010\text{mm}$)	-40,61 dB	-0,000 dB	1,019
SIW ($w_{siw}=2,027\text{mm}$)	-21,76 dB	-0,105 dB	1,178



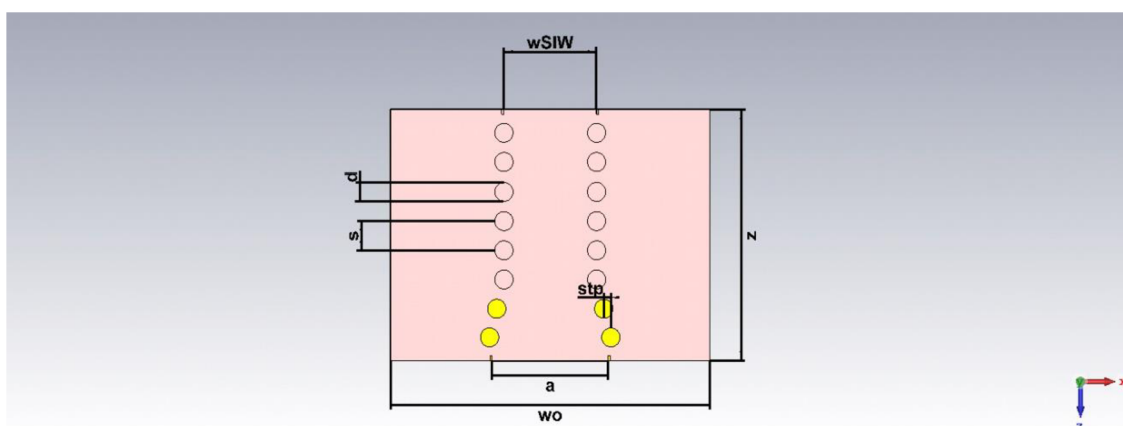
Obr. 3-12 Šíření transversální elektrické vlny

4. PODÉLNÝ PŘECHOD VEDENÍ

4.1 Přechod konstruovaný na frekvenci 94 GHz

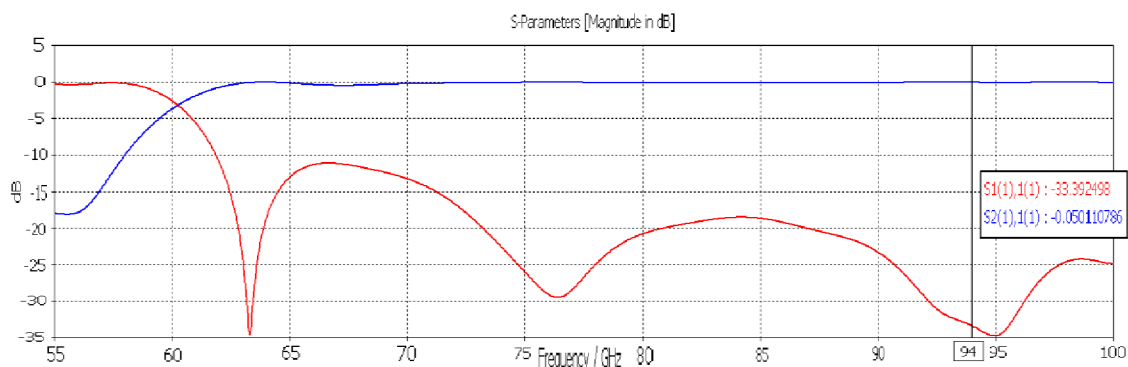
S rozvojem mikrovlnné techniky vznikl požadavek efektivního přechodu mezi klasickými a planárními typy vedení [10]. Existují dva základní typy přechodů, a to přechod podélný a příčný. Nejprve bude popsán přechod mezi vedením SIW a obdélníkovým vlnovodem v podélné rovině.

Vzhledem k tomu, že klasický obdélníkový vlnovod má jinou výšku oproti struktuře SIW, bylo potřeba vybrat přechod, kde se bude moci libovolně měnit výška. K tomu se využije schodový přechod (v anglické literatuře Stepped Waveguide Transition), který je založen na multisekčním transformátoru Chebyshev [17]. Je potřeba se dostat do výšky a šířky struktury obdélníkového vlnovodu, proto byl rozdíl výšek dvou různých vlnovodů vyřešen přes schodovitý přechod a změna šířky se upravila přes „zuzující se“ část prokovů, která je součástí struktury SIW. Na Obr. 4-1 je zobrazena struktura SIW se zúžením. Pro frekvenci 94 GHz jsou v návrzích použity materiály PEC, čistá měď, Cuclad 217, vakuum.



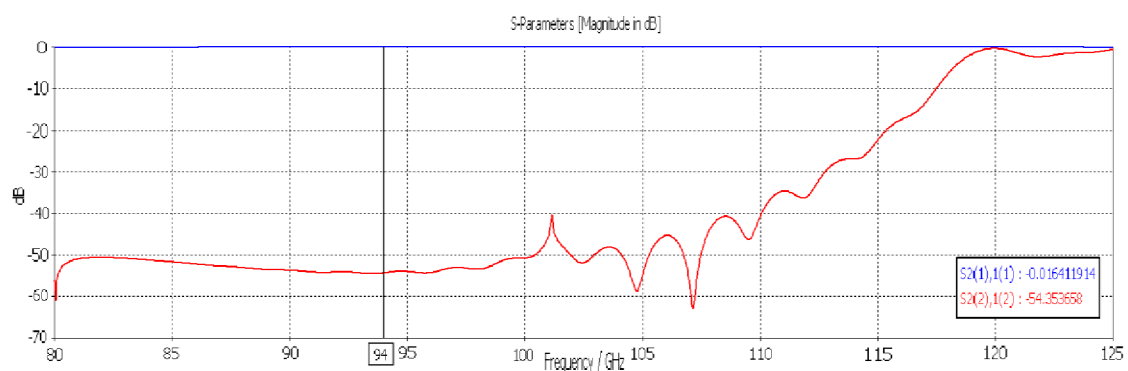
Obr. 4-1 Struktura SIW se zúžením

Pomocí rozmítání parametru kroku zúžení stp ($stp = 0,157$ mm) se hledají nejlepší vlastnosti S-parametrů. Pokusilo se eliminovat vyzáření TE vlny skrze prokovy přidáním druhé řady prokovů, ale vlastnosti se významně nezměnily. Odstup prokovů druhé řady od první byl zvolen tak, aby to bylo technicky proveditelné. Na Obr. 4-2 jsou znázorněny S-parametry SIW se zúžením pro dominantní vid.



Obr. 4-2 S-parametry SIW pro vid TE_{10}

Je dobré sledovat i další kritické kmitočty vidů, protože je žádoucí pracovat v pásmu jednovidovosti. Proto je snahou, aby se v pásmu 94 GHz, kromě dominantního vidu ve vlnovodu, jiný vid nešířil. Na Obr. 4-3 jsou zobrazeny S-parametry pro druhý nejnižší vid TE_{20} , který se vybudí až od frekvence 119 GHz.

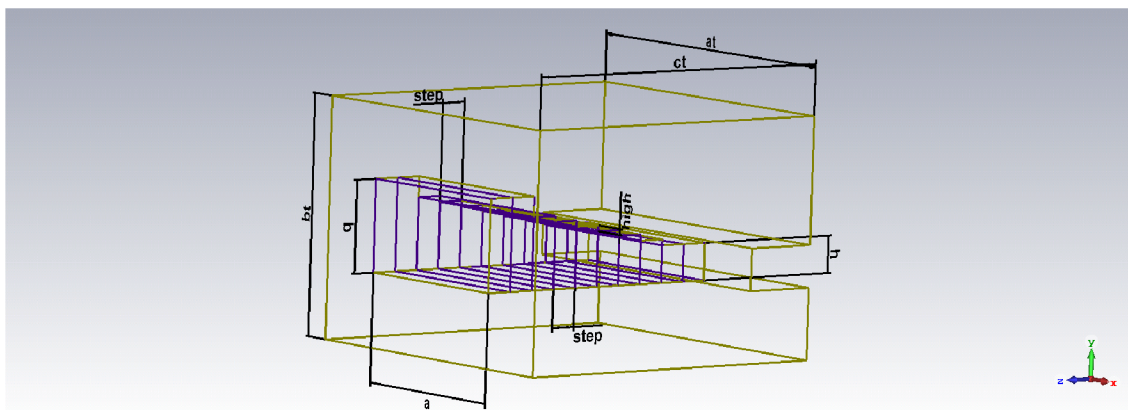


Obr. 4-3 S-parametry SIW pro dva nejnižší vidy TE_{10} , TE_{20}

Tabulka 10 S-parametry na frekvenci 94 GHz

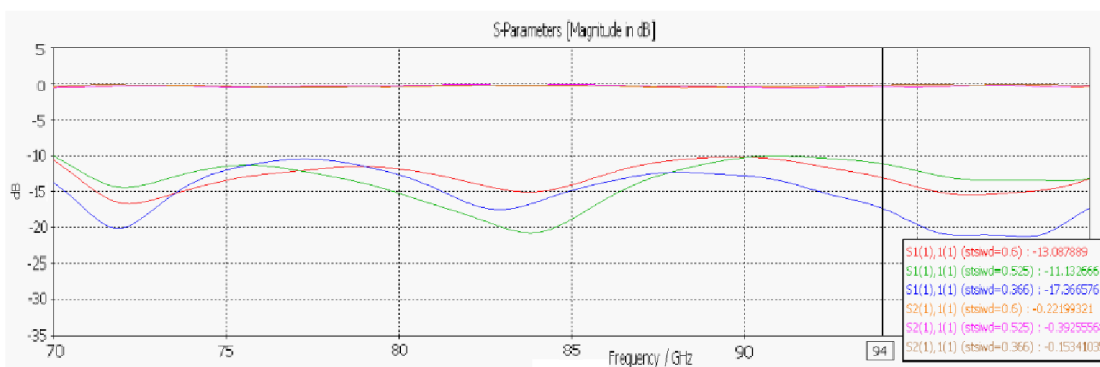
	$S1(1), S1(1)$	$S2(1), S1(1)$	$VSWR(TE_{10})$	$S1(2), S1(2)$	$S2(2), S1(2)$
SIW se zúžením	-33,39 dB	-0,0501 dB	1,043	-15,76 dB	-54,35 dB

Do této fáze se podařilo dostat s přechodem (zúžením) na požadovanou šířku a klasického obdélníkového vlnovodu. Nyní je ještě nutné se dostat na výšku b , viz Obr. 2-1. K tomu se využije již zmíněného schodovitěho tvaru přechodu, jehož struktura je znázorněna na Obr. 4-4.



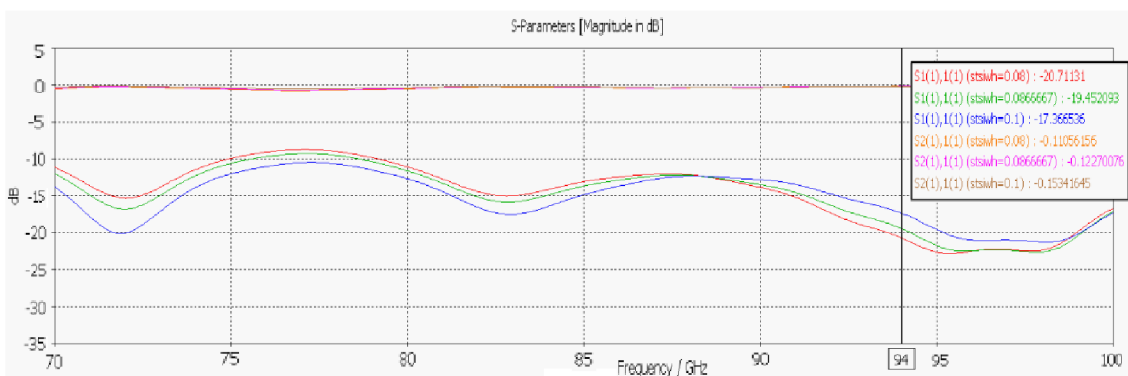
Obr. 4-4 Struktura rovinného přechodu

Vodivým materiálem k numerickým výpočtům byl zvolen materiál PEC. Umožní urychlit simulaci a vyhne se zbytečnému zhoršení S-parametrů. Rozměry parametrů *high* a *step* byly určeny analyticky. Nejdříve se rozmítalo parametr *high* viz Obr. 4-5, určil se vyhovující rozměr ze simulace a dále se s ním pokračovalo při rozmítání parametru *step* viz Obr. 4-6.



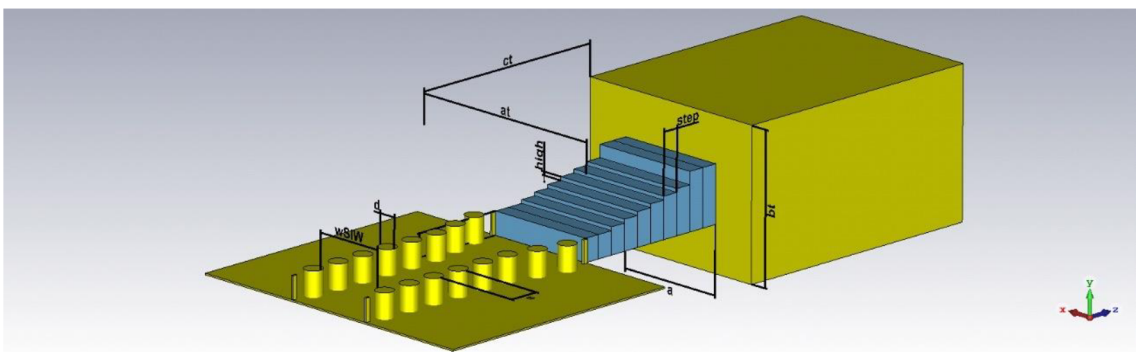
Obr. 4-5 Rozmítání parametru *step* v rovinném přechodu

Je dobré zmínit fakt, že v praxi se nikdy nepodaří vyfrézovat pravouhlé hrany rohů schodovité části, a proto se do simulací kreslí už rohy zaoblené, které návrh ze simulace přiblíží k reálněji dosažitelným vlastnostem. Kvůli náročnosti návrhu zaoblení se tento krok vynechal a pouze zmínil, protože je dobré s tím počítat.



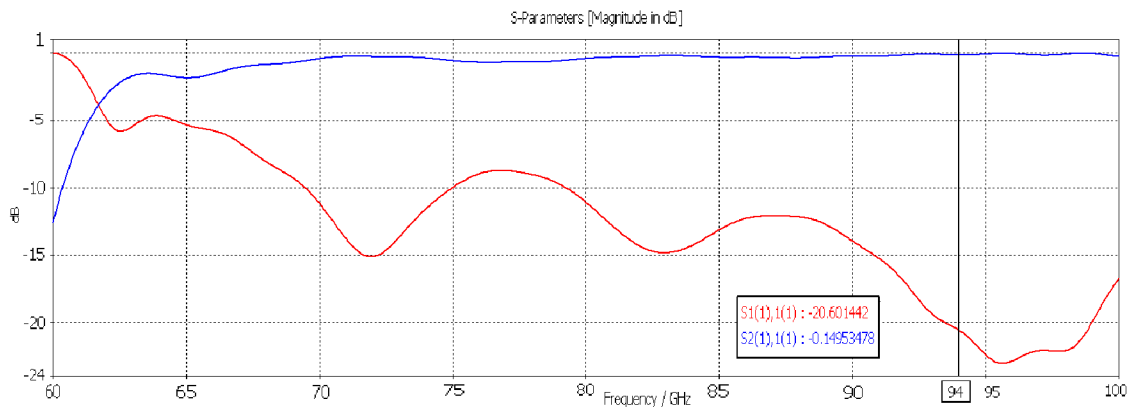
Obr. 4-6 Rozmítání parametru *high* v rovinném přechodu

Parametr výšky **high** byl také zvolen tak, aby se dostalo na požadovanou výšku **b** struktury obdélníkového vlnovodu během maximálně 10 kroků **step**. Po celou délku schodovitého přechodu se parametr **high** nemění s konstantním krokem. Začátek a konec přechodu je navržen tak, že dva kroky (**step**) po sobě jdoucí mají stejnou výškou (**high**), což zaručí lepší ustálení fáze signálu šířícího se přechodem. Zajímavostí je také to, že struktura jevíla lepších vlastností při použití hranaté, schodovité stěny oproti celistvé, šikmé stěně. Díky hranatým schodům vlna neposune svoji fázovost. [20] Na Obr. 4-7 je znázorněna celá sestava, která obsahuje vedení obdélníkového vlnovodu a SIW propojeného typem rovinného schodovitého přechodu na bázi Chebysheva transformátoru.

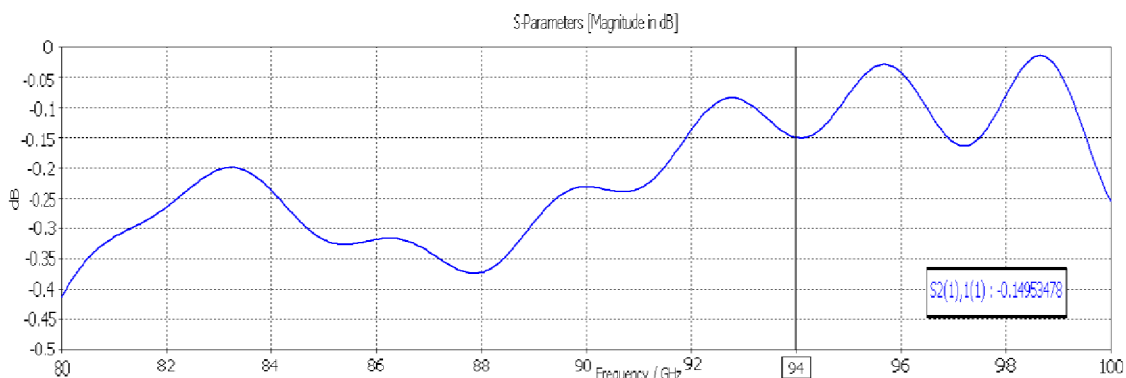


Obr. 4-7 Sestava rovinného přechodu

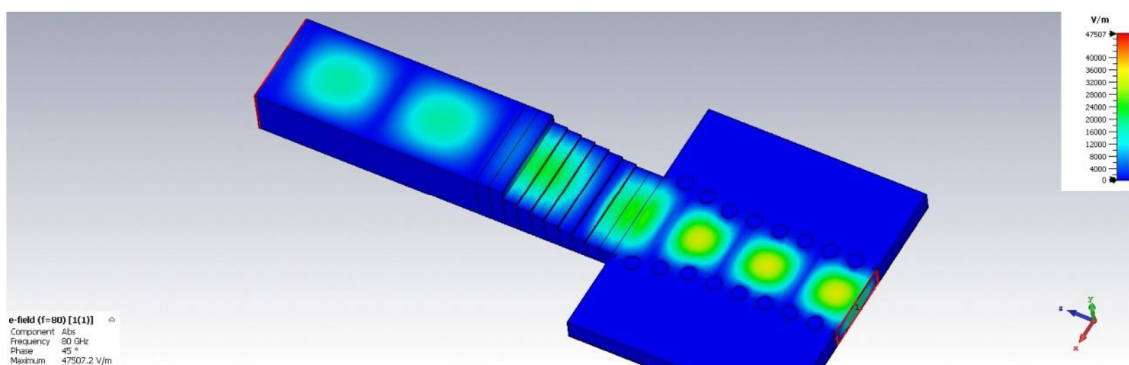
Na závěr kapitoly jsou zobrazeny S-parametry celkové sestavy, vlna TE šířící se celou sestavou Obr. 4-10 a v Tabulka 11 jsou shrnuty výsledky podélného přechodu.



Obr. 4-8 S-parametry sestavy SIW-přechod-RWG pro dominantní vid TE_{10}



Obr. 4-9 Detailní zobrazení činitele přenosu vidu TE₁₀



Obr. 4-10 Šíření vlny TE podélnou strukturou

Tabulka 11 Sumarizace výsledků pro $f = 94$ GHz

Přechod podélný	S ₁₁ (TE ₁₀)	S ₂₁ (TE ₁₀)	S ₁₁ (TE ₂₀)	S ₂₁ (TE ₂₀)	VSWR (TE ₁₀)
	-20,60 dB	-0,149 dB	-15,85 dB	-167,18 dB	1,204

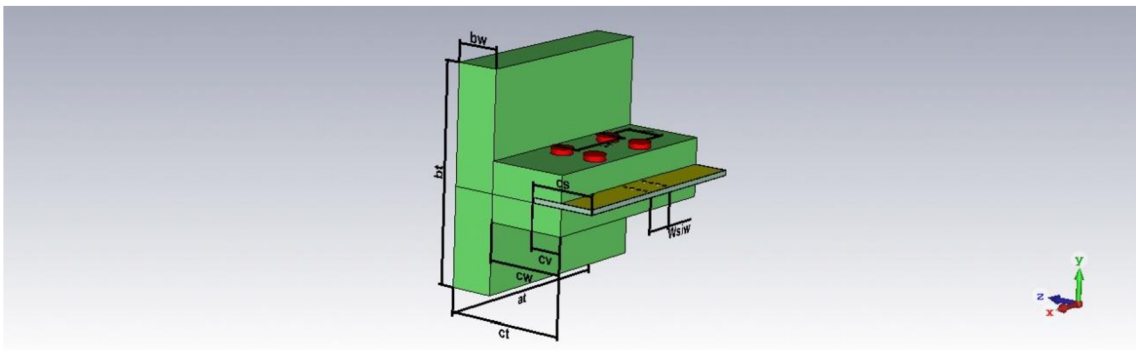
Je-li hodnota VSWR < 1,5 lze považovat výsledek za uspokojivý. V ideální případě by celková sestava měla VSWR rovno jedné.

Tabulka 12 Rozměry parametrů pro podélný přechod

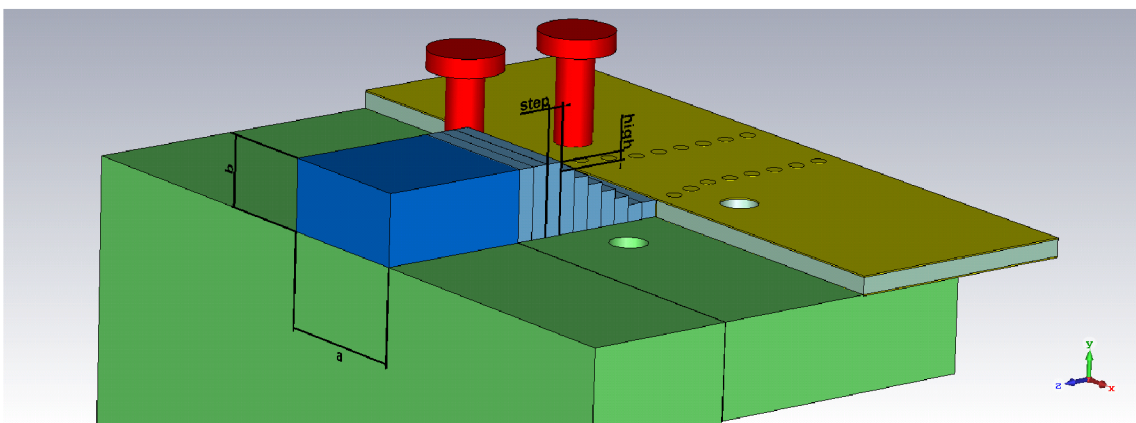
Označení	Hodnota [mm]	Popis
step	0,37	Rozměr kroku
high	0,08	Výška schodu
a _t	4,58	Šířka přechodu
b _t	3,31	Výška přechodu
c _t	7,20	Hloubka přechodu
h	0,508	Výška substrátu
a	2,54	Šířka obdélníkového vlnov.
b	1,27	Výška obdélníkového vlnov.
w _{siw}	2,01	Šířka SIWu
w _o	7,00	Šířka celkového substrátu
s	0,68	Rozteč mezi prokovy
d	0,40	Průměr prokovů
stp	0,137	Zúžení SIW

4.2 Přejchod konstruovaný na frekvenci 60 GHz

V prvních krocích byla navržena struktura pro 94 GHz, v dalším kroku je struktura z podkapitoly Přejchod konstruovaný na frekvenci 94 GHz přepočtena na nižší frekvenci 60 GHz a navržena do výrobitelné podoby. Je potřeba počítat s tím, aby bylo možné vyfrézovat otvory, navrhnout otvory pro šroubky nebo jak se jednotlivé díly složí k sobě. Bezztrátové materiály se nahradily materiály ztrátovými a v návrhu se postupovalo podobně jako v kapitolách výše při návrhu pro 94 GHz. Na Obr. 4-11 je podoba celého přechodu. Rozměry a_t a b_t jsou normalizované rozměry pro měřicí sondu. Přejchod je zapouzdřen vně těla přechodu, kam se zasune z části SIW, který je připevněn k přechodu pomocí dvou šroubků. Druhý pár šroubků drží u sebe dvě části podélného přechodu, které jsou rozděleny kvůli vyfrézování těla přechodu. Struktura byla navržena pro různé rozměry SIWu (do stran), avšak nejmenší možná šířka je alespoň 8 mm k dostatečnému zařívování SIWu ve štěrbině. Materiálem pro přechod, prokovy a zemnicí vrstvy byla použita měď.

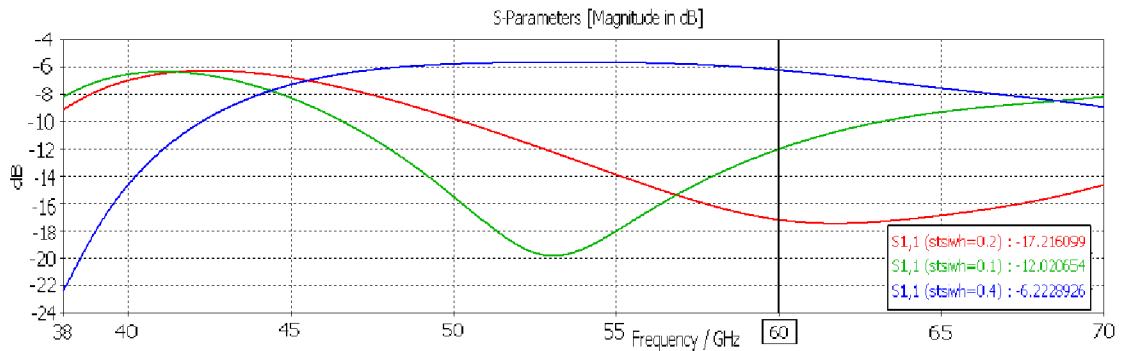


Obr. 4-11 Podoba složené struktury pro podélný přechod na 60 GHz

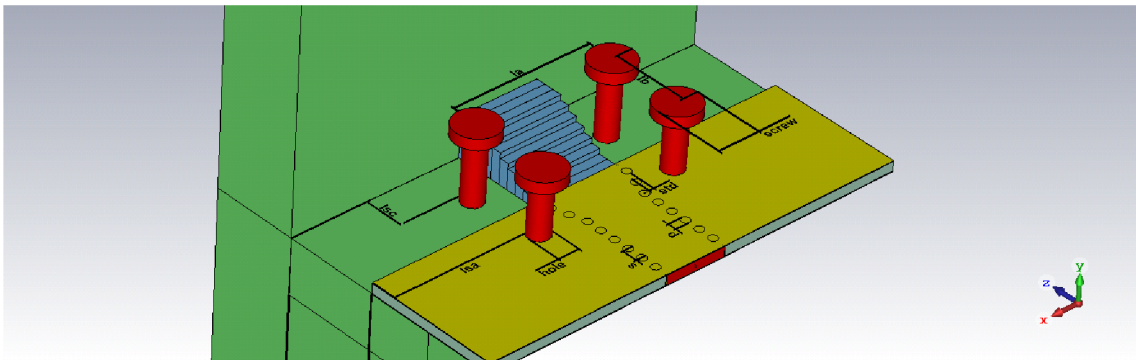


Obr. 4-12 Detailní pohled na schodovitý přechod vně struktury

Rozměr pro parametr *step* byl zvolen tak, aby byla vně dutiny zachována fázovost vlny. Ze simulací se nejlépe jeví výsledky, které splňovaly maximální počet deseti schodů. Výška a délka schodu byla zvolena dle nejlepších výsledků z rozmítání parametrů. Ukázka rozmítání parametru *high* ve schodovité struktuře přechodu je na Obr. 4-13 .

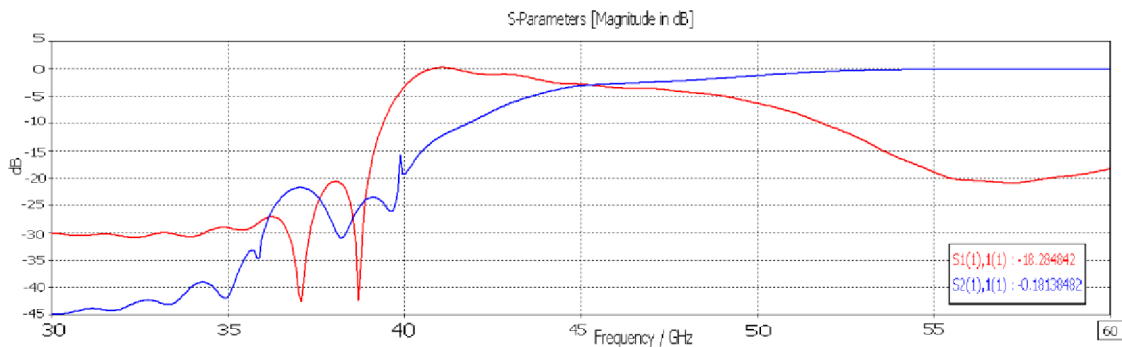


Obr. 4-13 Rozmítání parametru high, zobrazení činitele odrazu pro vid TE₁₀

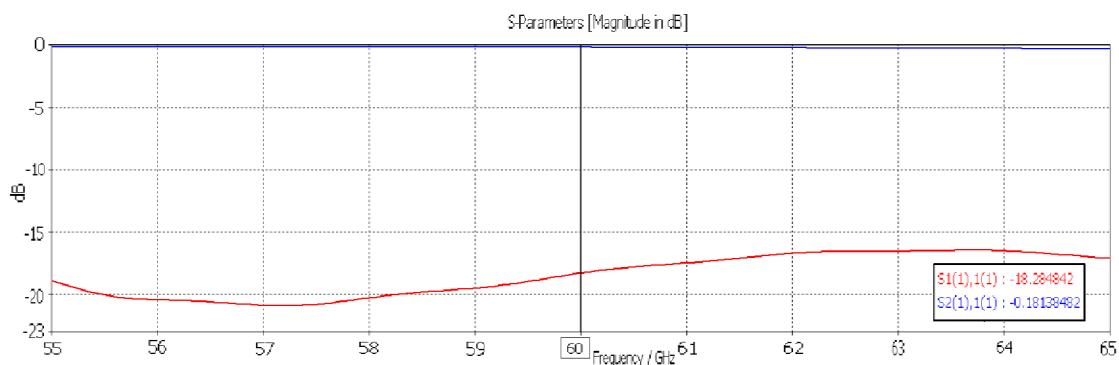


Obr. 4-14 Vnitřní pohled na SIW

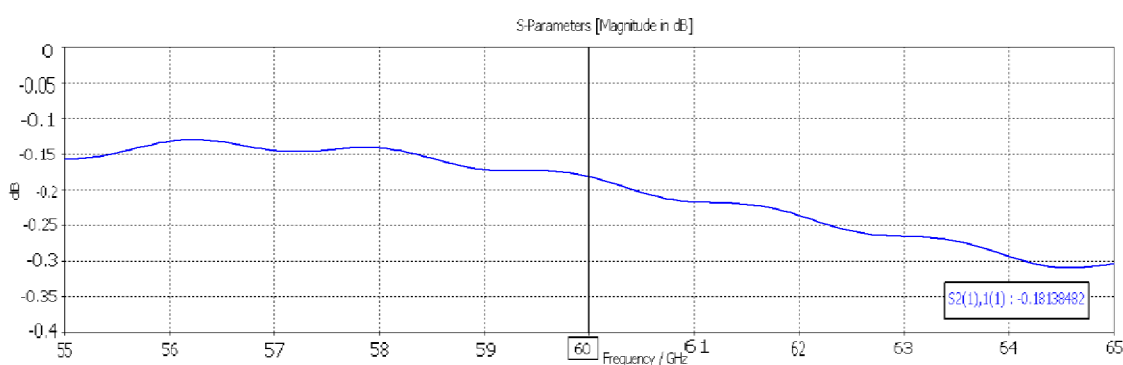
Výsledné charakteristiky S-parametrů jsou na obrázcích níže. Číselné údaje činitelů odrazu a přenosu, na frekvenci 60 GHz, jsou vypsány v Tabulka 13. Konečné rozměry parametrů navrženého podélného přechodu jsou v Tabulka 14. Struktura pracuje v pásmu jednovidovosti až do cca 81 GHz.



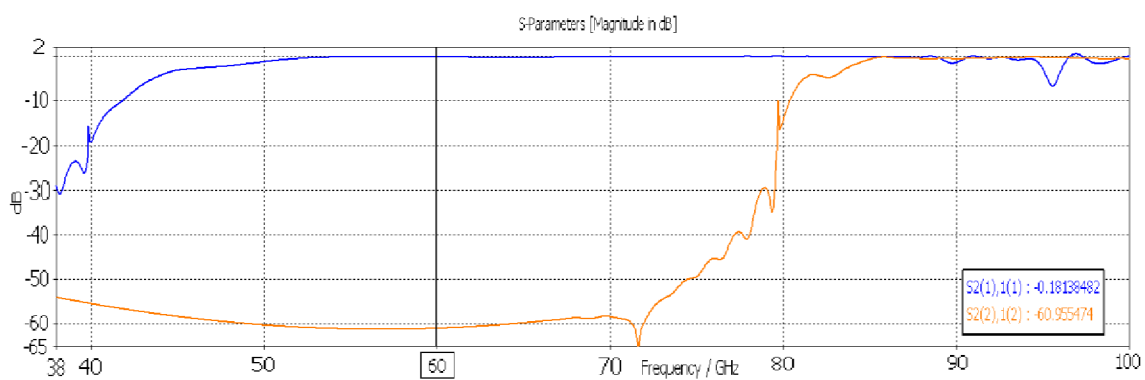
Obr. 4-15 S-parametry pro oblast kritického kmitočtu pro vid TE₁₀



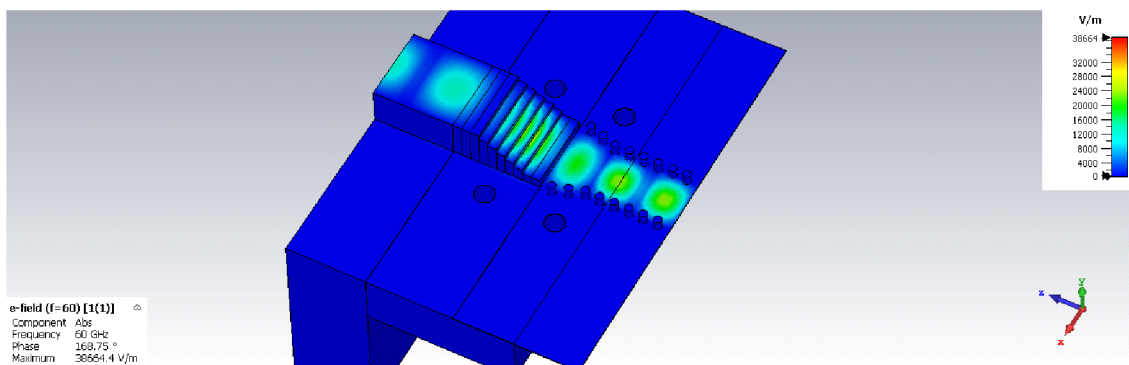
Obr. 4-16 S-parametry pro oblast pracovního kmitočtu pro vid TE_{10}



Obr. 4-17 Detailní zobrazení činitele přenosu pro vid TE_{10}



Obr. 4-18 S-parametry činitele přenosu pro dva nejnižší vidy



Obr. 4-19 Šíření vlny TE podélným přechodem

Tabulka 13 Sumarizace výsledků pro $f = 60$ GHz

Přechod podélný	$S_{11} (TE_{10})$	$S_{21} (TE_{10})$	$S_{11} (TE_{20})$	$S_{21} (TE_{20})$	VSWR (TE_{10})
	-18,29 dB	-0,181 dB	-48,33 dB	-60,955 dB	1,275

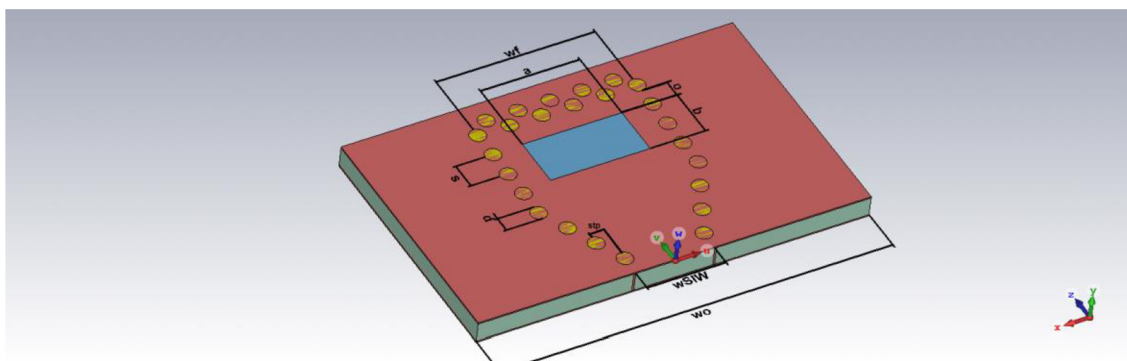
Tabulka 14 Rozměry parametrů pro podélný přechod

Označení	Hodnota [mm]	Popis
step	0,433	Rozměr kroku
high	0,240	Výška schodu
a_t	20,000	Šířka přechodu
b_t	20,000	Výška přechodu
c_t	11,346	Hloubka přechodu
c_w	7,330	Délka schodov. přechodu
a	3,759	Šířka obdélníkového vlnov.
b	1,880	Výška obdélníkového vlnov.
w_{siw}	2,838	Šířka SIWu
c_v	3,016	Hloubka vnoření substrátu
s	0,717	Rozteč mezi prokovy
d	0,400	Průměr prokovů
b_w	4,000	Šířka stěny k připevnění
l_a	6,700	Rozteč mezi šrouby
l_b	3,500	Rozteč mezi šrouby
l_{sc}	1,815	Vzdálenost od stěny
l_{sa}	6,667	Vzdálenost od kraje
std	0,230	Krok zúžení v SIWu
screw	2,000	Hlava šroubu
hole	1,000	Průměr pro otvor šroubku

5. PŘÍČNÝ PŘECHOD VEDENÍ

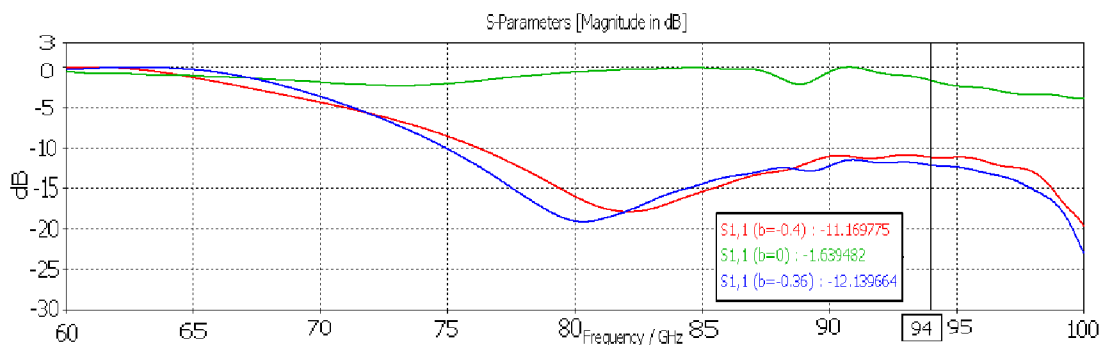
5.1 Přejchod konstruovaný na frekvenci 94 GHz

U příčného přechodu byla snaha eliminovat ztráty, a proto byla zvolena koncepce přechodu založeného na SIW struktuře [19]. Díky tomu se ušetřilo dostatečné množství místa a materiálu. Návrh byl realizován tak, že se vyšlo z původního modelu SIWu, kde signál proudí z jedné strany substrátu na druhou. Z jedné strany substrátu byl odstraněn vstup a na jeho místě se vytvořila třetí stěna prokovů. V tuhle chvíli by se bez přidání nového vstupu vytvořili obrazy stojatých vln (vlna by se od stěny odrážela zpět na vstup). Z horní vodivé stěny SIWu se odstranila měděná zemnicí vrstva o rozměru plochy nového vstupu. Ten musel mít rozměr klasického obdélníkového vlnovodu, aby se na strukturu SIW mohl jednoduše připevnit. Tím se zvolila velikost druhého vstupu o stejných rozměrech a i b . Parametr $a = 2,54$ mm a $b = 1,27$ mm. Vstupní šířka w_{siw} se rozšiřuje do šířky w_f , která opisuje rozměr kolem vstupu umístěného na substrátu, na který se připevní obdélníkový vlnovod. Parametry s a d jsou ponechány velikostně stejně jako u rovinného přechodu. Vycházelo se z předem známých rozměrů viz Podélný přechod vedení, avšak bylo nutné rozmítat parametry o a w_f . Rozmítáním vzdálenosti o (odsazení strany vstupu (portu) a od stěny prokovů) se hledalo nejlepších vlastností S-parametrů. Na Obr. 5-1 je zobrazena konstrukce upraveného SIW pro ortogonální přechod. Použitým kovovým materiálem byla zvolena měď. Pro 94 GHz, tzn. pro malé mm vlny, je rozměr vstupu na zemnicí vrstvě SIWu ještě dostatečně malý a není potřeba dělat žádnou redukci mezi obdélníkovým vlnovodem a SIWem. Pro lepší vlastnosti byla přidána druhá stěna prokovů, aby nedocházelo k úniku energie. Šířka w_{siw} , která byla vypočtena podle rovnice (2.13), je vhodná jak pro podélný, tak i pro příčný přechod na stejné pracovní frekvenci.



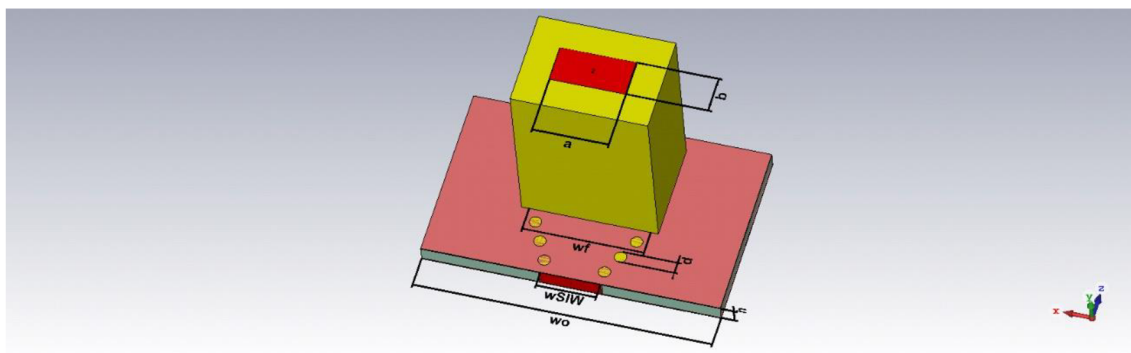
Obr. 5-1 Upravený SIW pro ortogonální přechod

Na Obr. 5-2 jsou zobrazeny S-parametry rozmítání vzdálenosti portu od stěny (parametr o). Nejlepší vlastnosti se jeví při vzdálenosti 0,36 mm od stěny prokovů.

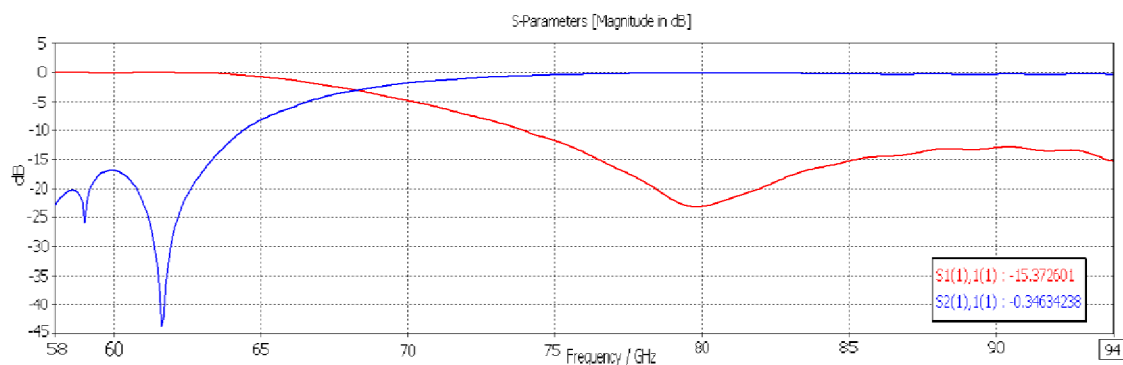


Obr. 5-2 Rozmítání parametru α , zobrazení činitele odrazu

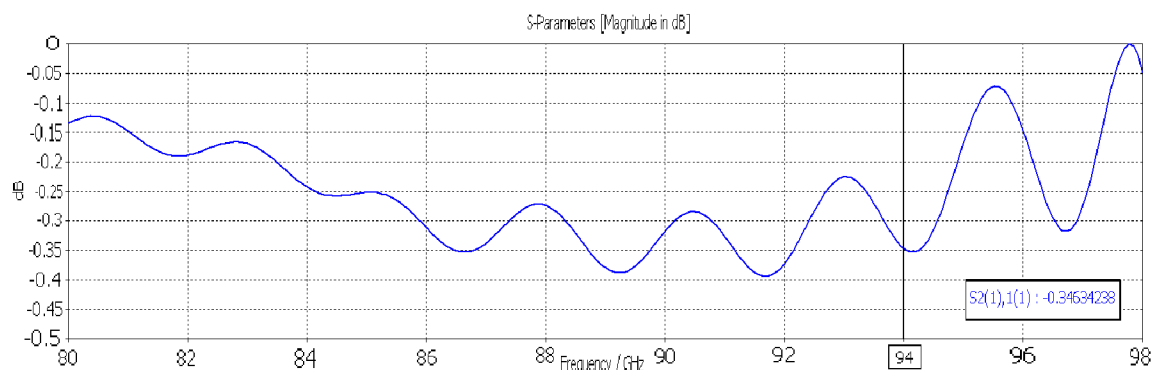
Na Obr. 5-4 je znázorněna celá sestava příčného přechodu mezi dvěma typy vlnodů, a to obdélníkového a SIW s upravenou strukturou.



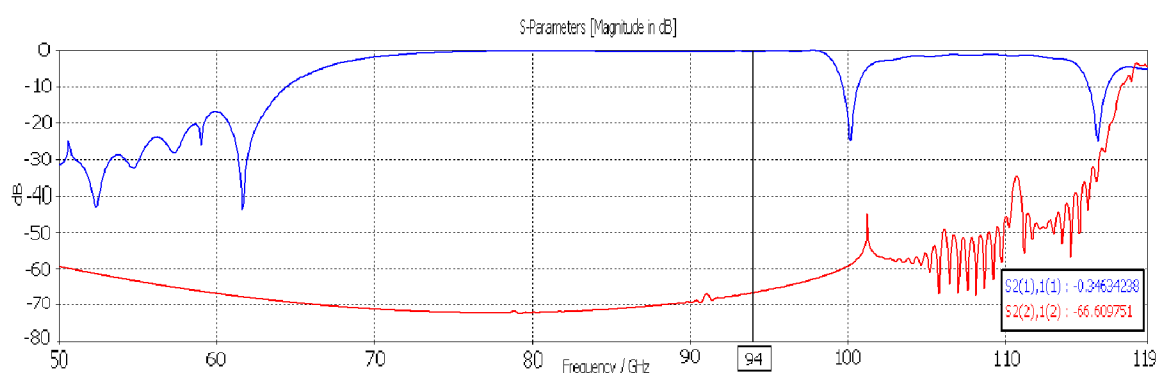
Obr. 5-4 Ortogonální přechod dvou vlnodů



Obr. 5-3 S-parametry pro oblast kritického kmitočtu, vid TE_{10}

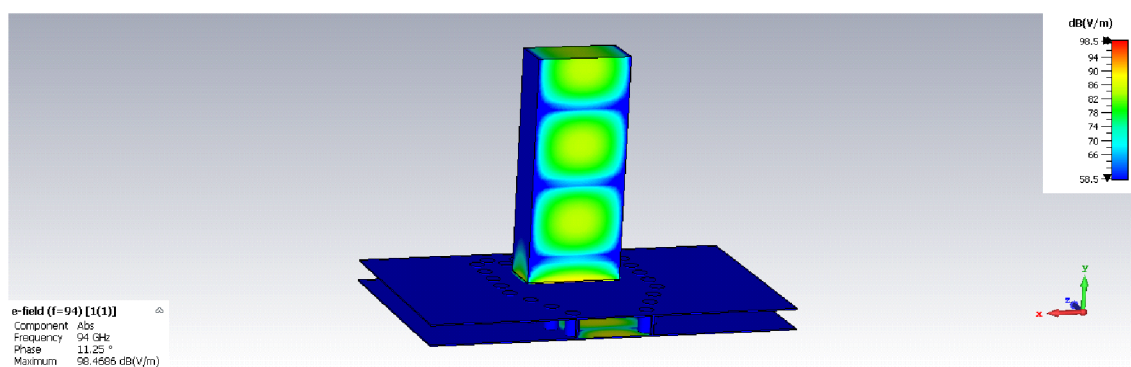


Obr. 5-5 Detailní zobrazení činitele přenosu vidu TE₁₀



Obr. 5-6 S-parametry činitele přenosu pro dva nejnižší vidy

Závěrem jsou zobrazeny S-parametry příčného přechodu, na kterých lze vidět, že od frekvence 78 GHz se nazpět odrazí pouze jedna desetina signálu a činitel přenosu se přibližuje k nulové hodnotě. V pásmu jednovidovosti pracujeme cca do 117 GHz.



Obr. 5-7 Šíření vlny TE příčným přechodem

V Tabulka 15 jsou shrnuty výsledky ortogonálního přechodu vlnovodu. Hodnota VSWR je zde o trochu vyšší než u vlnovodu podélného, avšak stále se jedná o poměrně uspokojivý výsledek vedení (<1,5).

Tabulka 15 Sumarizace výsledků pro $f = 94$ GHz

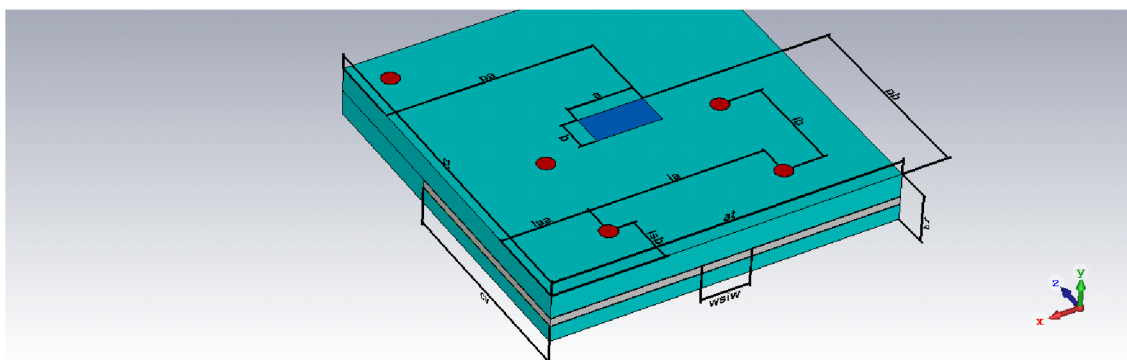
Přechod příčný	$S_{11} (TE_{10})$	$S_{21} (TE_{10})$	$S_{11} (TE_{20})$	$S_{21} (TE_{20})$	VSWR (TE_{10})
	-15,37 dB	-0,346 dB	-10,65 dB	-66,61 dB	1,428

Tabulka 16 Rozměry parametrů pro příčný přechod

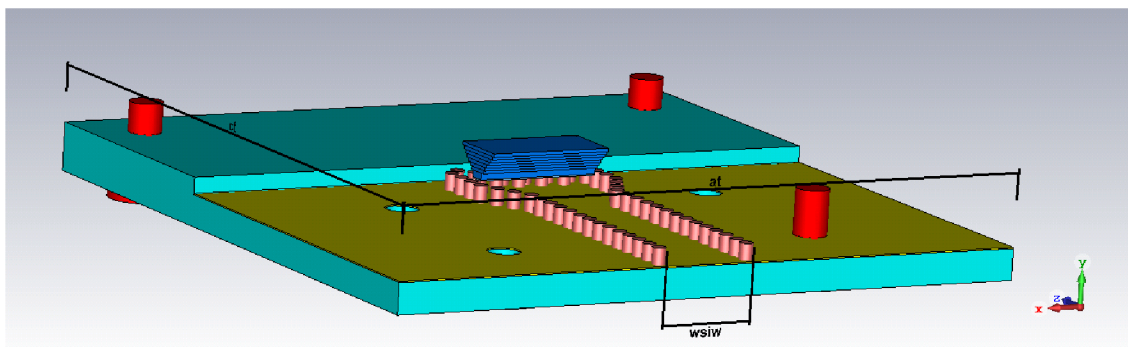
Označení	Hodnota [mm]	Popis
a	2,540	Obdel. vlnovod rozměr šířky
b	1,270	Obdel. vlnovod rozměr výšky
d	0,400	Průměr prokovů
s	0,680	Rozestup mezi prokovy
w_{siw}	2,010	Šířka SIW
w_o	10,000	Celková šířka substrátu
o	0,450	Odsazení od kraje
w_f	4,000	Šířka prokovů kolem vstupu
h	0,508	Výška substrátu
stp	0,343	Zúžení SIW

5.2 Přechod konstruovaný na frekvenci 60 GHz

U přechodu rovinného nebylo potřeba uvažovat nijak velké změny při přepočtu na nižší frekvenci. Pro příčný přechod bylo potřeba počítat s tím, že pro nižší pracovní frekvenci se vlnovodem budou šířit delší vlnové délky a je nutné použít větší plochu vstupu, než tomu bylo pro 94 GHz. Proto bylo nutné vymyslet novou podobu přechodu. Inspirace byla brána ze zdroje [19], kde je z horní stěny SIWu vytvořená redukce, která se rozšiřuje na velikost normalizované velikosti obdélníkového vlnovodu (WR15). Šířka w_{siw} byla ponechána stejná, jako pro strukturu SIWu v podélném přechodu. Přechod je rozdělen na dvě části, které k sobě fixují tři páry šroubků. Vrchní čtvercová stěna je navržena tak, aby bylo možné připevnit měřící přírubu. Podobně jako pro podélný přechod na frekvenci 60 GHz se bezztrátové materiály v návrhu nahradily materiály ztrátovými.



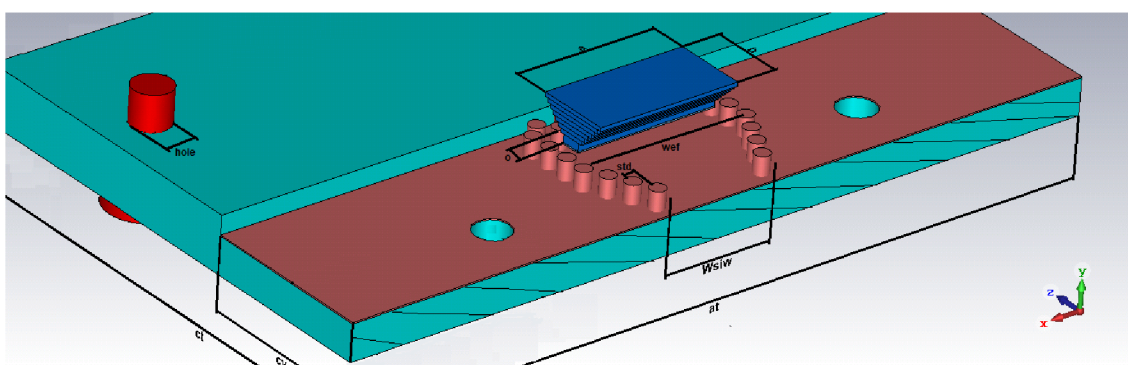
Obr. 5-8 Pohled shora



Obr. 5-9 Čelní pohled

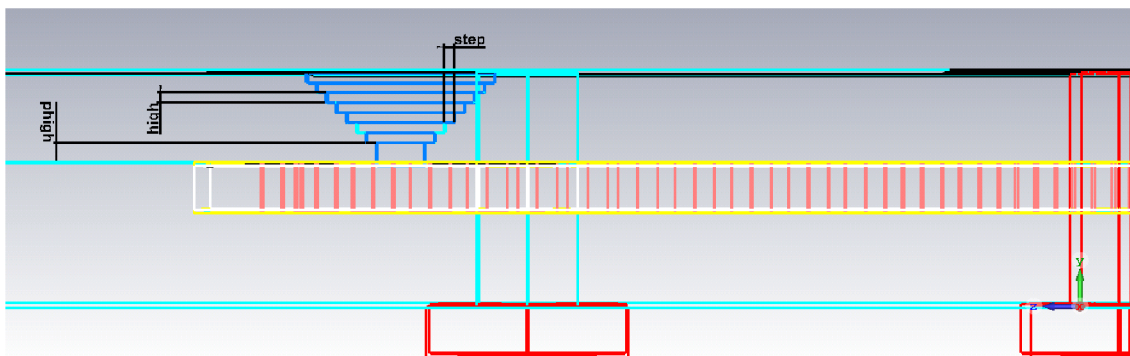
Na Obr. 5-10 je zobrazena vnitřní struktura přechodu. Nejlepších vlastností se docílilo díky:

- Dvojitá zadní stěna prokovů, díky které je minimalizován únik energie skrze prokovy (R_{leak} viz vypočet (1.16))
- Šířka w_{ef} mezi bočními stěnami prokovů, by neměla být o mnoho větší, než je šířka vstupu a
- Správný výpočet šířky předního vstupu SIWu (parametr w_{siw})
- Malá vzdálenost odsazení vrchního portu v SIWu od zadní stěny prokovů (parametr o)
- Šířka strany b se krokově rozšiřuje do obou směrů
- Šířka strany a musí mít konstantní šířku podél celého schodovitého přechodu (z vrchního vstupu v SIWu až po vstup obdélníkového vlnovodu)
- Schodovitý tvar přechodu mezi dvěma vstupy různé velikosti (udržuje stejnou fázi vlny)
- Konstantní krok rozšíření z šířky w_{siw} do šířky w_{ef} (parametr stp)
- Zvolit správnou rozteč mezi prokovy (parametr s)

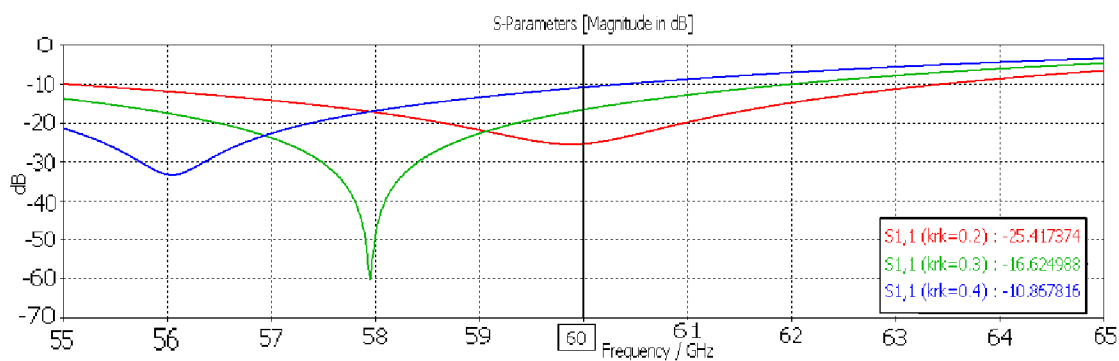


Obr. 5-10 Vnitřní ořezaný pohled do přechodu

Na Obr. 5-11 je zobrazen boční pohled na strukturu. Krok (**high**) schodovitého přechodu má konstantní výšku schodu. Avšak ke zlepšení vlastností byl přidán odlišný schod s vlastní výškou (**phigh**). Výška parametru **phigh** byla rozmítána k získání co nejlepších výsledků. Zobrazení činitele odrazu z rozmítání parametru **phigh** je na Obr. 5-12.

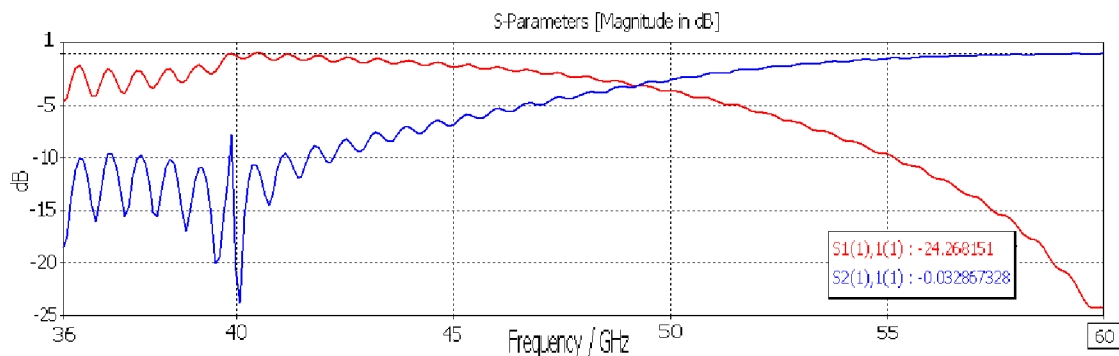


Obr. 5-11 Pohled z boku

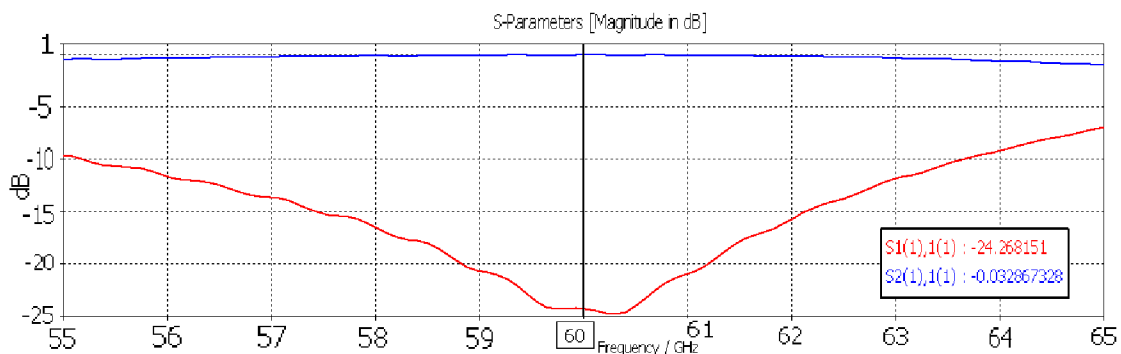


Obr. 5-12 Rozmítání parametru *phigh*

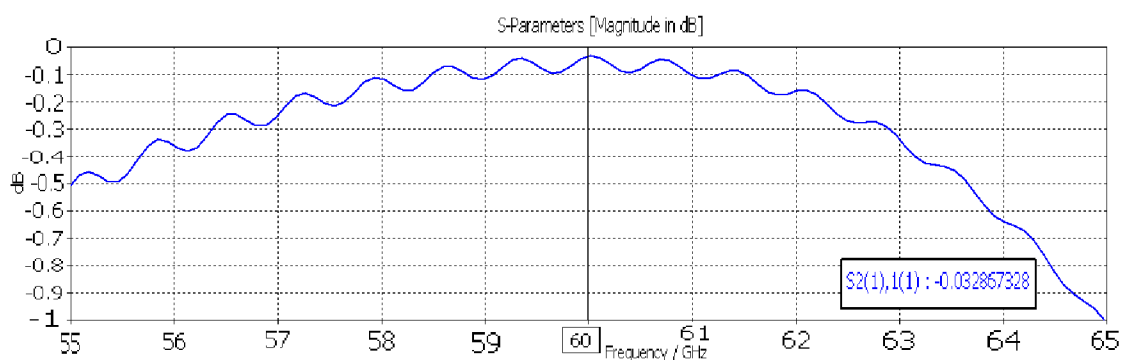
Výsledné S-parametry pro příčný přechod jsou na obrázcích níže. Číselné údaje činitelů odrazu a přenosu na frekvenci 60 GHz jsou vypsány v Tabulka 17. Rozměry parametrů použitých při návrhu příčného přechodu jsou v Tabulka 18.



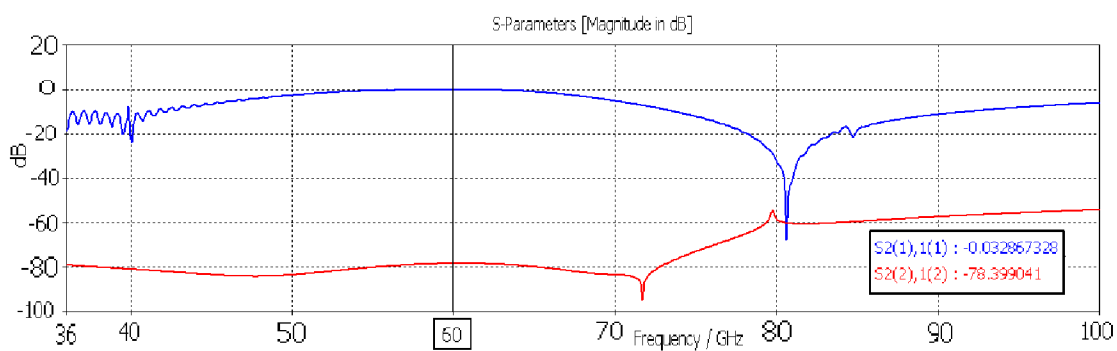
Obr. 5-13 S-parametry pro oblast kritického kmitočtu, vid TE_{10}



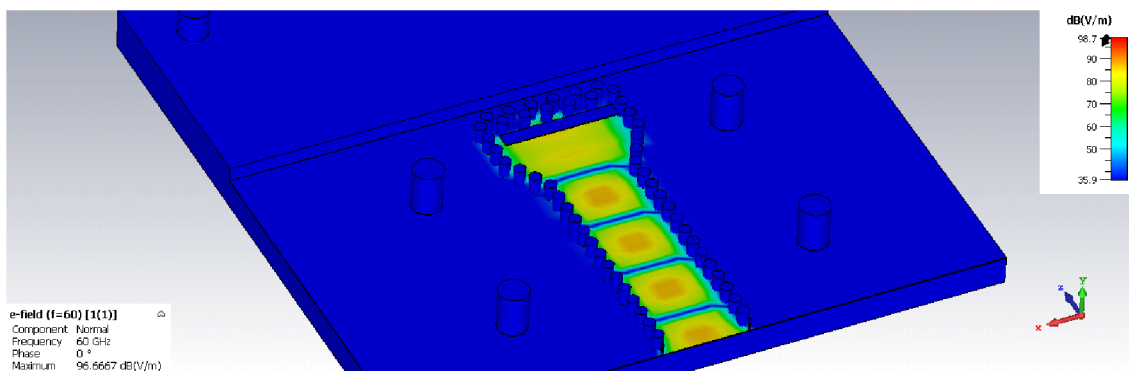
Obr. 5-14 S-parametry pro oblast pracovního kmitočtu, vid TE_{10}



Obr. 5-15 Detailní zobrazení činitele přenosu pro vid TE_{10}



Obr. 5-16 S-parametry činitele přenosu pro dva nejnižší vidy



Obr. 5-17 Šíření vlny TE podélným přechodem

Tabulka 17 Sumarizace výsledků pro $f = 60$ GHz

Přechod příčný	$S_{11} (TE_{10})$	$S_{21} (TE_{10})$	$S_{11} (TE_{20})$	$S_{21} (TE_{20})$	$VSWR (TE_{10})$
		-24,27 dB	-0,032 dB	-9,19 dB	-78,39 dB

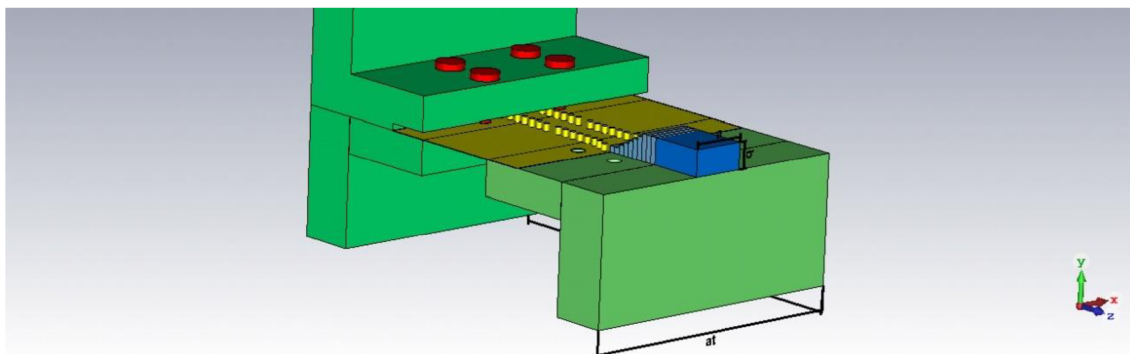
Tabulka 18 Rozměry parametrů pro příčný přechod

Označení	Hodnota [mm]	Popis
step	0,100	Délka schodu
high	0,100	Výška schodu
phigh	0,197	Výška schodu
ohigh	0,600	Výška schodu
a_t	20,000	Délka přechodu
b_t	20,000	Šířka přechodu
c_t	2,333	Výška přechodu
a	3,759	Šířka portu obdélník. vlnov.
b	1,880	Výška portu obdéln. vlnov.
W_{siw}	2,838	Šířka vstupu SIWu
W_{ef}	4,050	Rozměr mezi prokovy
s	0,571	Rozteč mezi prokovy
d	0,400	Průměr prokovů
l_{sb}	2,981	Rozměr díry od čela
l_{sa}	5,000	Rozměr díry od kraje
a_f	20,000	Délka stěny pro přírubu
l_b	6,000	Rozteč mezi otvory
l_a	10,000	Rozteč mezi otvory
std	0,269	Krok zúžení v SIWu
screw	2,000	Hlava šroubu
hole	1,000	Průměr pro otvor šroubku
p_b	11,195	Vzdálenost vstupu od čela
p_a	11,880	Vzdálenost vstupu od kraje
c_v	12,245	Hloubka vnoření substrátu
o	0,404	Odsazení od stěny prokovů

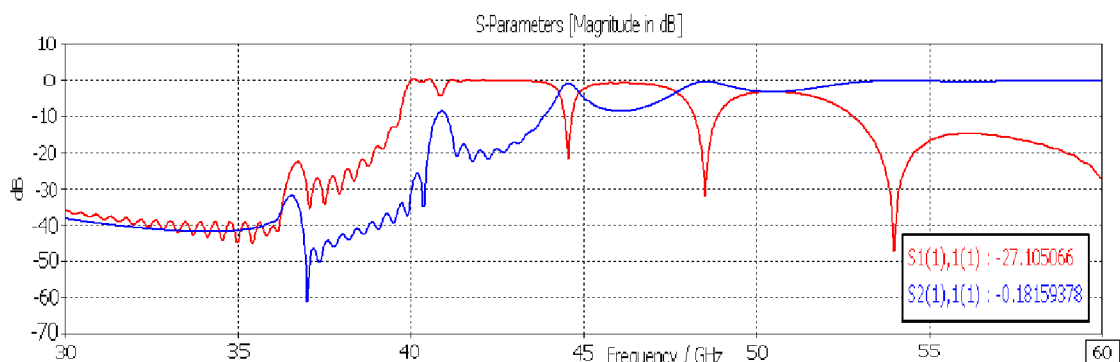
6. MĚŘÍCÍ SESTAVA PŘECHODŮ

Ke správnému ověření funkce přechodů se zapojí dva totožné přechody (příčný, podélný). Na jejich vnější čtvercové stěny se připevní příruby s měřící technikou, kterou se ověří správná funkčnost a získají se výsledky. Při fyzickém měření by se struktury složily do stejné podoby jako je zobrazeno na obrázcích.

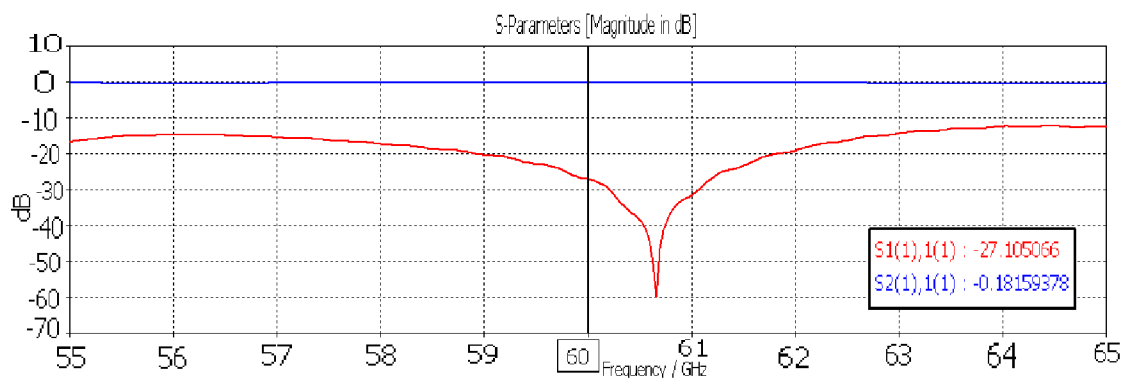
6.1 Podélný přechod



Obr. 6-1 Pohled na složenou strukturu dvou podélných přechodů



Obr. 6-2 S-parametry složené sestavy podélného přechodu, vid TE_{10}

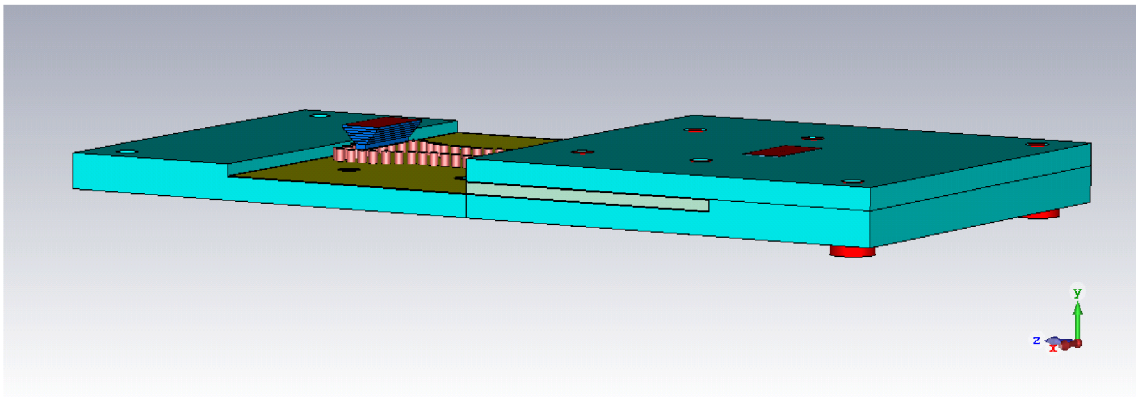


Obr. 6-3 Činitel odrazu a přenosu pro oblast pracovního kmitočtu, vid TE_{10}

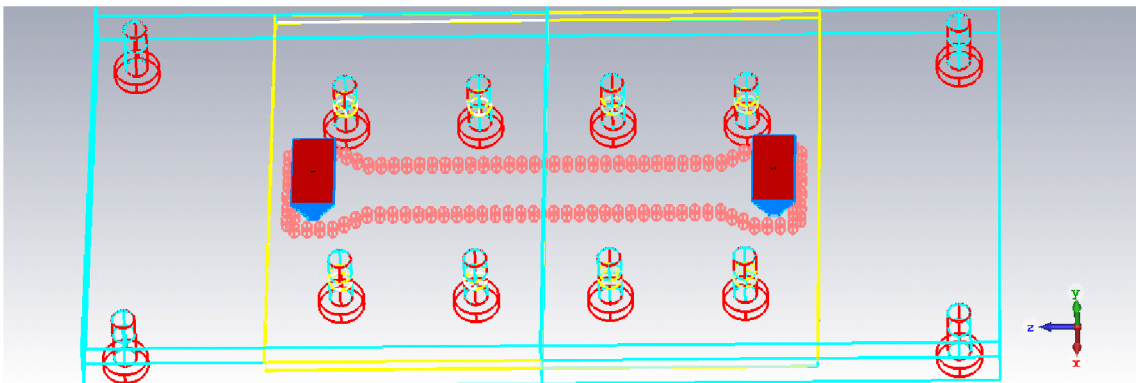
Tabulka 19 Složená sestava podélného přechodu

Složení dvou podélných přechodů	$S_{11} (TE_{10})$	$S_{21} (TE_{10})$	VSWR (TE_{10})
		-27,10507 dB	-0,1816 dB

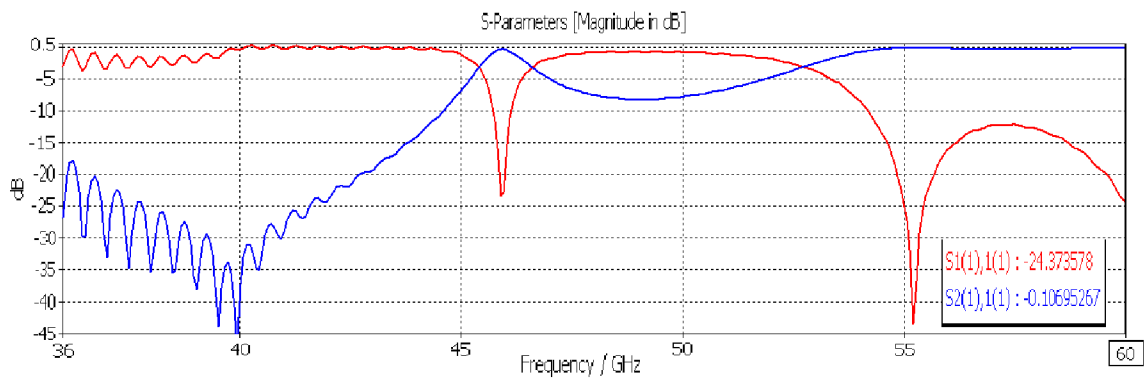
6.2 Příčný přechod



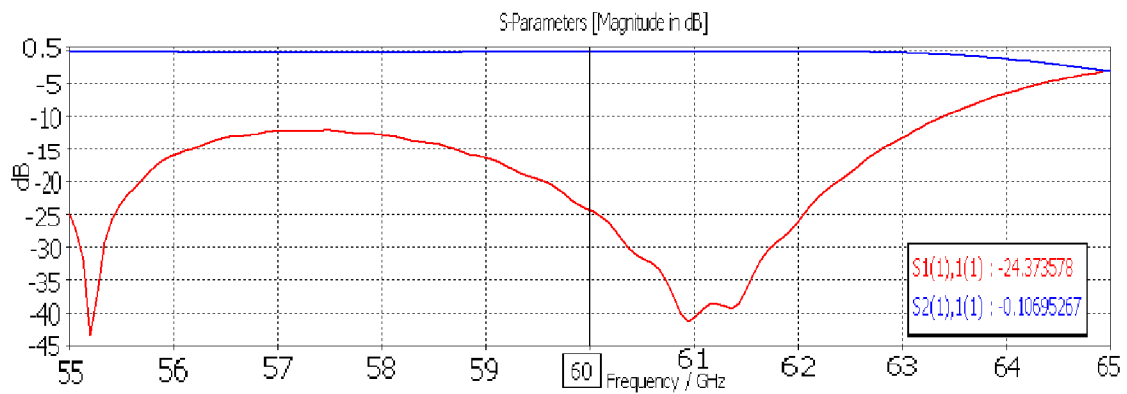
Obr. 6-4 Pohled na složenou strukturu dvou příčných přechodů



Obr. 6-5 Vnitřní pohled



Obr. 6-6 S-parametry složené sestavy příčného přechodu, vid TE_{10}



Obr. 6-7 Činitel odrazu a přenosu pro oblast pracovního kmitočtu, vid TE_{10}

Tabulka 20 Složená sestava příčného přechodu

Složení dvou příčných přechodů	S ₁₁ (TE_{10})	S ₂₁ (TE_{10})	VSWR (TE_{10})
	-24,3735 dB	-0,10695 dB	1,1287

ZÁVĚR

Návrh struktury klasického obdélníkového vlnovodu byl ulehčen díky existujícím normalizovaným rozměrům, které jsou rozděleny do jednotlivých skupin. Pro určitou pracovní frekvenci se poté určí frekvenční rozsah, ke kterému se přidělí normalizovaný rozměr vlnovodu. Našemu zadání nejlépe vyhovoval normalizovaný název WR-10, který je určen pro frekvence od 75 GHz až do 110 GHz a pro nižší frekvenci 60 GHz je použit normalizovaný název WR-15. Důležitými parametry pro obdélníkové vlnovody jsou kritický kmitočet (pro první a druhý vid) a vlnová délka vlny ve vlnovodu. U obdélníkových vlnovodů se vlna vlnovodem šíří až od frekvence vyšší, než je kritický kmitočet struktury. V našem případě je žádoucí pracovat v pásmu jednovidovosti, a proto je nutné sledovat kritickou frekvenci pro první a druhý nejnižší vid.

Z navrženého obdélníkového vlnovodu lze přepočítat ekvivalentní šířku pro strukturu SIWu. Při správné volbě parametrů s a d z odvozených podmínek lze dosáhnout poměrně přesného výsledného rozměru. Šířka SIWu byla vypočtena na hodnotu 2,01 mm pro pracovní frekvenci 94 GHz a 2,85 mm pro 60 GHz. Tyto rozměry se jevíly jako dobré, avšak během simulace se ještě lehce upravily o pár desetin milimetrů. Délka vlny v struktuře SIW λ_g je dlouhá 2,78 mm, což znamená, že vlna šířící se ve struktuře obdélníkového vlnovodu je o 1,32 mm delší na dané frekvenci oproti vlně šířící se strukturou SIW pro pracovní frekvenci 94 GHz.

Vlastnosti numerických modelů přechodů se nejlépe popíší pomocí S-parametrů. Pro rovinný přechod byla zvolena struktura přechodu založeného na bázi multisekčního Chebysheva transformátoru. Díky tomuto modelu bylo možné dosáhnout do výšky struktury obdélníkového vlnovodu pomocí schodovitěho přechodu. Neoptimálnější počet kroků přechodu se jevil do deseti. Pro rovinný přechod, na frekvenci 94 GHz, vyšel činitel odrazu - 20,60 dB a činitel přenosu - 0,149 dB pro dominantní vid. Pro frekvenci 60 GHz vyšel činitel odrazu - 18,29 dB a činitel přenosu - 0,181 dB pro dominantní vid. Reálnějších výsledků by bylo možné ještě dosáhnout zaoblením hran schodů přechodu, protože frézováním se nedocílí úplné ortogonality hran.

Pro přechod příčný se upravila struktura původního SIWu tak, že vstup z jedné strany substrátu se odstranil a místo něj se vytvořila třetí stěna prokovů. Na vrchní vodivou vrstvu SIWu se přesunula nová podoba vstupu, který byl vložen do hloubky vrstvy pokovení. Na nový tvar vstupu se následně připevnil klasický obdélníkový vlnovod. Pro frekvenci 60 GHz bylo nutné, mezi dvě struktury vlnovodů, vložit také schodovitou redukci, která se rozšíří do šířky normalizovaného rozměru WR-15. U ortogonálního přechodu, pro pracovní frekvenci 94 GHz, vyšel činitel odrazu - 15,37 dB a činitel přenosu - 0,346 dB pro dominantní vid. Pro pracovní frekvenci 60 GHz vyšel činitel odrazu - 24,27 dB a činitel přenosu - 0,032 dB pro dominantní vid. Je nutné podotknout, že podoby

přechodů pracujících na frekvenci 60 GHz bylo potřeba navrhnout ve výrobitelné formě a se ztrátovými materiály.

Z výsledků ze simulací lze konstatovat, že pro pracovní frekvenci 60 GHz dominantního vidu lépe vychází struktura přechodu příčného, která má o 0,145 lepší poměr maximální a minimální amplitudy při stojatém vlnění. Pro signál procházející příčným přechodem se ze vstupu nazpět odrazí pouze 0,37 % intenzity vlny a při průchodu rovinným přechodem se nazpět vrátí 1,48 % intenzity vlny. Rovinný přechod je o 9 mm geometricky rozměrnější, než je přechod příčný.

7. LITERATURA

- [1] LÁČÍK, Jaroslav. *Mikrovlnná technika*. (přednášky). Brno: Vysoké učení technické v Brně, [2019-12-15]
- [2] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: encyklopedická příručka*. Praha: BEN – technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-59-7.
- [3] BRADÁČ, Jindřich. *Satelitní technika populárně*. Praha: Grada, 1994. ISBN 80-85623-97-8.
- [4] BEVA přednáška [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lectures/BEVA_07.pdf
- [5] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení: Přednášky*. Vyd. 1. Brno: VUT v Brně, 2006. 133 s. ISBN 80-214-3301-9.
- [6] SEDLÁČEK, P. *Štěrbínová anténní řada na bázi vlnovodu integrovaného do substrátu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. 102 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Mikulášek.
- [7] ŠKODA, A. *Antény pro přenos energie podél střechy automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 52 s., 2 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. JAN VÉLIM.
- [8] Vlnovod a rezonátor, ČVUT [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: https://elmag.fel.cvut.cz/sites/default/files/users/pankrac/files/vlnovod_a_rezonator.pdf
- [9] HERMÁNY, R. *Lineárně polarizovaná štěrbinová anténa pracující v blízkosti lidského těla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 36 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Patrik Hubka.
- [10] AMBROS, M. *Analýza přechodů vedení v pásmech milimetrových vln*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2011. 55 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.
- [11] MARTINEC, M. *SIW štěrbinová anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2013. 48 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Kamil Pítra.
- [12] VYSKOČIL J. *Filtr na bázi vlnovodu integrovaného do substrátu*: diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně 2011. 49 s., 1 příloha.
- [13] Waveguide sizes [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/tech-resources/waveguides-sizes>

- [14] HOTOVEC, J. *Textilní mikrovlnné komponenty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 54 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Vašina.
- [15] Z. Kordiboroujeni and J. Bornemann, "Designing the Width of Substrate Integrated Waveguide Structures," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 518-520, Oct. 2013.
- [16] Cuclad 217LX [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: https://www.atechcircuit.com/images/Download/microwave_rf_pcb/Arlon_Microwave_Materials.pdf
- [17] Pérez, José Manuel Iglesias et al. "An inline microstrip-to-waveguide transition operating in the full W-Band based on a Chebyshev multisection transformer." 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) (2016): 1-4.
- [18] Normalized dimension RWG [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.atmmicrowave.com/tech-notes/rectangular-waveguide-information/>
- [19] Xu, Hang et al. "Design and application of the orthogonal feature of TE₁₀ mode and slotline mode in substrate integrated hybrid multichannel signaling systems." *2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)* 5 (2012): 1-4.
- [20] Pérez-Escudero, J.M.; Torres-García, A.E.; Gonzalo, R.; Ederra, I. A Simplified Design Inline Microstrip-to-Waveguide Transition. *Electronics* 2018, 7, 215.

Příloha 1 – Hodnoty z katalogového listu vybraného substrátu

Tabulka 21 Cuclad 217LX [16]

CuClad® Series

Cross-plyed woven fiberglass / PTFE laminates available in a range of Dk's (2.17 to 2.55) and loss (0.0009 to 0.0018). The sequential layers of fabric are cross-plyed to ensure in-plane isotropy for applications requiring matched electrical properties in the X-Y plane.

Product	Standard Thickness			Dielectric Constant	
	Inches	Millimeters	Tolerance (Inches)	Nominal	Tolerance
CuClad 250GX Master Sheet Size** 36"x48" (non-cross-plyed), 36"x36" (cross-plyed)	0.004	0.102	±0.0005	2.40	±0.10
	0.010	0.245	±0.0009	2.48, 2.55	±0.04
	0.015	0.381	±0.0015	2.44, 2.48, 2.55	±0.04
	0.020	0.508	±0.002	2.45, 2.48, 2.50, 2.55	±0.04
	0.030	0.762	±0.002	2.40, 2.45, 2.50, 2.55	±0.04
	0.031	0.787	±0.002	2.45, 2.50, 2.55	±0.04
	0.047	1.194	±0.002	2.50	±0.04
	0.060	1.524	±0.002	2.40, 2.45, 2.50, 2.55	±0.04
	0.062	1.575	±0.002	2.45, 2.50, 2.55	±0.04
	0.093	2.362	±0.002	2.48	±0.04
	0.120	3.048	±0.004	2.45, 2.50, 2.55	±0.04
0.125	3.175	±0.004	2.45, 2.50, 2.55	±0.04	
CuClad 250GT (Thickness listed includes copper cladding) Master Sheet Size** : 36"x48" (non-cross-plyed), 36"x36" (cross-plyed)	0.010	0.254	±0.001	2.50	±0.05
	0.015	0.381	±0.0015, ±0.002	2.50	±0.05
	0.020	0.508	±0.002	2.50	±0.05
	0.031	0.787	±0.002	2.50	±0.05
	0.047	1.194	±0.002	2.50	±0.05
	0.062	1.575	±0.003	2.50	±0.05
	0.094	2.388	±0.004	2.50	±0.05
	0.125	3.175	±0.005	2.50	±0.05
	0.187	4.750	±0.006	2.50	±0.05
0.250	6.350	±0.006	2.50	±0.05	
CuClad 233GY & 233LX Master Sheet Size** : GY - 36"x48" (non-cross plyed), 36"x36" (cross-plyed) LX - 34"x48" (non-cross plyed), 34"x36" (cross-plyed) (LX represents a premium grade with additional testing)	0.005	0.127	±0.0005	2.33	±0.04
	0.010	0.254	±0.001	2.33	±0.04
	0.015	0.381	0.0015	2.33	±0.02
	0.020	0.508	0.0015	2.33	±0.02
	0.031	0.787	0.002	2.33	±0.02
	0.045	1.143	0.002	2.33	±0.02
	0.062	1.575	0.002	2.33	±0.02
0.125	3.175	0.004	2.33	±0.02	
CuClad 217GY & 217LX Master Sheet Size** : GY - 36"x48" (non-cross plyed), 36"x36" (cross-plyed) LX - 34"x48" (non-cross plyed), 34"x36" (cross-plyed) (LX represents a premium grade with additional testing and certificate of analysis)	0.005	0.127	0.0005	2.17	±0.04
	0.010	0.254	0.001	2.17, 2.20	±0.04
	0.015	0.381	0.0015	2.17	±0.02
	0.020	0.508	0.002	2.17	±0.02
	0.025	0.635	0.002	2.17	±0.02
	0.031	0.787	0.002	2.17	±0.02
	0.040	1.016	0.002	2.17, 2.20	±0.02
	0.045	1.143	0.002	2.17	±0.02
	0.060	1.524	0.002	2.17	±0.02
	0.062	1.575	0.002	2.17	±0.02
0.125	3.175	0.004	2.17	±0.02	

Příloha 2 – Normalizovaný přehled typů vlnovodů

Tabulka 22 Normalizovaný přehled rozměrů obdélníkového vlnovodu [13]

Rectangular Waveguide Sizes

Waveguide name			Recommended frequency	Cutoff frequency lowest order mode	Cutoff frequency next mode	Inner dimensions of waveguide opening	
EIA	RC-SC *	IEC				A inch[mm]	B inch[mm]
WR2300	WG0.0	R3	0.32 to 0.45 GHz	0.257 GHz	0.513 GHz	23 [584.2]	11.5 [292.1]
WR2100	WG0	R4	0.35 to 0.50 GHz	0.281 GHz	0.562 GHz	21 [533.4]	10.5 [268.7]
WR1800	WG1	R5	0.45 to 0.63 GHz	0.328 GHz	0.656 GHz	18 [457.2]	9 [228.6]
WR1500	WG2	R6	0.50 to 0.75 GHz	0.393 GHz	0.787 GHz	15 [381]	7.5 [190.5]
WR1150	WG3	R8	0.63 to 0.97 GHz	0.513 GHz	1.026 GHz	11.5 [292.1]	5.75 [146.05]
WR975	WG4	R9	0.75 to 1.15 GHz	0.605 GHz	1.211 GHz	9.75 [247.65]	4.875 [123.825]

WR19	WG24	R500	40.00 to 60 GHz	31.391 GHz	62.782 GHz	0.188 [4.7752]	0.094 [2.3876]
WR15	WG25	R620	50.00 to 75 GHz	39.875 GHz	79.75 GHz	0.148 [3.7592]	0.074 [1.8796]
WR12	WG26	R740	60 to 90 GHz	48.373 GHz	96.746 GHz	0.122 [3.0988]	0.061 [1.5494]
WR10	WG27	R900	75 to 110 GHz	59.015 GHz	118.03 GHz	0.1 [2.54]	0.05 [1.27]
WR8	WG28	R1200	90 to 140 GHz	73.768 GHz	147.536 GHz	0.08 [2.032]	0.04 [1.016]
WR6	WG29	R1400	110 to 170 GHz	90.791 GHz	181.583 GHz	0.065 [1.651]	0.0325 [0.8255]