

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

TEXTILNÍ VLNOVOD

TEXTILE WAVEGUIDE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Pelikán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2017

Diplomová práce

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

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Michal Pelikán

ID: 146925

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Textilní vlnovod

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Využijte 3D textilní materiál jako substrát pro implementaci vlnovodu integrovaného do textilu. Aplikujte postupy vytváření kmitočtových filtrů v konvenčních dutých vlnovodech na návrh textilní pásmové propusti, jejíž pásmo propustnosti odpovídá 6. skupině kmitočtů UWB. Postup návrhu ověřte simulací v CST Microwave Studio.

Textilní vlnovod vyrobte z 3D pleteniny sítotiskem a prošíváním textilního substrátu vodivým vláknem. Výsledky měření textilního filtru porovnejte se simulací a s měřením referenčního filtru, vyrobeného ze substrátu ARLON CuClad 217.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] RAU, M., IFTEMIE, A., BALTAG, O., COSTANDACHE, D. The study of the electromagnetic shielding properties of a textile material with amorphous microwire, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2011, vol. 11, no. 1, p. 17-22.

[2] MATTHAEI, G., YOUNG, L., JONES, E.M.T. *Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures*, Norwood: Artech House, 1980, ISBN: 0-89006-099-1.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 16.5.2017

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultant:


prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na výrobu vlnovodového filtru. Práce je rozdělena do 8 kapitol. V práci je shrnuta teorie možných provedení vlnovodového filtru, použité materiály, jejich vliv a rizika při výrobě. Následně jsou popsány možné postupy realizace a vztahy nezbytné k návrhu filtru, jejich simulace i provedení v praxi. Na závěr jsou shrnuty, porovnány a popsány dosažené výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vlnovod, 3D textilie, pasivní prvky, koplanární vlnovod, síťotisk, UWB pásmo, band group 6, vlnovodový filtr, CST Microwave Studio.

ABSTRACT

Diploma thesis is focused on manufacturing process of waveguide filter. Thesis is divided to 8 chapters. There is summarized theory of possible execution of waveguide filter, used materials, their influence and risks during production. Then are described possible steps of realization and necessary relations for its design, simulation and also practical realization. At conclusion are summarized, compared and described reached results.

KEYWORDS

Waveguide, 3D textile, passive elements, coplanar waveguide, screen printing, band group 6, UWB band, waveguide filter, CST Microwave Studio.

PELIKÁN, M *Textilní vlnovod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2017. 39 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Zbyněk Raida.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Textilní vlnovod jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího magisterské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyňkovi Raidovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Vlnovody	2
1.1 Typy vlnovodů s pasivními prvky	2
1.1.1 Vertikální sloupky po stranách a uprostřed	2
1.1.2 Horizontální sloupky.....	2
1.1.3 Rezonanční okénko.....	3
1.1.4 Induktivní kolíky	3
1.1.5 Čtvercový nebo kruhový sloupek menší než výška vlnovodu.....	3
1.2 Aplikace pasivních prvků v modelu.....	4
1.3 Výběr typu pasivních prvků	5
2 Materiály a vlastnosti	5
2.1 Substrát.....	5
2.2 Pasivní prvky	6
2.3 Stěny filtru	6
2.3.1 Měděná fólie	6
2.3.2 Sítotisk.....	7
2.4 Buzení filtru1	7
2.5 Pracovní oblast filtru	8
2.5.1 Mezní frekvence vidů TE_{10} a TE_{20}	8
3 Návrh filtru podle webové kalkulačky	9
3.1 Simulace	10
3.2 Realizace vlnovodového filtru.....	11
4 Návrh filtru s koplanárním buzením v provedení na měděné fólii	13
4.1 Návrh filtru	13
4.2 Simulace vlnovodu s textilním substrátem a měděnou fólií	14
4.3 Realizace Vlnovodového filtru.....	15
5 Návrh filtru s koplanárním buzením v provedení sítotiskem	17

5.1	Výpočty a postup návrhu vlnovodu	17
5.2	Postup návrhu	17
5.3	Změna řádu filtru.....	26
5.4	Aplikace prokovů	29
6	Návrh filtru s koplanárním buzením v provedení na cucladu	30
6.1	Zpřesnění simulací	32
7	Porovnání filtrů v provedení na textilu a cucladu	33
7.1	Provedení na textilu s ručním prošitím	33
7.2	Provedení na textilu se strojovým prošitím	34
7.3	Provedení na CuCladu s prokovy	36
8	Závěr	38
	Literatura	40

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vertikální sloupky po stranách (vlevo), vertikální sloupek uprostřed (vpravo), (převzato z [1]).....	2
Obrázek 2: Horizontální sloupky (převzato z [1]).....	3
Obrázek 3: Kapacitní okénko (převzato z [2]).....	3
Obrázek 4: Induktivní kolíky ve více provedení (převzato z [2]).....	3
Obrázek 5: Čtvercový sloupek menší než výška vlnovodu (převzato z [1]).....	4
Obrázek 6: Kruhový sloupek menší než výška vlnovodu (převzato z [2]).....	4
Obrázek 7: Symetrické uspořádání sloupků (převzato z [1]).....	4
Obrázek 8: Nesymetrické uspořádání sloupků (převzato z [1]).....	4
Obrázek 9: Symetrické uspořádání induktivních kolíků (převzato z [1]).....	5
Obrázek 10: Bílý textil vlevo, modrý textil vpravo.....	6
Obrázek 11: Mikropáskové buzení s konektorem SMA.....	7
Obrázek 12: Koplánární buzení s konektorem SMA.....	8
Obrázek 13: Parametry vlnovodového filtru s napájecím mikropáskem a konektory.....	9
Obrázek 14: Činitel odrazu S11 simulovaného modelu vlnovodu s napájecím páskem a konektory.....	10
Obrázek 15: Činitel přenosu S21 simulovaného modelu vlnovodu s napájecím páskem a konektory.....	10
Obrázek 16: Vyrobený vlnovodový filtr.....	11
Obrázek 17: Činitel odrazu na vstupu S11 vyrobeného filtru.....	11
Obrázek 18: Činitel přenosu S21 vyrobeného filtru.....	12
Obrázek 19: Činitel odrazu na výstupu S22 vyrobeného filtru.....	12
Obrázek 20: Model vlnovodového filtru.....	13
Obrázek 21: Činitel přenosu a odrazu filtru podle výpočtů.....	14
Obrázek 22: Činitel přenosu a odrazu filtru po optimalizaci.....	15
Obrázek 23: Vyrobený filtr s koplánárním buzením s textilním substrátem a měděnou folií.....	15
Obrázek 24: Činitel odrazu na výstupu S11 vyrobeného filtru.....	16
Obrázek 25: Činitel přenosu S21 vyrobeného filtru.....	16
Obrázek 26: Náhradní schéma vlnovodového filtru tvořeného inverzními imitančními prvky K a reaktancemi X včetně zvstupní a výstupní impedance, převzato [9].....	18
Obrázek 27: Náhradní schéma znázorňující reaktance X a prvky θ převzato z [10].....	20

Obrázek 28: Graf závislosti reaktance na poměru vzdálenosti mezi sloupky a šířce vlnovodu, převzato z [11]	21
Obrázek 29: Model filtru s textilním substrátem 5. řádu.....	23
Obrázek 30: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot podle výpočtu, bez úprav	24
Obrázek 31: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci a toleranční analýze šířka pásma 500 MHz	25
Obrázek 32: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci, šířka pásma 1000 MHz.....	25
Obrázek 33: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci, šířka pásma 1200 MHz.....	26
Obrázek 34: Model filtru s textilním substrátem 3. řádu.....	26
Obrázek 35: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot podle výpočtu filtru 3. řádu s textilním substrátem	27
Obrázek 36: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci a toleranční analýze šířka pásma 500 MHz	28
Obrázek 37: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot bez úprav, šířka pásma 1000 MHz	28
Obrázek 38: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot bez úprav, šířka pásma 1200 MHz	29
Obrázek 39: Model s prokovy filtru 3. řádu s textilním substrátem	29
Obrázek 40: Výsledný činitel přenosu a odrazu, po aplikaci prokovů do modelu filtru 3. řádu s textilním substrátem	30
Obrázek 41: Model filtru na substrátu CuClad.....	30
Obrázek 42: Výsledek simulace vypočítaných hodnot filtru na substrátu CuClad	31
Obrázek 43: Model filtru na substrátu CuClad s prokovy	32
Obrázek 44: Výsledek simulace filtru na substrátu CuClad s prokovy	32
Obrázek 45: Vlnododový filtr ručně prošíváný	33
Obrázek 46: Změřené činitele odrazu ručně šitého filtru	34
Obrázek 47: Změřené činitele přenosu ručně šitého filtru	34
Obrázek 48: Strojově prošíváný vlnododový filtr upnutý v měřicím přípravku	35
Obrázek 49: Změřené činitele odrazu strojově šitého filtru	35
Obrázek 50: Změřené činitele přenosu strojově šitého filtru.....	36
Obrázek 51 Vlnododový filtr v provedení na CuCladu s konektory SMA.....	36
Obrázek 52: Změřené činitele odrazu filtru na substrátu CuClad	37
Obrázek 53: Změřené činitele přenosu filtru na substrátu CuClad	37

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Frekvenční pásma band group 6	8
Tabulka 2: Vypočítané parametry napájecího mikropásku	9
Tabulka 3: Parametry vlnovodového filtru	9
Tabulka 4: Parametry a vypočítané rozměry filtru s textilem a měděnou folií	13
Tabulka 5: Rozměry optimalizovaného filtru s textilem a měděnou folií	14
Tabulka 6: Parametry prvků NDP pro zvolené zvlnění	17
Tabulka 7: Výpis vypočítaných inverzních imitací K	19
Tabulka 8: Vypočítané hodnoty reaktancí X	20
Tabulka 9: Hodnoty reaktancí vynásobených poměrem vlnové délky k šířce vlnovodu	22
Tabulka 10: Hodnoty poměru d/a a rozteč protějších sloupků	22
Tabulka 11: Prvky θ a hodnoty rozteče mezi sloupky 1	23
Tabulka 12: Parametry a vypočítané rozměry filtru 5. řádu s textilním substrátem	23
Tabulka 13: Rozměry filtru s textilním substrátem po analýzách	24
Tabulka 14: Parametry a vypočítané rozměry filtru 3. řádu s textilním substrátem	27
Tabulka 15: Zaokrouhlené rozměry po analýzách filtru 3. řádu s textilním substrátem	28
Tabulka 16: Vstupní parametry a vypočítané rozměry filtru se substrátem CuClad	31
Tabulka 17: Zaokrouhlené rozměry po analýzách filtru se substrátem CuClad	31

ÚVOD

Se vzrůstajícím množstvím technologií v osobních automobilech vzrůstá i množství kabelových spojů ve vozidle, které mohou dosahovat délky až několika kilometrů. S tím je spjata náročná detekce, oprava poruch a vyšší hmotnost vozidla. Vhodným řešením je nahradit část kabeláže bezdrátovou komunikací uvnitř vozidla.

Vlnovod je určen pro přenos elektromagnetických vln podle zvoleného kmitočtu od toho se odvíjí rozměry zvoleného vlnovodu. Využitím povrchu karoserie lze soustředit návrh a výrobu zejména na typ paralel plate vlnovod. Pro ladění vlnovodu jsou zvoleny pasivní prvky, které budou prošity skrze vlnovod, který následně bude fungovat jako filtr.

Substrátem vlnovodu je 3D textilie, s předem známými parametry, prošitá kovovou nití. Prošití zde představuje zvolené pasivní prvky vlnovodu. Pracovní oblastí vlnovodového filtru je v UWB (Ultra Wideband) pásmu s mezním kmitočtem 8 GHz.

Kombinací lehké textilie, nitě a tenkého vodivého kovu nebo potisku na povrchu substrátu filtru, je zajištěna nízká hmotnost a při dodržení parametrů i efektivita filtrace signálu. Díky tomu je možné převést část kabelové komunikace na bezdrátovou a zajistit tak odlehčení vozidla.

1 VLNOVODY

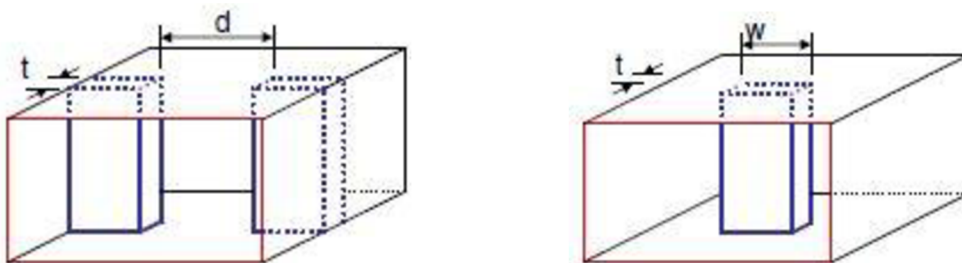
Struktury určené k přenosu elektromagnetických vln. Pracovní frekvence vlnodů je v oblasti mikrovlnných kmitočtových pásem a podle toho se volí rozměry vlnodů. Projekt je zaměřen na vlnodů obdélíkového průřezu. Ladění vlnodů je možné provádět různými pasivními prvky a díky tomu tak vytvořit specifický vlnodový filtr s laděnými pasivními prvky.

1.1 Typy vlnodů s pasivními prvky

Vhodná volba typu pasivních prvků určuje možnosti realizace a zároveň i její složitost. Každý z níže zmíněných vlnodů se vyznačuje specifickými vlastnostmi. Kritériem pro naši aplikaci bude snadná výroba. Zaměřili jsme se pouze na pasivní prvky ve vlnodů obdélíkového průřezu.

1.1.1 Vertikální sloupky po stranách a uprostřed

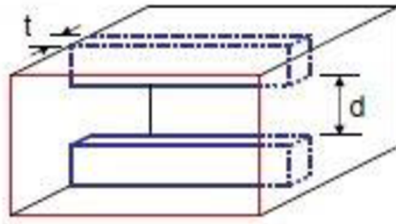
Pro vertikální sloupky po stranách se používá označení, induktivní clona, jak je patrné na obrázku 1, jsou specifikovány svojí tloušťkou sloupku t , vzdáleností sloupků od sebe d , a případně šířkou sloupku w .



Obrázek 1: Vertikální sloupky po stranách (vlevo), vertikální sloupek uprostřed (vpravo), (převzato z [1])

1.1.2 Horizontální sloupky

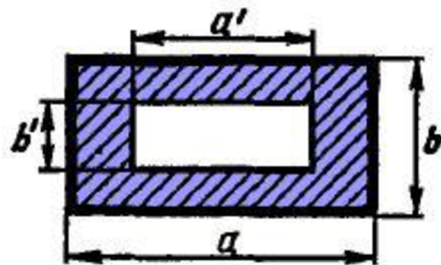
Horizontální sloupky jsou také označovány jako kapacitní clona, příklad je zobrazen v obrázku 2, důležitá je tloušťka sloupku t a jejich vzdálenost od sebe d .



Obrázek 2: Horizontální sloupky (převzato z [1])

1.1.3 Rezonanční okénko

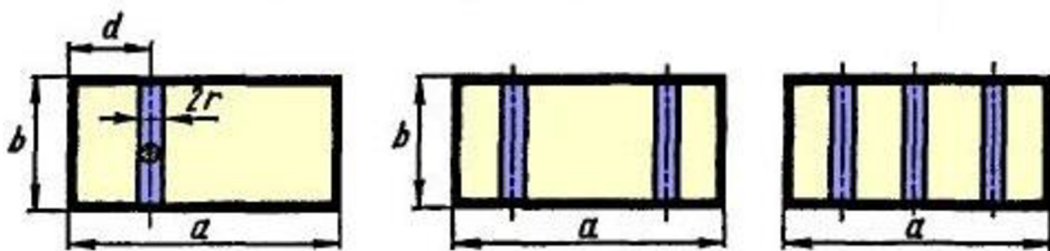
Rezonanční okénko je závislé na rozměrech samotného okénka a rozměrech vlnovodu, jak je patrné z obrázku 3, vytváří zúžení vnitřního průřezu vlnovodu.



Obrázek 3: Kapacitní okénko (převzato z [2])

1.1.4 Induktivní kolíky

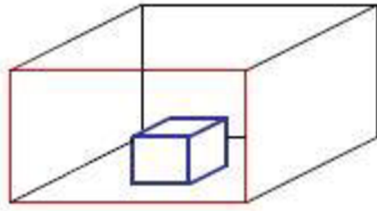
Vodivě propojují širší stěny vlnovodu a existuje několik způsobů provedení, viz obrázek 4.



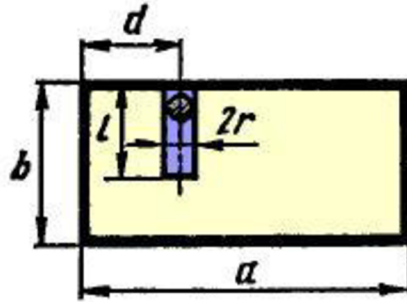
Obrázek 4: Induktivní kolíky ve více provedení (převzato z [2])

1.1.5 Čtvercový nebo kruhový sloupek menší než výška vlnovodu

Kruhový sloupek menší než výška vlnovodu se také nazývá kapacitní kolík, příklady těchto pasivních prvků jsou na obrázcích 5 a 6.



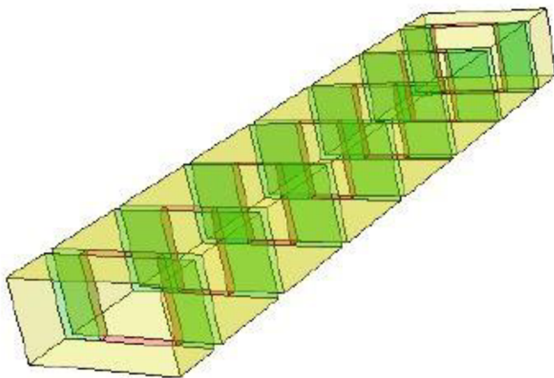
Obrázek 5: Čtvercový sloupek menší než výška vlnovodu (převzato z [1])



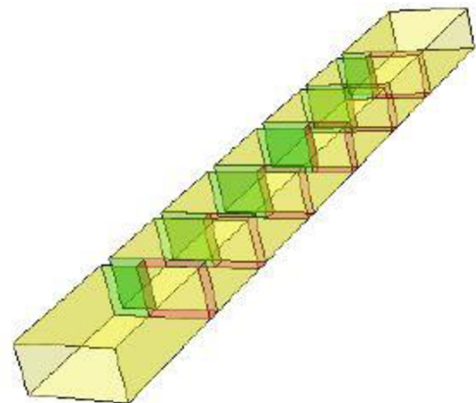
Obrázek 6: Kruhový sloupek menší než výška vlnovodu (převzato z [2])

1.2 Aplikace pasivních prvků v modelu

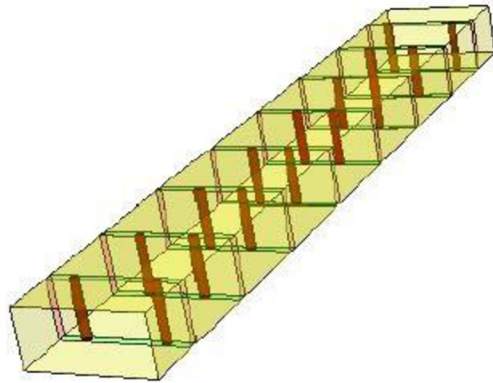
Na modelech níže jsou přímé realizace vlnodových filtrů s pasivními prvky. V těchto vlnovodech se kombinují pasivní prvky v řadách za sebou v pevně stanoveném rozestupu a délce, tím je možné vytvořit filtr typu pásmová propust. Lze využít vertikálních sloupků se symetrickým uspořádáním, obrázek 7, nesymetrickým uspořádáním, obrázek 8, nebo symetrický uspořádání induktivních kolíků obrázek 9.



Obrázek 7: Symetrické uspořádání sloupků (převzato z [1])



Obrázek 8: Nesymetrické uspořádání sloupků (převzato z [1])



Obrázek 9: Symetrické uspořádání induktivních kolíků (převzato z [1])

1.3 Výběr typu pasivních prvků

Pro simulaci a výrobu byly vybrány pasivní prvky tvořené symetrickými induktivními sloupky po stranách vlnovodu, tedy symetrické uspořádání sloupek bylo vybráno jako nejvhodnější řešení. Příklady této realizace jsou na obrázcích 1 vlevo a 7. Ostatní zmíněné pasivní prvky by byly obtížné na výrobu, nebo by nebylo možné dodržet příčnou přesnost a kvalitu výroby filtru. Jako vhodný typ filtru byla zvolena pásmová propust.

2 MATERIÁLY A VLASTNOSTI

2.1 Substrát

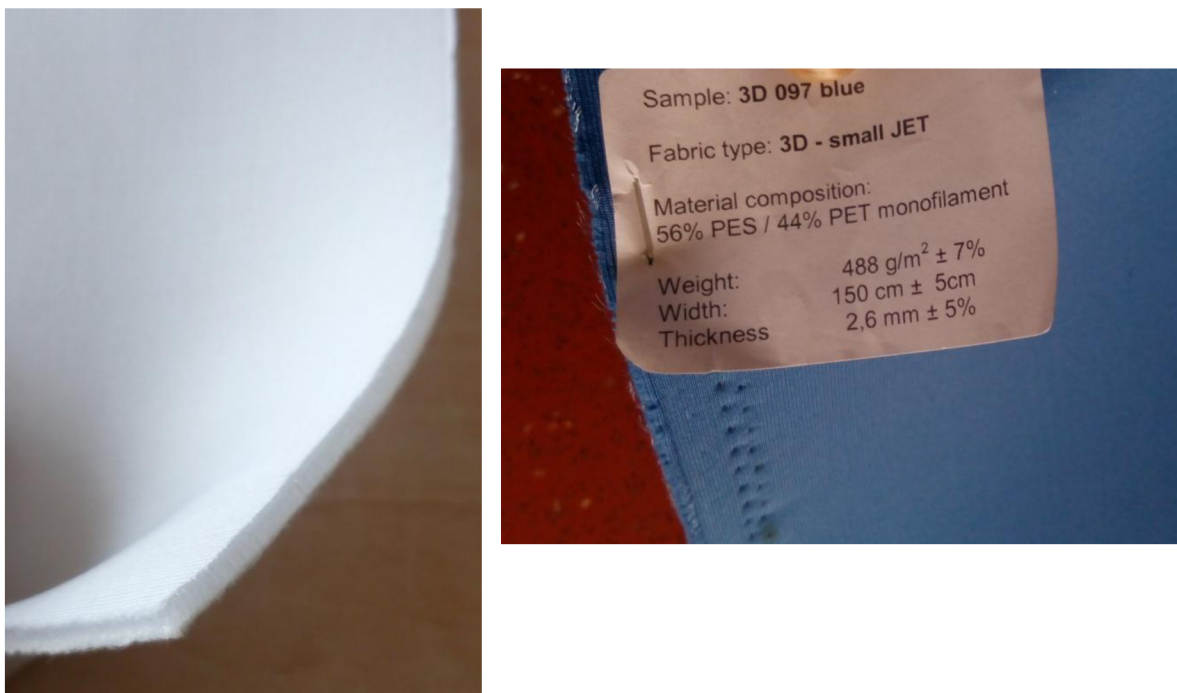
Jako substrát byla zvolena 3D textilie, primárně určená jako jedna z vrstev matrací. Dalším materiálem je CuClad 217 mikrovlnný substrát.

Bílá 3D textilie na obrázku 10 je tvořena z 80 % polyesterem (PES) a 20 % bavlnou, převzato z [3]. Výška textilu $b = 4$ mm, relativní permitivita $\epsilon_r = 1,2 \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$.

Modrá 3D textilie na obrázku 10 je tvořena 56 % polyesterem (PES) a 44 % polyetylentetraftalátem (PET), Výška textilu $b = 2,6$ mm, relativní permitivita $\epsilon_r = 1,4 \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$.

Tento materiál se pro tuto aplikaci hodí z několika důvodů: je flexibilní, levný v porovnání s běžnými mikrovlnnými materiály, dostupný a velmi lehký.

CuClad 217 s výškou $b = 1,54$ mm a relativní permitivita $\epsilon_r = 2,17 \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$. Je běžně používaný substrát využívaný pro různé anténní struktury.



Obrázek 10: Bílý textil vlevo, modrý textil vpravo

2.2 Pasivní prvky

Pasivní prvky jsou provedeny z vodivé nitě složené z polyesterového vlákna a stříbrných vláken, tento typ nitě byl využit pouze při ručním šití, použita je nit od firmy Shieldex [5]. Při strojovém šití byl použit vyšivací stroj Bernina 880, s rychlostí 150 stehů za minutu a vodivá nit s obchodním označením 117/17 2-Ply HC+B od firmy Shieldex.

V simulacích vlnovodu jsou pasivní prvky nahrazeny vodivými stěnami o tloušťce 1 mm, po dokončení simulací s požadovanými výsledky jsou stěny nahrazeny hustě řazenými prokovy, které simulují prošití nití. Prokovy mají průměr 0,8 mm a jsou vzdáleny od svých středů 2 mm.

2.3 Stěny filtru

Výrobu horní a spodní stěny provedeme dvěma způsoby. Měděnou nalepovací fólií nebo sítotiskem, v obou případech jsme v simulacích uvažovali tloušťku povrchu jako parametr $t_v = 0,01$ mm.

2.3.1 Měděná fólie

Horní a spodní stěna filtru bude tvořena přilepenou měděnou fólií, která bude vyrobena do požadovaných rozměrů. Rizikem při aplikaci fólie je špatné sesazení horní a spodní vrstvi, zkroucení během manipulace a paměťový efekt kovu mohou změnit parametry napájecí části. Tento způsob provedení stěn filtru byl aplikován v kapitole 3 a 4.

2.3.2 Sítotisk

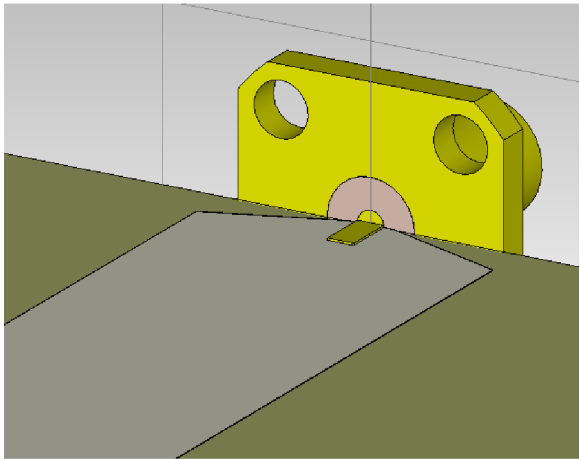
Horní a spodní stěna filtru bude tvořena vodivou pastou aplikovanou na nažehlenou fólii na substrátu filtru. Tato aplikace předchází vytvoření filmu s návrhem filtru, podle kterého se vyrobí motiv na sítu. Síto musí mít na sobě aplikovanou světlocitlivou emulzi, která je následně osvětlena přes fotomatici ultrafialovým světlem. Po osvětlení se emulze v sítu vytvrdí a po opláchnutí pozůstatků emulze lze síto přímo použít jako sítotiskovou šablonu.

Zmíněný způsob výroby pomocí sítotisku zajišťuje značnou přesnost výroby, dále umožňuje snadnou manipulaci s výrobkem bez trvalé deformace povrchů, jak je tomu v případě výroby horní a spodní stěny pomocí vyleptané lepící měděné fólie, deformace a možná poškození jsou patrné z obrázku 17. Výroba touto metodou je limitována, v případě fólie na 170 x 170 mm. Síta jsou k dispozici ve 2 velikostech, a to 140 x 110 mm a 195 x 110 mm.

Rizikem při tomto výrobním procesu je zvlnění povrchové folie na substrátu, které znemožní tak nanesení motivu, špatné sesazení spodního a horního motivu, nečistota při výrobě síta, špatná manipulace s nevytvrzeným motivem po nanesení.

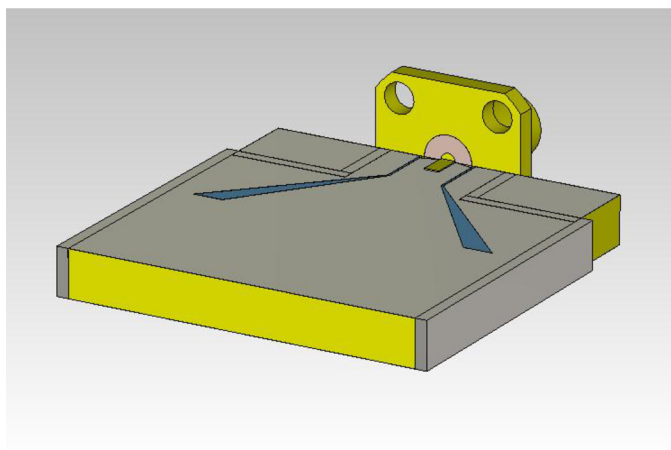
2.4 Buzení filtru1

Jednou z možností je buzení pomocí mikropáskového vedení, obrázek 11, vypočítaného dle online kalkulačky [6], rozměry jsou v tabulce 2. Při tomto způsobu buzení dochází ke ztrátám v podobě vyzařování do prostoru.



Obrázek 11: Mikropáskové buzení s konektorem SMA

Jako další možnost buzení je GCPW (Grounded Coplanar Waveguide), převzato z [7], obrázek 12. Při přenosu nedochází k takovým ztrátám v podobě vyzařování do prostoru, jako dochází v případě buzení pomocí mikropáskového vedení. Realizovaný model je na obrázku 13.



Obrázek 12: Koplanární buzení s konektorem SMA

2.5 Pracovní oblast filtru

Přenos signálů bude v pásmu UWB v oblasti band group 6, tabulka 1 převzata z [8], tato oblast obsahuje pásma 9, 10 a 11. Oblast band group 6 zahrnuje kmitočty od 7,392 GHz do 8,976 GHz, to představuje celkovou šířku oblasti 1,584 GHz, na jedno pásmo připadá šířka 0,528 GHz. Pro naši aplikaci byl zvolen střední kmitočet filtru 8 GHz.

Tabulka 1: Frekvenční pásma band group 6

Pásmo	Dolní frekvence [GHz]	Střední frekvence [GHz]	Horní frekvence [GHz]
9	7,392	7,656	7,920
10	7,920	8,184	8,448
11	8,448	8,712	8,976

2.5.1 Mezní frekvence vidů TE_{10} a TE_{20}

Mezní frekvence udává minimální frekvenci, od které se začíná energie šířit vlnovodem. Tato frekvence je závislá na vidovém čísle zvoleného vidu.

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

Kde c je rychlost světla, ε_r relativní permitivita prostředí (substrátu), μ je permeabilita prostředí ($\mu = 1$), m a n jsou vidová čísla, a je šířka vlnovodu v příčném řezu, b je výška vlnovodu v příčném řezu.

Po dosazení parametrů substrátu, rozměrů vlnovodu a vidových čísel pro

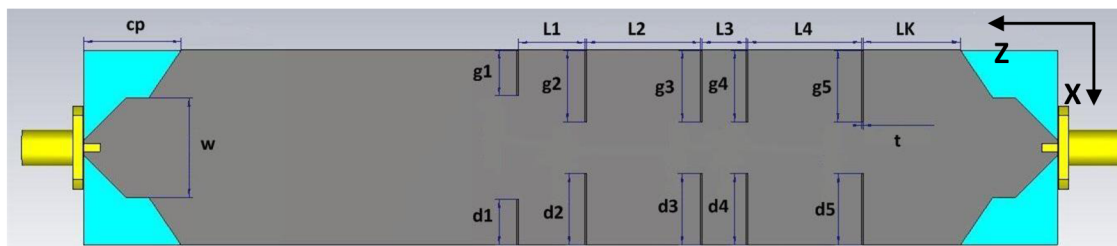
dominantní vid TE_{10} , dostaneme kritický kmitočet vypočtený ze vztahu (1). Pro námi zvolený dominantní vid TE_{10} odpovídá mezní kmitočet $f_{mTE_{10}} \approx 4,3829$ GHz. Vzhledem k uvažovanému střednímu kmitočtu $f_0 = 8$ GHz bude možné provozovat filtr ve zvolené oblasti. Po aplikaci vzorce pro parametry vidu TE_{20} , zjišťujeme, že mezní kmitočet tohoto vidu je $f_{mTE_{20}} \approx 8,7659$ GHz, z toho vyplývá, že filtr nebude ovlivněn videm TE_{20} .

3 NÁVRH FILTRU PODLE WEBOVÉ KALKULAČKY

Pomocí kalkulátoru z webových stránek, převzato [4], byl navržen vlnodový filtr, návrh se zaměřoval na délku jednotlivých pasivních prvků ve vlnovodu a jejich vzájemnou vzdálenost, budící mikropásek byl navržen podle online kalkulačky [5], rozměry jsou v tabulce 2. Návrh je symetrický podle osy Z, což je patrné z modelu na obrázku 13.

Tabulka 2: Vypočítané parametry napájecího mikropásku

Popis rozměru	Parametrický zápis	Velikost rozměru [mm]
Šířka mikropásku	w [mm]	15,3
Délka mikropásku	cp [mm]	15



Obrázek 13: Parametry vlnodového filtru s napájecím mikropáskem a konektory

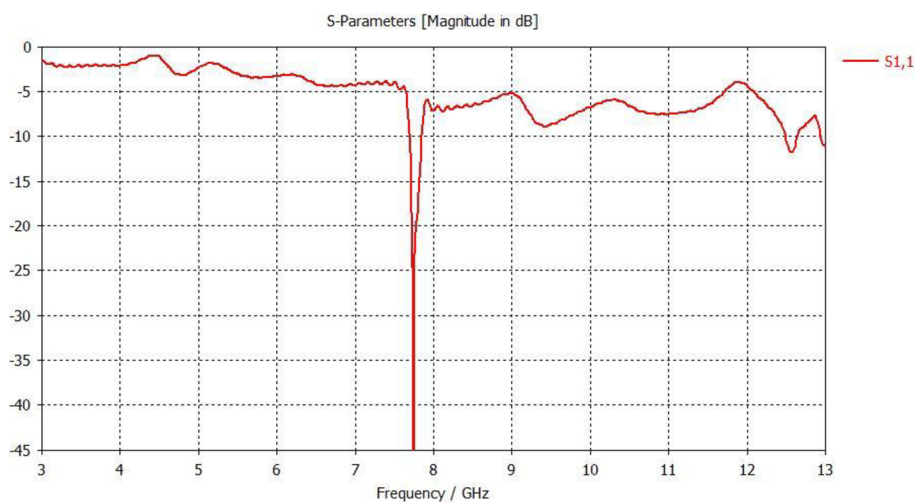
Tabulka 3: Parametry vlnodového filtru

Parametr vlnovodu	Hodnota parametru [mm]
a	30
b	4
c	150
$g1 = d1$	7
$g2 = d2$	11
$g3 = d3$	11
$g4 = d4$	11
$g5 = d5$	11
L1	10,25
L2	17,5

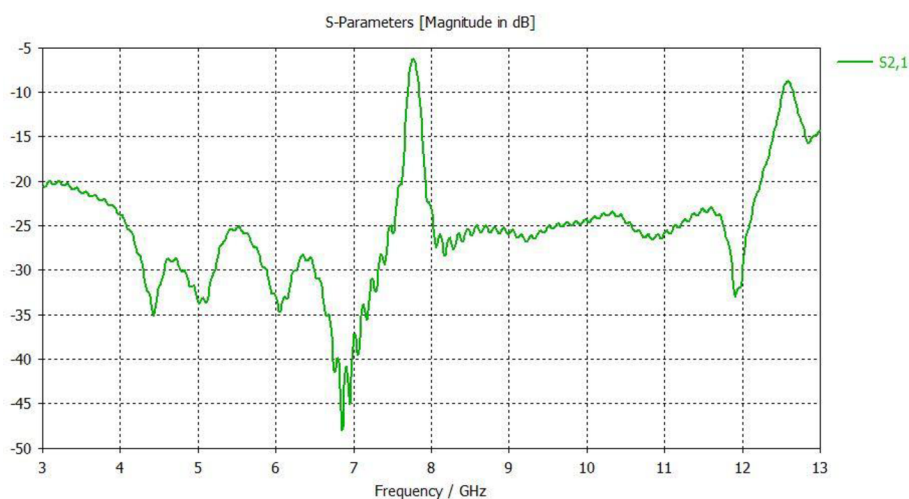
Parametr vlnovodu	Hodnota parametru [mm]
L3	6,75
L4	17,5
LK	15
t	0,25

3.1 Simulace

Z průběhů činitele odrazu a přenosu z obrázků 14 a 15 je patrný vliv vyzařování napájecího mikropásku do prostoru a současně značně úzkopásmový návrh.



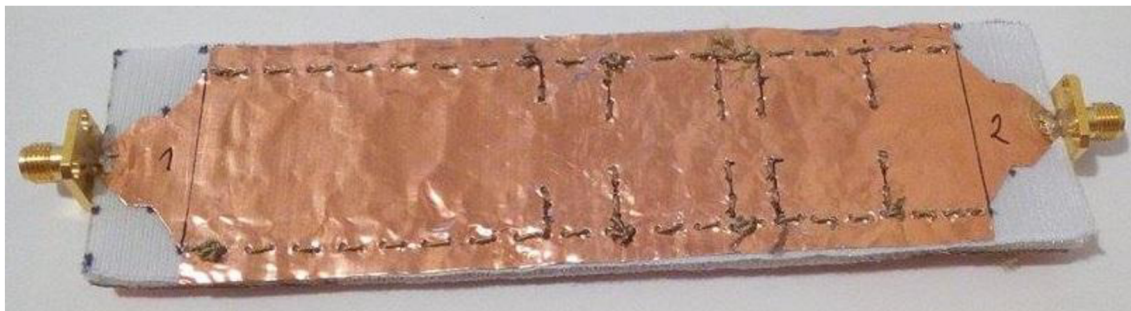
Obrázek 14: Činitel odrazu S₁₁ simulovaného modelu vlnovodu s napájecím páskem a konektory



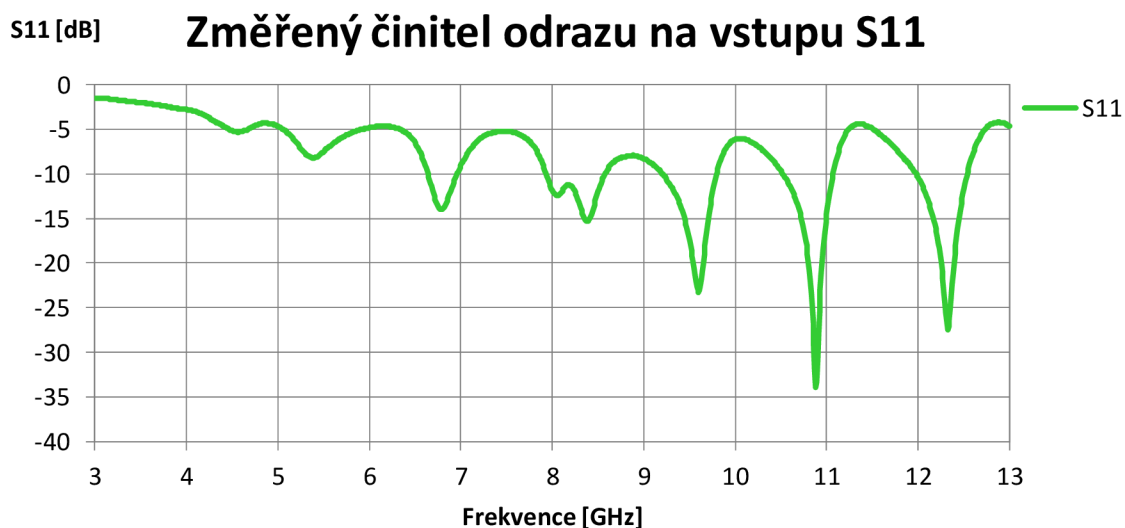
Obrázek 15: Činitel přenosu S₂₁ simulovaného modelu vlnovodu s napájecím páskem a konektory

3.2 Realizace vlnodového filtru

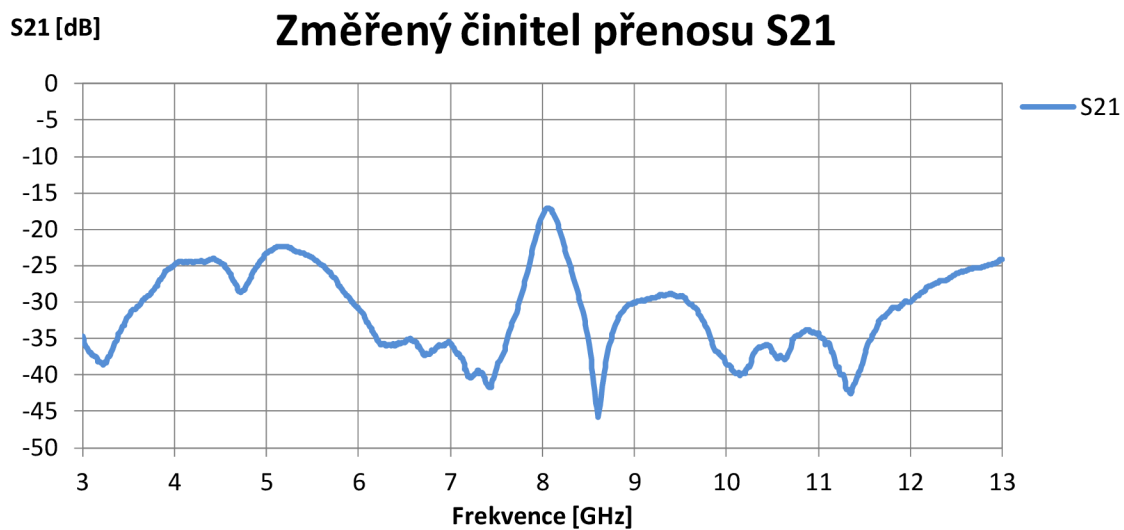
S využitím výše popsaných materiálů v kapitole 2, byl zhotoven vlnodový filtr typu pásmová propust. Rozložení pasivních prvků bylo provedeno na základě simulovaného modelu, na obrázku 13 na vlnod byl připájeny 2 pozlacené SMA konektory. Zhotovený vlnod je na obrázku 16. Změřené činitele odrazu na vstupu a výstupu jsou na obrázcích 17 a 19, činitel přenosu je na obrázku 18.



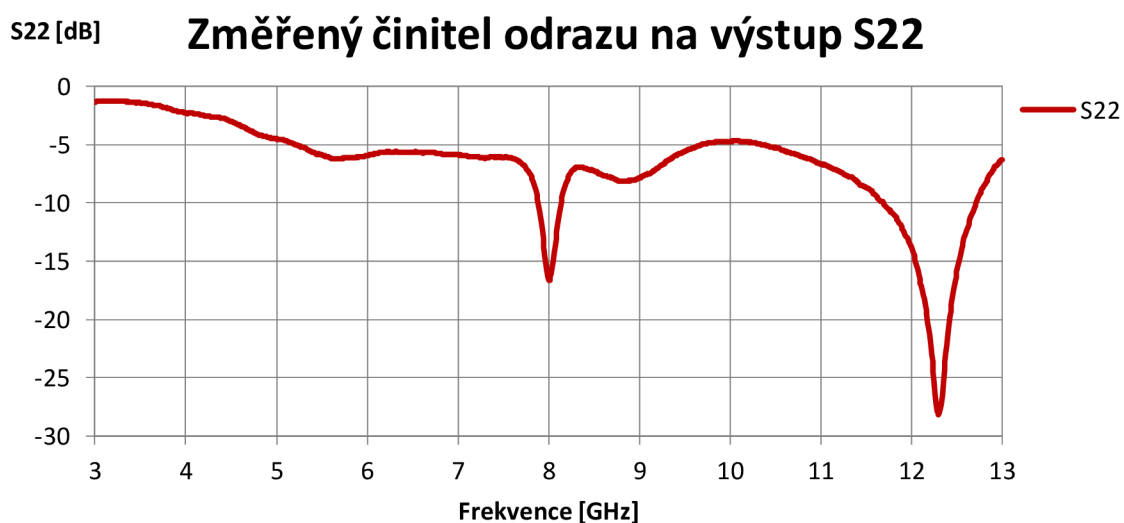
Obrázek 16: Vyrobený vlnodový filtr



Obrázek 17: Činitel odrazu na vstupu S11 vyrobeného filtru



Obrázek 18: Činitel přenosu S21 vyrobeného filtru

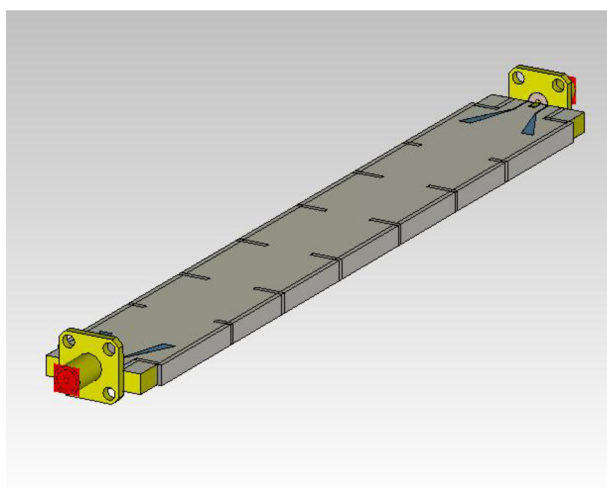


Obrázek 19: Činitel odrazu na výstupu S22 vyrobeného filtru

4 NÁVRH FILTRU S KOPLANÁRNÍM BUZENÍM V PROVEDENÍ NA MĚDĚNÉ FÓLII

4.1 Návrh filtru

Tento návrh filtru byl vypočítán podle převzatých vzorců z kapitoly 5 a filtr je 5. řádu. Buzení je realizováno pomocí GCPW, vlnovod má v tomto případě šířku $a = 20$ mm a výšku $b = 4$ mm. Výsledný model byl simulován a dosažené výsledky jsou na obrázku 21, parametry a rozměry vlnovodu jsou v tabulce. Po té byla provedena optimalizace, dosažené výsledky jsou na obrázku 23.



Obrázek 20: Model vlnodového filtru

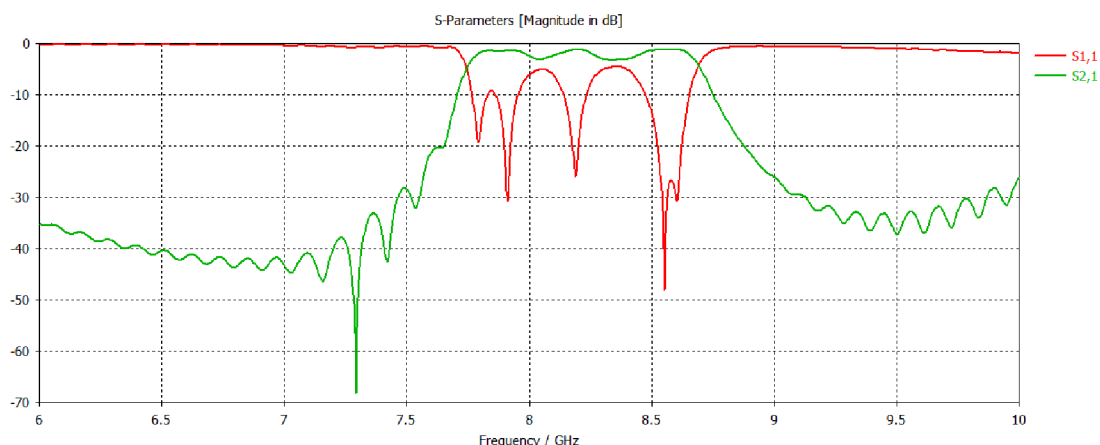
Tabulka 4: Parametry a vypočítané rozměry filtru s textilem a měděnou fólií

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Šířka vlnovodu	a	20 mm
Výška vlnovodu	b	4 mm
Dolní frekvence	f_1	7,542 GHz
Horní frekvence	f_2	8,6 GHz
Střední frekvence	f_0	8 GHz
Relativní permitivita substrátu	ϵ_r	$1,4 \text{ Fm}^{-1}$
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	13 mm

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_6$	6,85 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_5$	5,5 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_3 = d_4$	4,9 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	17,4677 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	19,7989 mm
Rozestup mezi sloupky	l_3	20,5535 mm

4.2 Simulace vlnovodu s textilním substrátem a měděnou fólií

Na obrázku 21 jsou dosažené výsledky simulace vypočítaných rozměrů filtru. To lze porovnat s optimalizovaným výsledkem simulací z obrázku 22. V tabulce 5 jsou rozměry filtru po optimalizaci

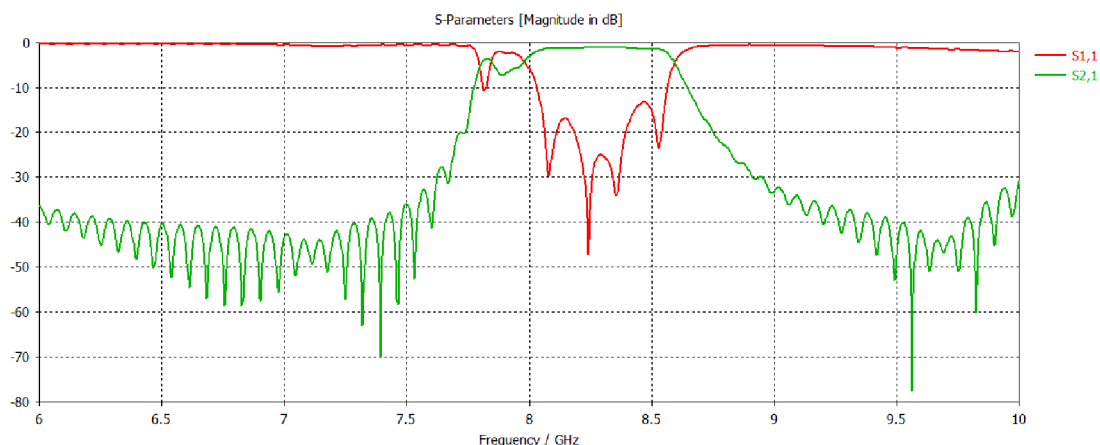


Obrázek 21. Činitel přenosu a odrazu filtru podle výpočtů

Tabulka 5: Rozměry optimalizovaného filtru s textilem a měděnou fólií

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	13 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_6$	6,85 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_5$	5,5 mm

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_3 = d_4$	4,9 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	17,4677 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	19,7989 mm
Rozestup mezi sloupky	l_3	20,5535 mm



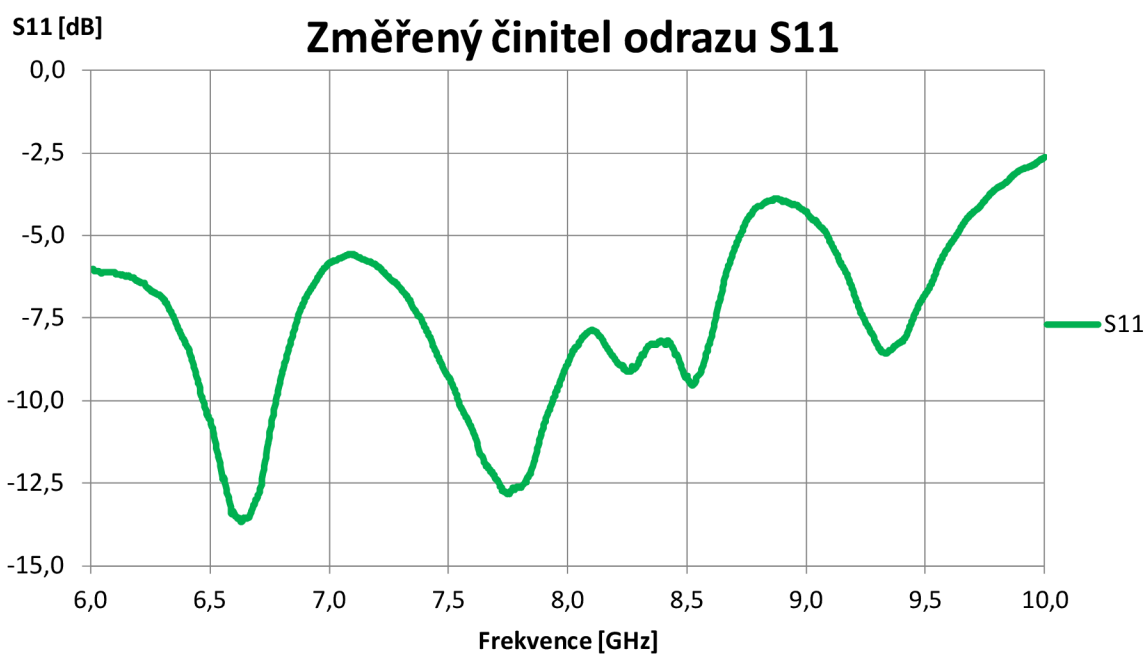
Obrázek 22: Činitel přenosu a odrazu filtru po optimalizaci

4.3 Realizace Vlnodového filtru

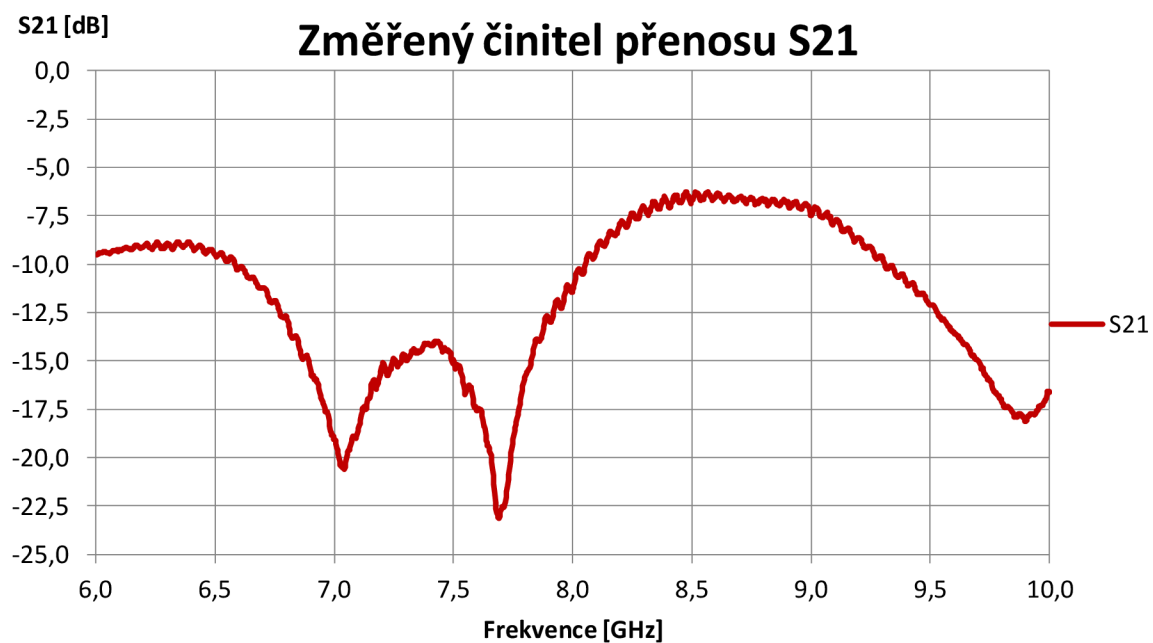
Model byl doplněn prokovy nahrazující plné stěny a tyto rozměry včetně rozměrů vlnovodu byly vyexportovány pro výrobu. Data byla využita pro vyleptání motivu do měděné folie, která byla nalepena na substrát a motiv sesazen. Následně bylo provedeno ruční prošíání a připájení SMA konektorů. Vyrobený filtr je na obrázku 23 a naměřené parametry jsou na obrázcích 24 a 25.



Obrázek 23: Vyrobený filtr s koplanárním buzením s textilním substrátem a měděnou folií



Obrázek 24: Činitel odrazu na výstupu S11 vyrobeného filtru



Obrázek 25: Činitel přenosu S21 vyrobeného filtru

5 NÁVRH FILTRU S KOPLANÁRNÍM BUZENÍM V PROVEDENÍ SÍTOTISKEM

5.1 Výpočty a postup návrhu vlnovodu

Vlnovod je navrhován a simulován v programovém prostředí CST Microwave Studio.

Hlavním parametrem vlnovodu je zadaná Čebyševova aproximace 5. řádu, střední kmitočet $f_0 = 8$ GHz, šířka pásma filtru $BW = 500$ MHz, výška substrátu $h = 2,6$ mm, relativní permitivita $\epsilon_r = 1,2$ F·m⁻¹.

Ostatní rozměry byly zvoleny: šířka vlnovodu $a = 30$ mm, výška vlnovodu $b = 2,6$ mm, rozteč od ústí buzení a prvního sloupku $L_v = 12$ mm, ostatní parametry jsou vypočítány, nebo se odvíjejí od vypočtených parametrů, jak je patrné z kapitoly 5.2.

5.2 Postup návrhu

Pro návrh uvažujeme zvlnění $L_{Ar} = 0,1$ dB, minimální útlum v zádržném pásmu $L_{As} = 40$ dB, $\Omega_s = 2$, $\Omega_c = 1$, řád filtru n je nutné vypočítat podle vztahu (2), výsledkem výpočtu je $n = 5,4505$, tedy po zaokrouhlení $n = 5$ řádu.

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0,1L_{As}} - 1}{10^{0,1L_{Ar}} - 1}}}{\cosh^{-1} \Omega_s} \quad (2)$$

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0,1 \cdot 40} - 1}{10^{0,1 \cdot 0,1} - 1}}}{\cosh^{-1}(2)}$$

Podle vypočítaného řádu filtru nalezneme v normovaných tabulkách hodnoty NDP (normované dolní propusti) prvků g_0 až g_6 jsou v tabulce 6. Z vypsaných parametrů je patrné, že návrh filtru je symetrický a ve výpočtech netřeba počítat každý parametr zvlášť. Použité vzorce byly počítány v programu Matlab, výsledky vztahů níže jsou vypsané jen na 4 desetinná místa, z tohoto důvodu je při dosazení rozpor mezi výsledkem a vzorovým výpočtem. Při aplikaci výsledků v programu nebylo zaokrouhlováno pouze na 4 desetinná místa a tím byla omezena zaokrouhlovací chyba.

Tabulka 6: Parametry prvků NDP pro zvolené zvlnění

Parametr	Rozměr [mm]
$g_0 = g_6$	1
$g_1 = g_5$	1,1468
$g_2 = g_4$	1,3712
g_3	1,9750

Na základě zvolené šířky pásma filtru je pro další výpočty nutné vypočítat vlnové délky ve vlnovodu podle obecného vztahu (3).

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{(f\sqrt{\epsilon\mu\epsilon_r})^2 - (\frac{1}{2a})^2}} \quad (3)$$

$$\lambda_{g0} = \frac{1}{\sqrt{(8 \cdot 10^9 \sqrt{8,854187818 \cdot 10^{-12} \cdot 1,256637061 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2})^2 - (\frac{1}{2 \cdot 30 \cdot 10^{-3}})^2}}$$

$$f_0 = 8 \text{ GHz}, \lambda_{g0} \approx 0,0416 \text{ m}$$

$$f_1 = 7,75 \text{ GHz}, \lambda_{g1} \approx 0,0437 \text{ m}$$

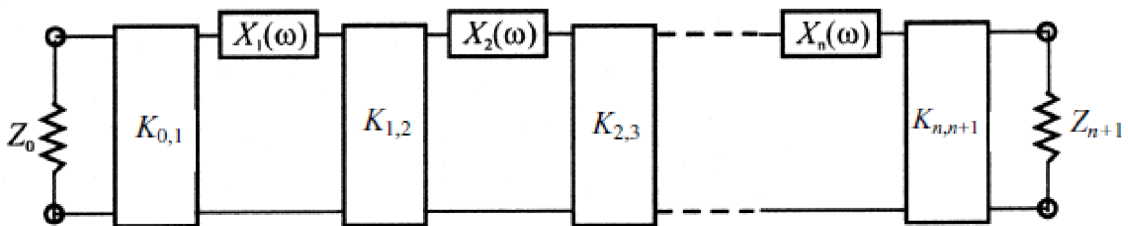
$$f_2 = 8.25 \text{ GHz}, \lambda_{g2} \approx 0,0398 \text{ m}$$

f je frekvence, a je šířka vlnovodu, ϵ je permitivita vakua $\epsilon = 8,854187818 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$, μ je permeabilita vakua $\mu = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$, ϵ_r je permitivita substrátu vlnovodu $\epsilon_r = 1,2 \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$.

Pro další výpočty musíme vypočítat vlnovou délku šířky pásma podle (4), výpočet byl převzat z [10]

$$\omega\lambda = \frac{\lambda_{g1} - \lambda_{g2}}{\lambda_{g0}} \quad (4)$$

$$\omega\lambda = 0,0929$$



Obrázek 26: Náhradní schéma vlnovodového filtru tvořeného inverzními imitančními prvky K a reaktancemi X včetně vstupní a výstupní impedance, převzato [9]

Podle obrázku 26 je patrná souměrnost, z toho vyplývá, že jsou si některé inverzní imitanční prvky vzájemně rovny, totéž platí o reaktancích. Podle vztahu je (5)

dopočítáme první a poslední imitanční inverzní prvek K_{01} a K_{56} . Podle vztahu (6) vypočítáme zbývající prvky převzato [10]. Z_0 představuje charakteristickou impedanci.

$$\frac{K_{j,j+1}}{Z_0} \quad (j = 1 \text{ do } n - 1) = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\omega \lambda}{g_j g_{j+1} \Omega_c}} \quad (5)$$

$$\frac{K_{n,n+1}}{Z_0} = \frac{\pi \omega \lambda}{2 \Omega_c} \frac{1}{\sqrt{g_n g_{n+1}}} \quad (6)$$

$$\frac{K_{01}}{Z_0} = \frac{K_{56}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{0,0929}{1 \cdot 1,1468 \cdot 1}}$$

$$\frac{K_{01}}{Z_0} = \frac{K_{56}}{Z_0} = 0,3567$$

$\omega \lambda$ vlnová délka šířky pásma podle (4), Ω_c mezní kmitočet, g_j a g_n prvky NDP, Z_0 je charakteristická impedance.

Tabulka 7: Výpis vypočítaných inverzních imitancí K

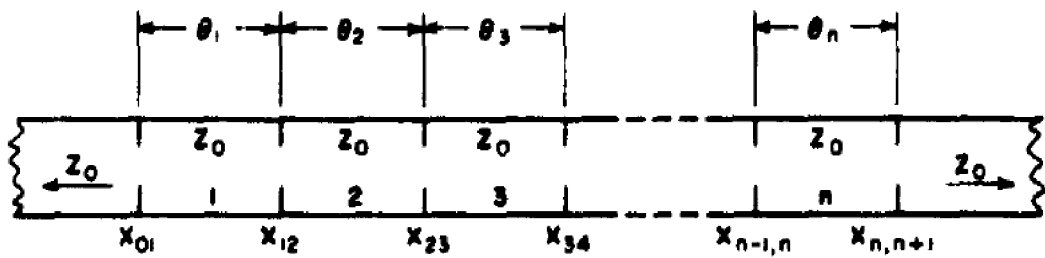
Prvek K	Hodnota prvku
$\frac{K_{01}}{Z_0} = \frac{K_{56}}{Z_0}$	0,3567
$\frac{K_{12}}{Z_0} = \frac{K_{45}}{Z_0}$	0,1164
$\frac{K_{23}}{Z_0} = \frac{K_{34}}{Z_0}$	0,0887

Ze získaných výsledků z tabulky 7 můžeme vypočítat jednotlivé reaktance X podle vztahu (7) převzatého z [10], názorné schéma náhradního obvodu je na obrázku 27.

$$\frac{X_{j,j+1}}{Z_0} = \frac{\frac{K_{j,j+1}}{Z_0}}{1 - \left(\frac{K_{j,j+1}}{Z_0}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{X_{01}}{Z_0} = \frac{X_{56}}{Z_0} = \frac{0,3567}{1 - (0,3567)^2}$$

$$\frac{X_{01}}{Z_0} = \frac{X_{56}}{Z_0} = 0,4087$$



Obrázek 27: Náhradní schéma znázorňující reaktance X a prvky θ převzato z [10]

Tabulka 8: Vypočítané hodnoty reaktancí X

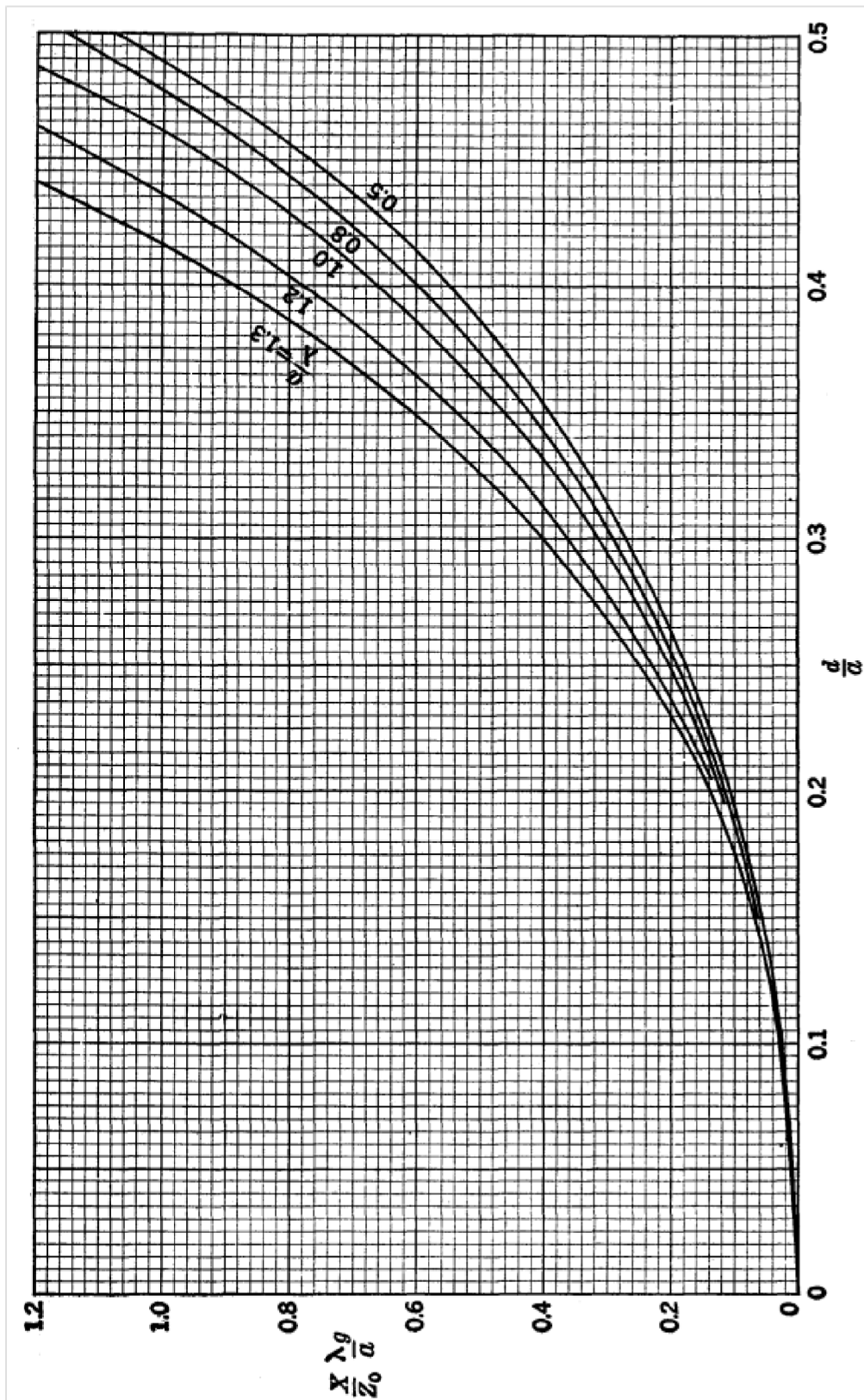
Reaktance X	Hodnota reaktance
$\frac{X_{01}}{Z_0} = \frac{X_{56}}{Z_0}$	0,4087
$\frac{X_{12}}{Z_0} = \frac{X_{45}}{Z_0} =$	0,1180
$\frac{X_{23}}{Z_0} = \frac{X_{34}}{Z_0}$	0,0894

Získanou hodnotu reaktance X vynásobíme s poměrem vlnové délky při střední frekvenci ve vlnovodu k šířce vlnovodu, podle vztahů (8) až (10), převzatých z [10]. Získaný výsledek je pak nutné vyčíst z grafu podle obrázku 28 a tím získat poměr d/a , kde a je šířka vlnovodu a d je vzdálenost protilehlých induktivních sloupků.

$$\frac{X_{01}}{Z_0} \frac{\lambda_{g0}}{a} = \frac{X_{56}}{Z_0} \frac{\lambda_{g0}}{a} \quad (8)$$

$$\frac{X_{12}}{Z_0} \frac{\lambda_{g0}}{a} = \frac{X_{45}}{Z_0} \frac{\lambda_{g0}}{a} \quad (9)$$

$$\frac{X_{23}}{Z_0} \frac{\lambda_{g0}}{a} = \frac{X_{34}}{Z_0} \frac{\lambda_{g0}}{a} \quad (10)$$



Obrázek 28: Graf závislosti reaktance na poměru vzdálenosti mezi sloupky a šířce vlnovodu, převzato z [11]

Tabulka 9: Hodnoty reaktancí vynásobených poměrem vlnové délky k šířce vlnovodu

Reaktance $X \cdot (\lambda/a)$	Hodnota
$\frac{X_{01} \lambda_{g0}}{Z_0 a} = \frac{X_{56} \lambda_{g0}}{Z_0 a}$	0,5673
$\frac{X_{12} \lambda_{g0}}{Z_0 a} = \frac{X_{45} \lambda_{g0}}{Z_0 a}$	0,1637
$\frac{X_{23} \lambda_{g0}}{Z_0 a} = \frac{X_{34} \lambda_{g0}}{Z_0 a}$	0,1241

Po odečtení prvků $X \cdot (\lambda/a)$ z příslušného grafu z obrázku, dostaneme odpovídající poměr d/a , pro nalezení hodnoty rozestupu d mezi sloupky, je nezbytné jej vynásobit hodnotou šířky vlnovodu a , přičemž je praktické použít rozměr přímo v mm, díky tomu bude rozstup protichůdných sloupek také v mm. Výsledky jsou v tabulce 10.

Tabulka 10: Hodnoty poměru d/a a rozteč protějších sloupek

Reaktance $X \cdot (\lambda/a) \Rightarrow d/a$	Hodnota poměru d/a	Hodnota rozteče protilehlých sloupek d [mm]
$\frac{X_{01} \lambda_{g0}}{Z_0 a} \Rightarrow \frac{d_1}{a} = \frac{d_6}{a}$	0,395	11,85
$\frac{X_{12} \lambda_{g0}}{Z_0 a} \Rightarrow \frac{d_2}{a} = \frac{d_5}{a}$	0,23	6,9
$\frac{X_{23} \lambda_{g0}}{Z_0 a} \Rightarrow \frac{d_3}{a} = \frac{d_4}{a}$	0,205	6,15

Ze získaných výsledků dosadíme získané reaktance X a následně provedeme mezivýpočet prvků θ ze vztahu (11) převzatého z [10]. Výsledky prvků θ dosadíme do rovnice (12), převzaté z [10], která je již převedena na mm a tím získáme rozestupy mezi sloupky l , hodnoty rozestupů jsou v tabulce 11.

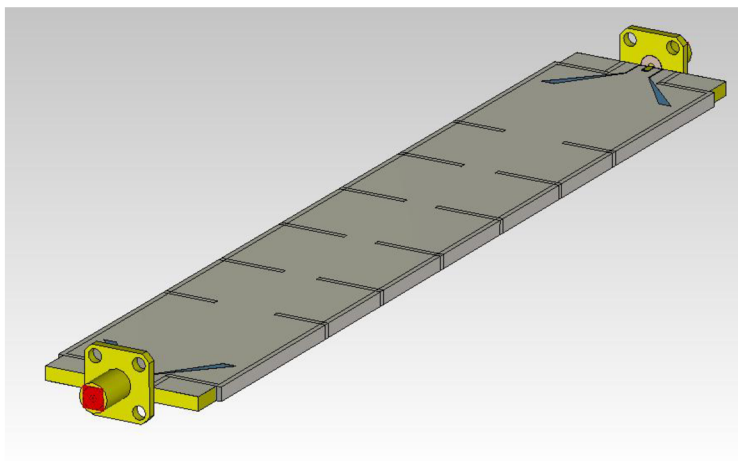
$$\theta_j = \pi - \frac{1}{2} \left(\tan^{-1} \frac{2 \cdot X_{j-1,j}}{Z_0} + \tan^{-1} \frac{2 \cdot X_{j,j+1}}{Z_0} \right) \quad (11)$$

$$l_j = \frac{\theta_j \lambda_{g0}}{2\pi} 10^3 \quad (12)$$

Tabulka 11: Prvky θ a hodnoty rozteče mezi sloupky l

Prvek $\theta \Rightarrow$ rozteč sloupků l	Hodnota prvku θ	Hodnota rozteče l [mm]
$\theta_1 = \theta_5 \Rightarrow l_1$	2,6831	17,7815
$\theta_1 = \theta_5 \Rightarrow l_2$	2,9373	19,4661
$\theta_3 \Rightarrow l_3$	2,9647	19,6478

Získané rozměry z výpočtů byly aplikovány do modelu a simulovány, podle výsledků. Následně byla provedena optimalizace a toleranční analýza pro zajištění výrobitelnosti filtru. Souhrn vypočítaných rozměrů a vstupních parametrů je v tabulce 12 a rozměry po analýzách jsou v tabulce 13.

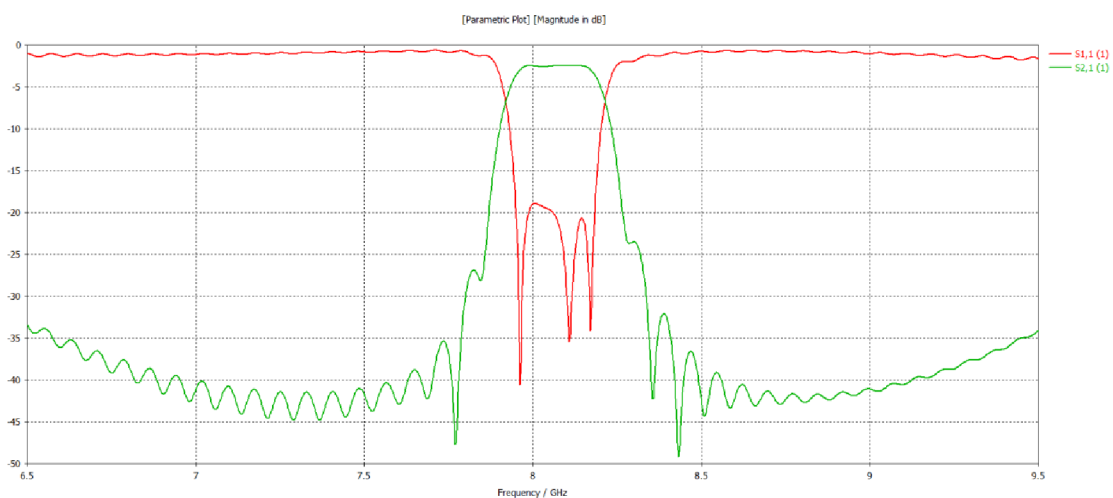


Obrázek 29: Model filtru s textilním substrátem 5. řádu

Tabulka 12: Parametry a vypočítané rozměry filtru 5. řádu s textilním substrátem

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Šířka vlnovodu	a	30 mm
Výška vlnovodu	b	2,6 mm
Dolní frekvence	f_1	7,75 GHz
Horní frekvence	f_2	8,25 GHz
Střední frekvence	f_0	8 GHz
Relativní permitivita substrátu	ϵ_r	$1,2 \text{ Fm}^{-1}$
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	12 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_6$	5,925 mm

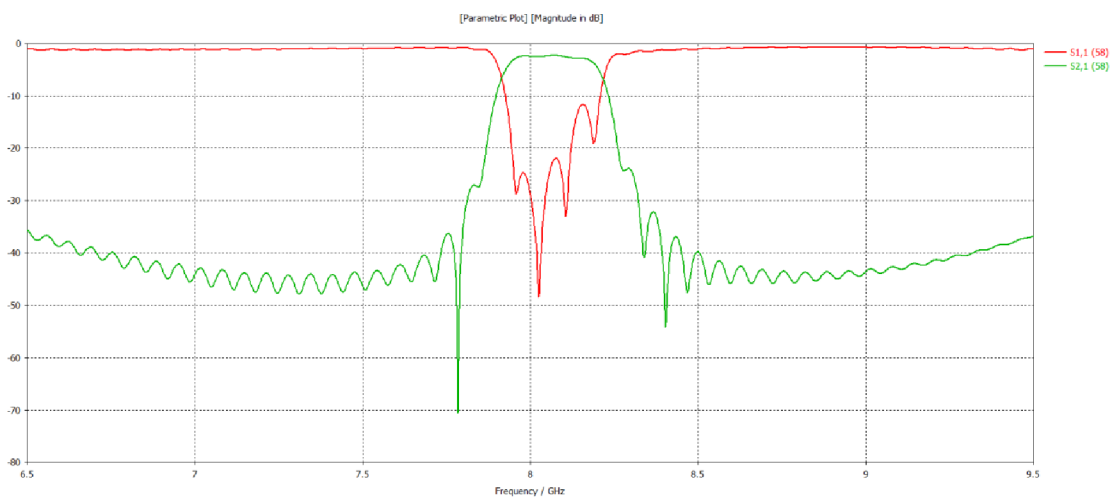
Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_5$	3,45 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_3 = d_4$	3,075 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	17,7815 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	19,4661 mm
Rozestup mezi sloupky	l_3	19,6478 mm



Obrázek 30: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot podle výpočtu, bez úprav

Tabulka 13: Rozměry filtru s textilním substrátem po analýzách

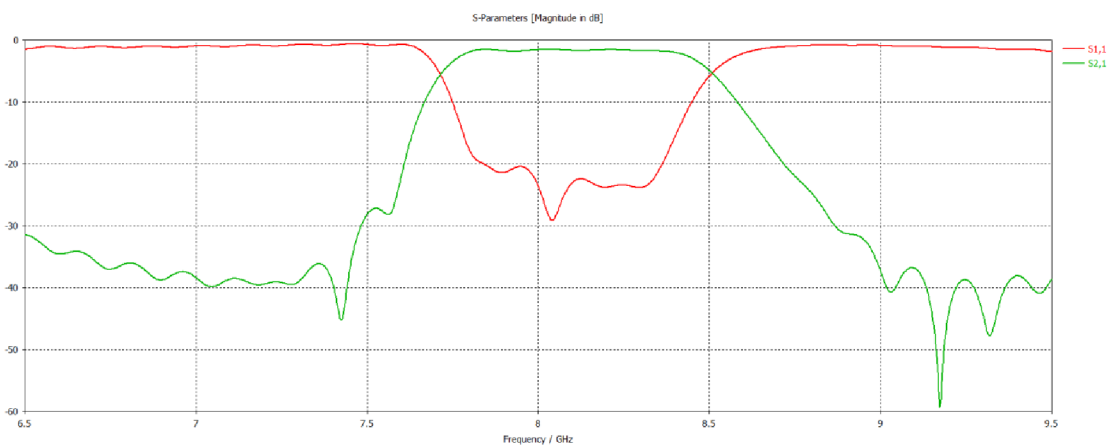
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	10 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_6$	5,9 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_5$	3,4 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_3 = d_4$	3,1 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	17,8 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	19,5 mm
Rozestup mezi sloupky	l_3	19,6 mm



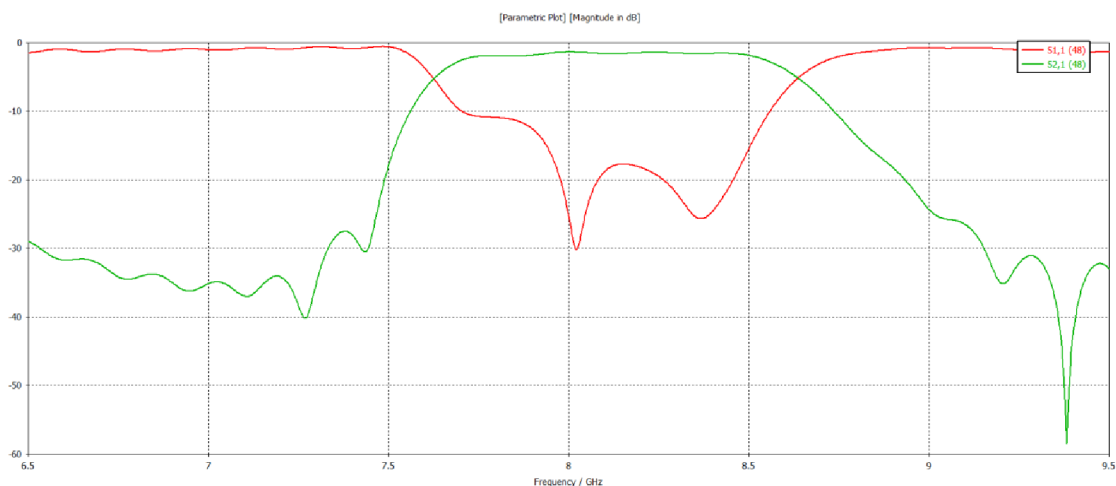
Obrázek 31: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci a toleranční analýze šířka pásma 500 MHz

Vzhledem ke konstrukčnímu omezení při výrobě filmu s motivem, je tento návrh svým celkovým rozměrem $C = 182,2$ mm optimalizovaného návrhu mimo výrobní možnosti.

Z toho důvodu byly simulovány modely s identickými parametry, pouze se změnou šířky pásma a to na 1000 MHz a 1200 MHz. Tato změna ukazuje na rozdíl mezi šířkou pásma návrhu ve výpočtech a šířce pásma změřené v simulacích.



Obrázek 32: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci, šířka pásma 1000 MHz

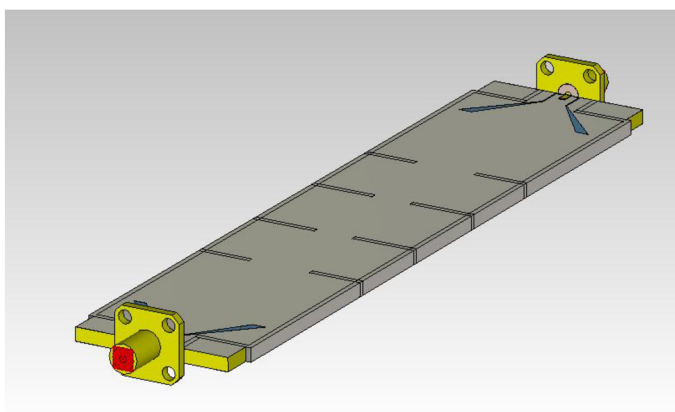


Obrázek 33: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci, šířka pásma 1200 MHz

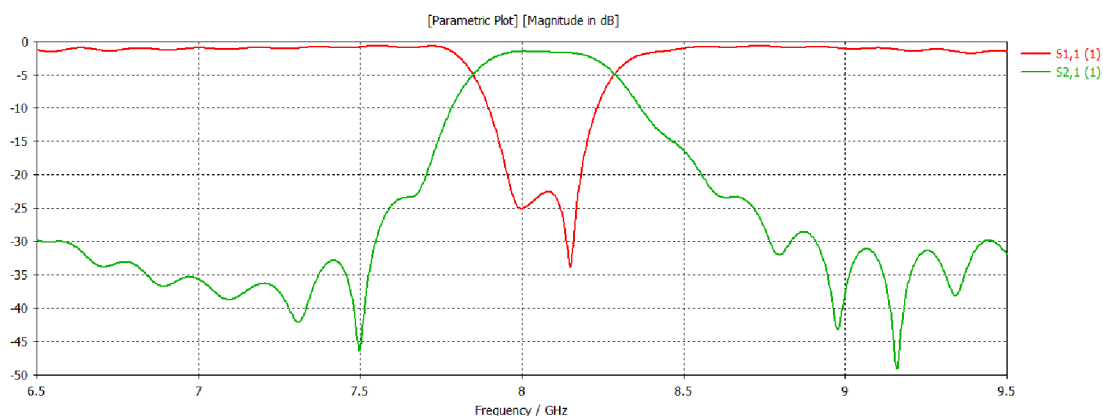
Šířka pásma 1000 MHz byla zvolena jako násobek původního návrhu se šířkou 500 MHz, model korespondující k průběhům na obrázku 32 má celkovou délku 177,1 mm. Naproti tomu šířka pásma 1200 MHz byla zvolena jako hraniční, pro zvolené pracovní frekvenční pásmo a zejména je tímto zajištěno nevybuzení vedlejšího vidu TE_{20} . Celková délka modelu náležícího k průběhům z obrázku 33 je 175,06 mm.

5.3 Změna řádu filtru

Vzhledem k dosaženým výsledkům z předešlé kapitoly 5.2, je patrné nesplnění požadovaných rozměrů návrhu filtru pro možnou výrobu. Z tohoto důvodu byl návrh pozměněn a modifikován pro 3. řád Čebyševovy aproximace, byly provedeny patřičné výpočty podle kapitoly 5, a s tím související simulace, které jsou na obrázcích 35 až 38. Rozměry a vstupní parametry jsou v tabulce 14, optimalizované výsledky jsou na obrázku 36 a v tabulce 15. Pro porovnání chování filtru při různých šířkách pásma se provedli simulace, které jsou na obrázcích 36 až 38.



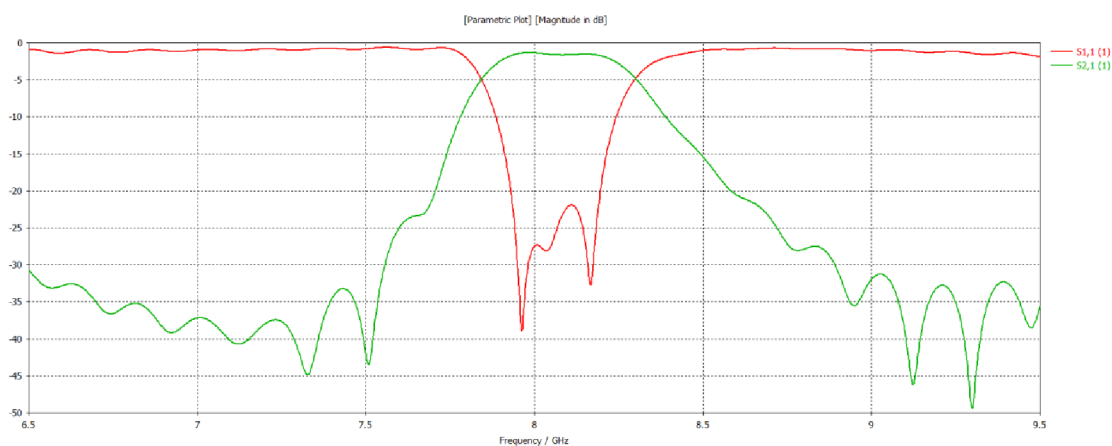
Obrázek 34: Model filtru s textilním substrátem 3. řádu



Obrázek 35: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot podle výpočtu filtru 3. řádu s textilním substrátem

Tabulka 14: Parametry a vypočítané rozměry filtru 3. řádu s textilním substrátem

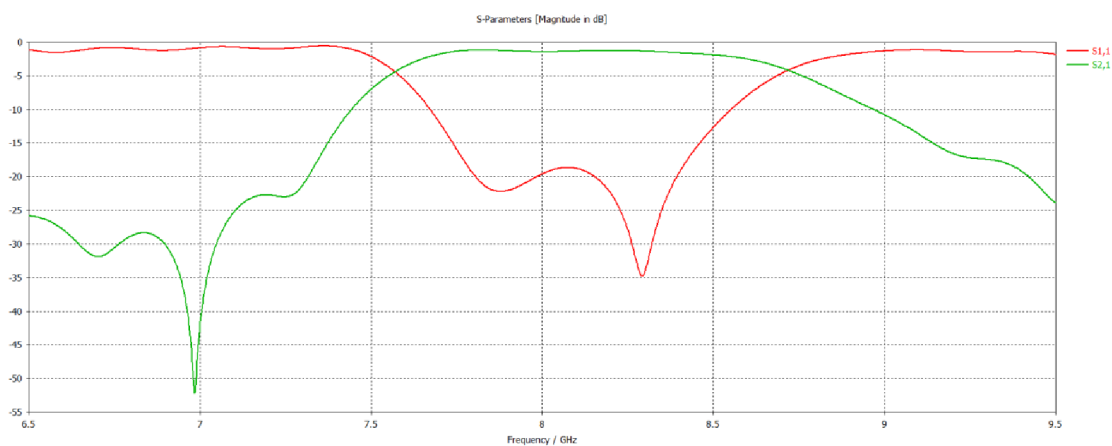
Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Šířka vlnovodu	a	30 mm
Výška vlnovodu	b	2,6 mm
Dolní frekvence	f_1	7,75 GHz
Horní frekvence	f_2	8,25 GHz
Střední frekvence	f_0	8 GHz
Relativní permitivita substrátu	ϵ_r	1,2 Fm^{-1}
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	12 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_4$	6,075 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_3$	3,75 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	17,5523 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	19,0528 mm



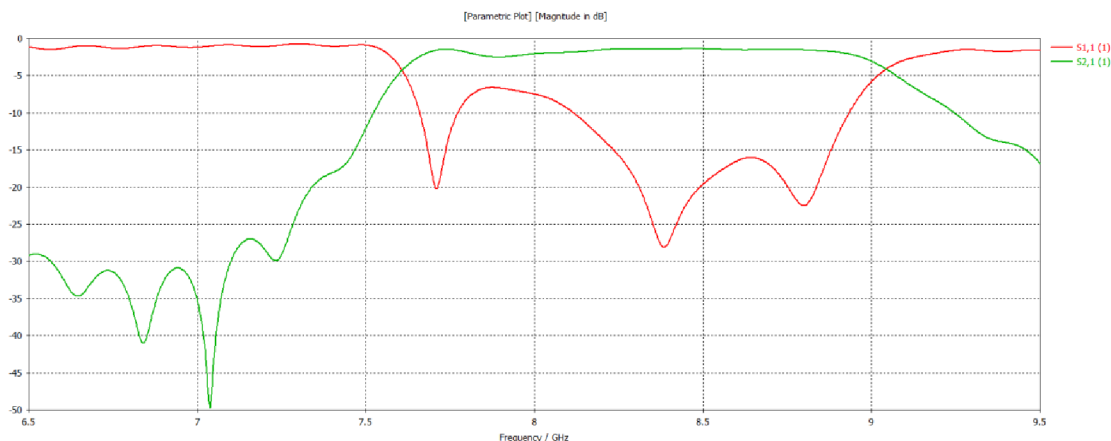
Obrázek 36: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot po optimalizaci a toleranční analýze šířka pásma 500 MHz

Tabulka 15: Zaokrouhlené rozměry po analýzách filtru 3. řádu s textilním substrátem

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	12 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_4$	6 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_3$	3,8 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	19 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	17,5 mm



Obrázek 37: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot bez úprav, šířka pásma 1000 MHz

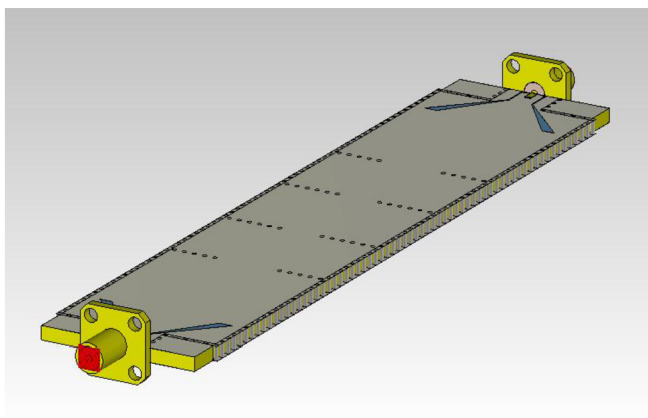


Obrázek 38: Činitel přenosu a odrazu simulace hodnot bez úprav, šířka pásma 1200 MHz

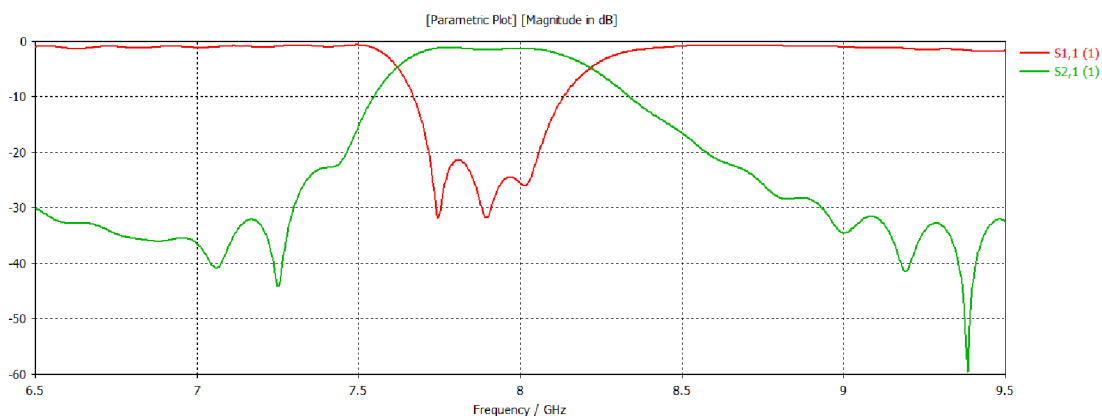
Vzhledem k celkové délce filtru a tvaru charakteristiky byl vybrán filtr šířky pásma 500 MHz 3. řádu podle průběhu na obrázku 35 a 36. Filtr splňuje požadovaná kritéria na výrobu a je celková délka je 144 mm, zbývající 2 filtry mají menší délky 139 mm a 137 mm, ale nedosahují dostatečné úrovně filtrace.

5.4 Aplikace prokovů

Pro přiblížení se k reálnému chování filtru jsme do modelu aplikovali prokovy, které simulují jednotlivá prošití vodivou nití a nahrazují plné stěny pasivních prvků. Průměr prokovu byl zvolen na 0,8 mm, a vzdálenost mezi středy prokovů je 2 mm, z toho vyplývá, že tloušťka stěny vlnovodu byla snížena z 1 mm na 0,8 mm. Následně byla provedena simulace, pro ověření chování filtru. Aplikované prokovy a jejich vzdálenosti nebylo třeba nějak upravovat, proto ani nebyla provedena optimalizace modelu nebo jiné analýzy.



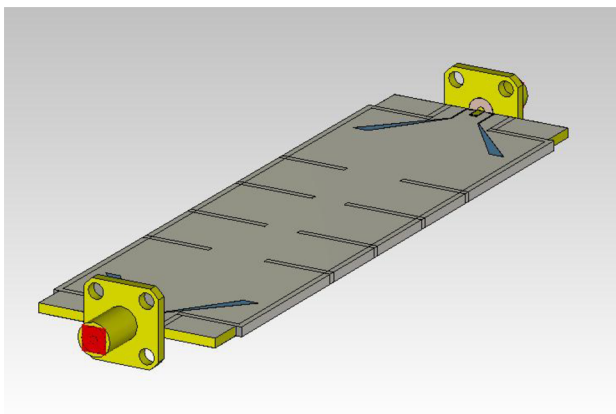
Obrázek 39: Model s prokovy filtru 3. řádu s textilním substrátem



Obrázek 40: Výsledný činitel přenosu a odrazu, po aplikaci prokůvů do modelu filtru 3. řádu s textilním substrátem

6 NÁVRH FILTRU S KOPLANÁRNÍM BUZENÍM V PROVEDENÍ NA CUCLADU

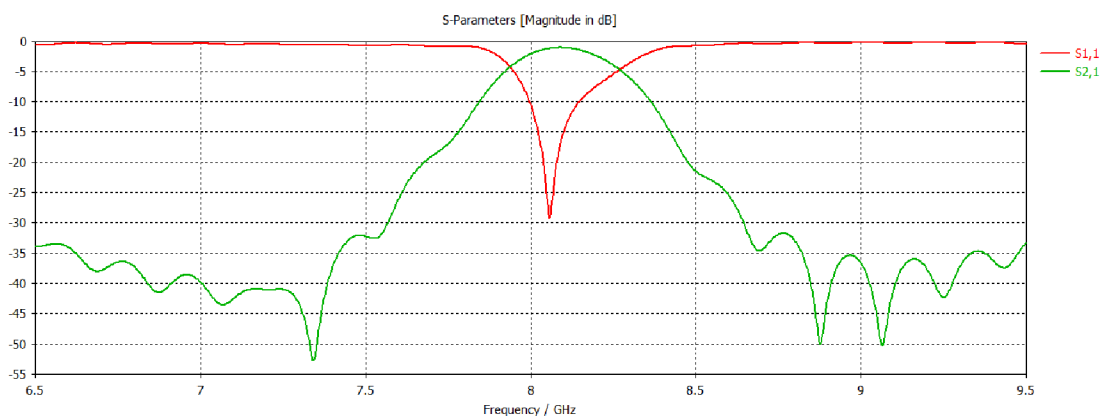
Filtr byl navržen na substrátu CuClad 217LX. Rozdíl oproti textilu je v relativní permitivitě materiálu $\epsilon_r = 2,17 \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$, a výšce vlnovodu $b = 1,54 \text{ mm}$. Tyto parametry byly zahrnuty ve výpočtech z kapitoly 5, aplikovány v simulacích a následné toleranční analýzy, vypočítané a optimalizované rozměry jsou v tabulkách 16 a 17, včetně vstupních parametrů. Simulované charakteristikami vypočtených parametrů jsou na obrázku 42 a po optimalizaci jsou na obrázku 43.



Obrázek 41: Model filtru na substrátu CuClad

Tabulka 16: Vstupní parametry a vypočítané rozměry filtru se substrátem CuClad

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Šířka vlnovodu	a	30 mm
Výška vlnovodu	b	1,54 mm
Dolní frekvence	f_1	7,75 GHz
Horní frekvence	f_2	8,25 GHz
Střední frekvence	f_0	8 GHz
Relativní permitivita substrátu	ϵ_r	$2,17 \text{ Fm}^{-1}$
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	1 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_4$	4,8 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_3$	2,775 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	12,0847 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	13,0629 mm



Obrázek 42: Výsledek simulace vypočítaných hodnot filtru na substrátu CuClad

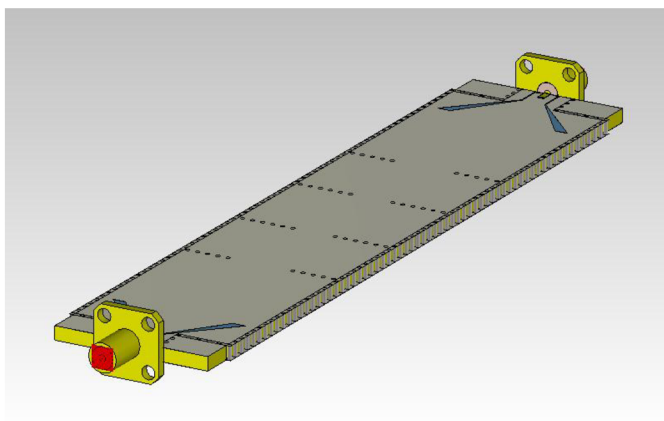
Tabulka 17: Zaokrouhlené rozměry po analýzách filtru se substrátem CuClad

Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Oddělení buzení od vlnovodu	L_v	1 mm
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_1 = d_4$	4,8 mm

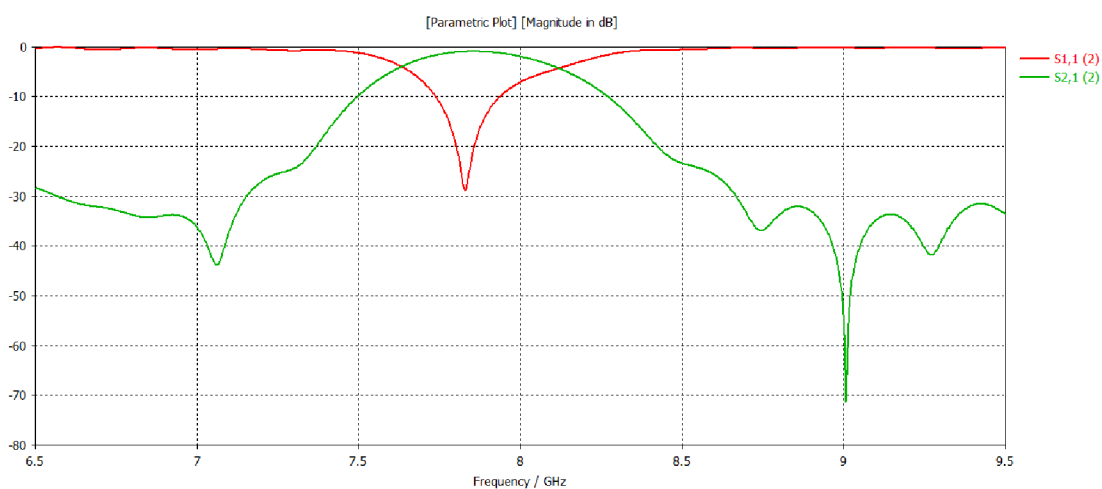
Popis parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Vzdálenost mezi protilehlými sloupky	$d_2 = d_3$	2,8 mm
Rozestup mezi sloupky	l_1	12,1 mm
Rozestup mezi sloupky	l_2	13,1 mm

6.1 Zpřesnění simulací

Pro simulování reálného chování filtru jsme do modelu aplikovali prokovy simulující jednotlivá prošívaná vodivá nití místo plných stěn pasivních prvků. Průměr prokovu byl zvolen na 0,8 mm, a vzdálenost mezi středy prokovů je 2 mm, z toho vyplývá, že tloušťka stěny vlnovodu byla snížena z 1 mm na 0,8 mm. Následně byla provedena simulace, pro ověření chování filtru.



Obrázek 43: Model filtru na substrátu CuClad s prokovy



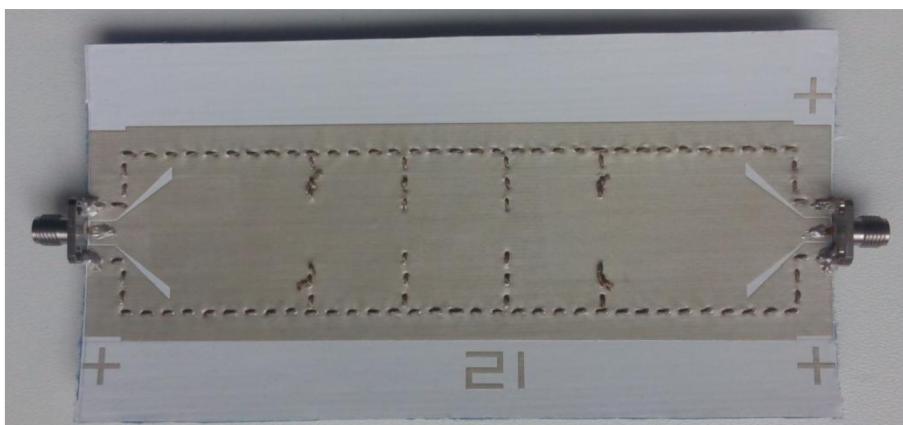
Obrázek 44: Výsledek simulace filtru na substrátu CuClad s prokovy

7 POROVNÁNÍ FILTRŮ V PROVEDENÍ NA TEXTILU A CUCLADU

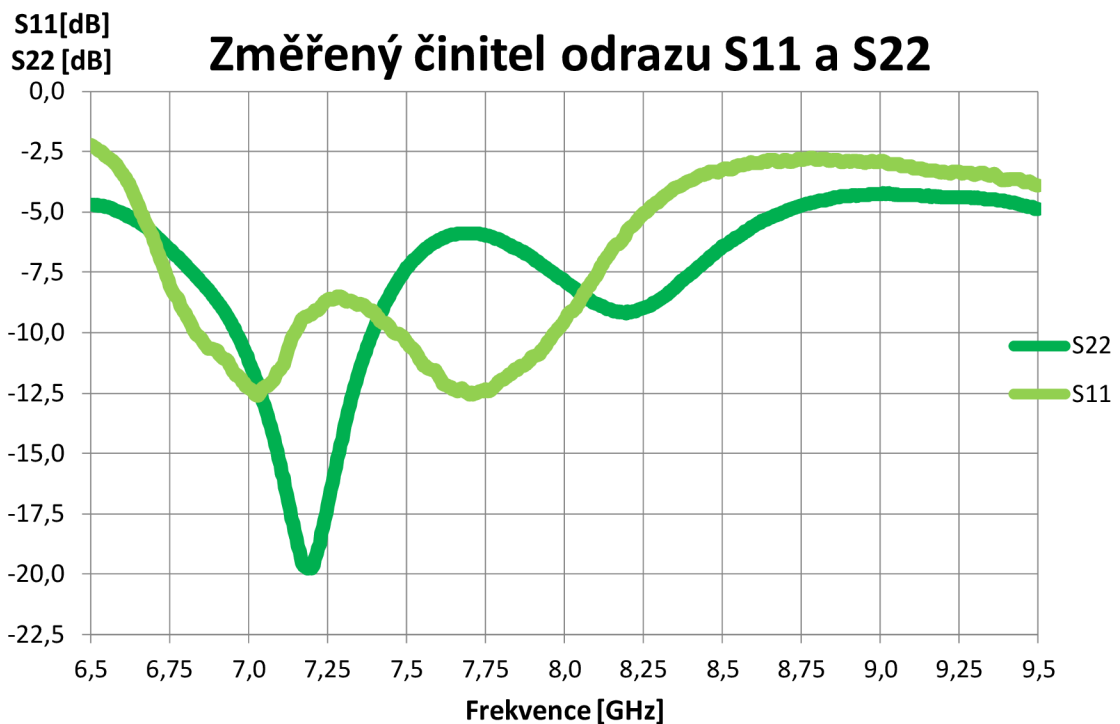
V této kapitole je shrnutí realizovaných 3 filtrů, při výrobě každého z nich byla využita jiná technologie nebo výrobní postup.

7.1 Provedení na textilu s ručním prošitím

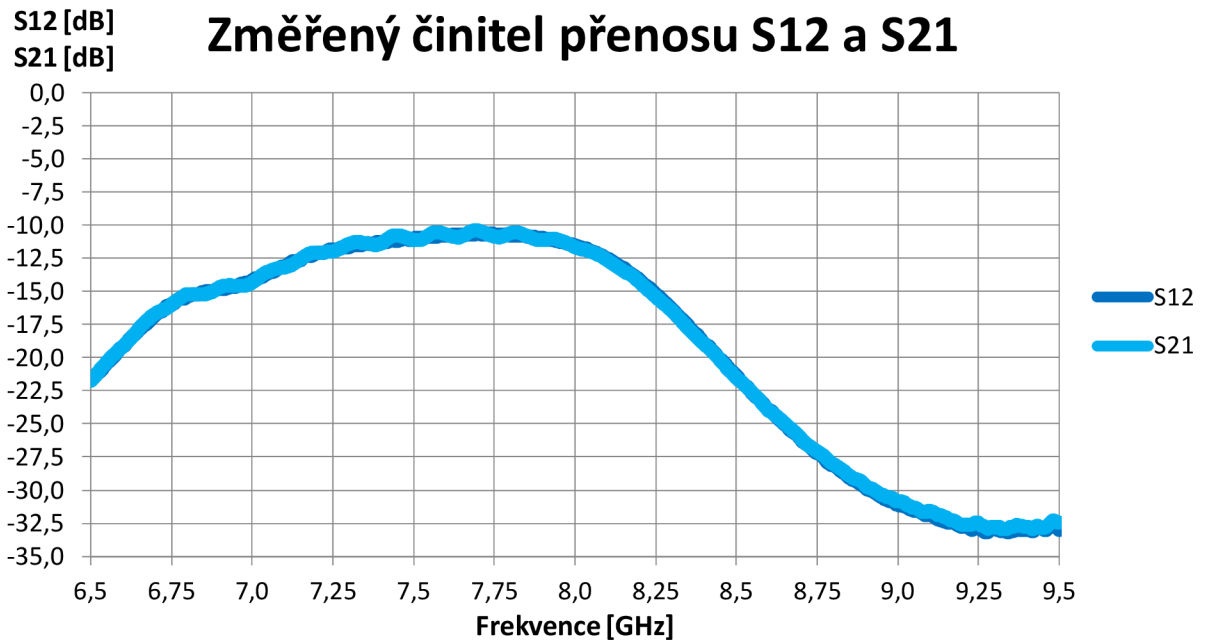
Tento filtr byl prošit ručně, během tohoto způsobu výroby je nezbytné dbát na přesnost a preciznost. Během šití nedeformovat substrát s natisknutým motivem, protože by mohlo dojít k odlepení nažehlovací folie s tímto motivem nebo k pomačkání a tím ke změně rozměrů pasivních prvků nebo napájení. Během utahování stehů se musí dbát na možnosti materiálu, aby nedošlo k roztrhání motivu, respektovat připravené otvory pro prošívání a rovnoměrně utahovat stehy, aby nevytvořil uzel, který by mohl protrhnout vyráběný filtr. K filtru byly přilepeny SMA konektory vodivým lepidlem, výsledný vyrobený filtr je na obrázku 45. Změřené charakteristiky jsou na obrázcích 46 a 47.



Obrázek 45: Vlnovodový filtr ručně prošíváný



Obrázek 46: Změřené činitele odrazu ručně šitého filtru

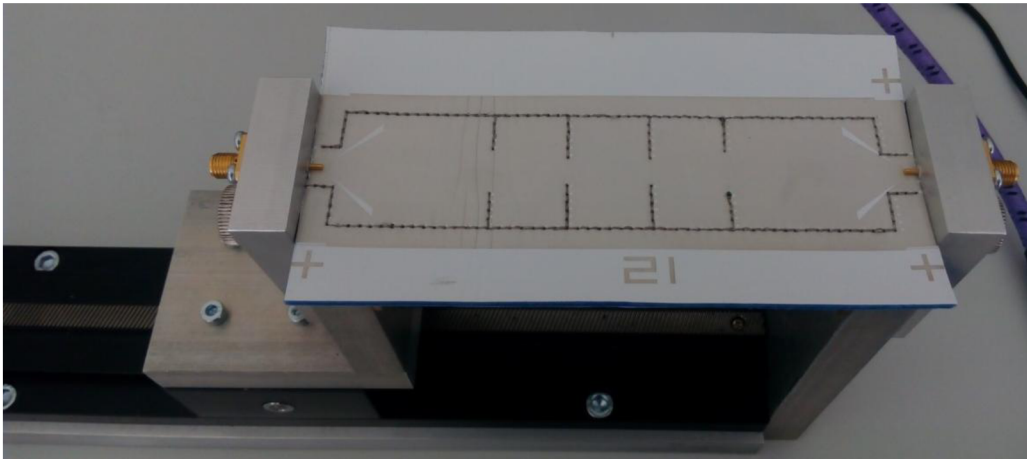


Obrázek 47: Změřené činitele přenosu ručně šitého filtru

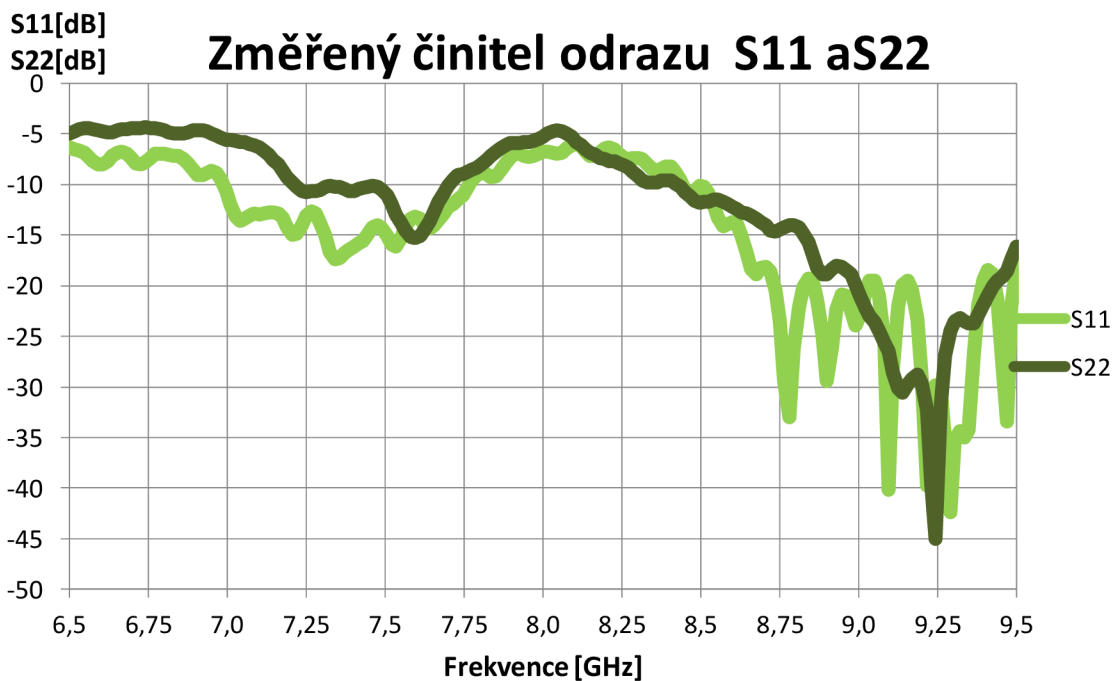
7.2 Provedení na textilu se strojovým prošitím

Filtr byl prošit speciálním vyšivacím strojem Bernina 880, více o stroji je v

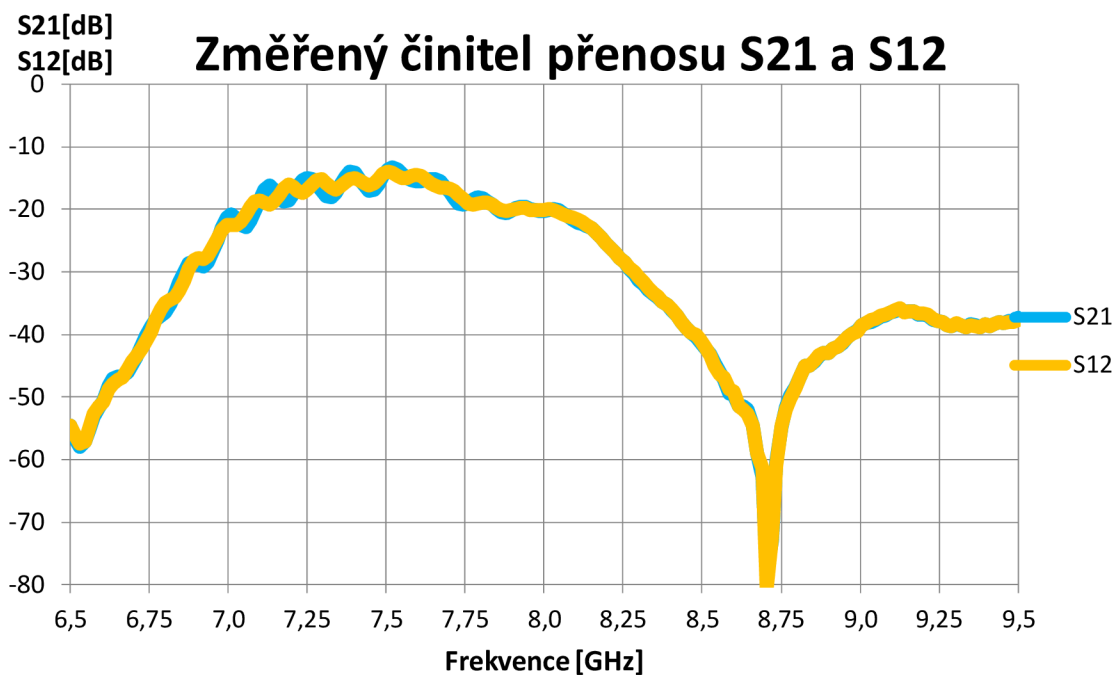
podkapitole 2.2. Využití vyšívací techniky předchází úpravám modelu a výstupních dat, následně několik formátových převodů, aby bylo možné vyšít požadovaný motiv ve stanovených rozměrech. Rizikem při šití vyšívacím strojem je příliš rychlý posuv, který způsobí zasukování nitě, příliš velký přtlak šicí patky, který může způsobit potrhání natisknutého motivu nebo odlepení nažehleného podkladu s natisknutým motivem a posunutí vyšíváního motivu. Výsledný strojově prošitý filtr je na obrázku 48 a byl upnut do měřicího přípravku s SMA konektory. Změřené charakteristiky jsou na obrázcích 49 a 50.



Obrázek 48: Strojově prošívání vlnodovový filtr upnutý v měřicím přípravku



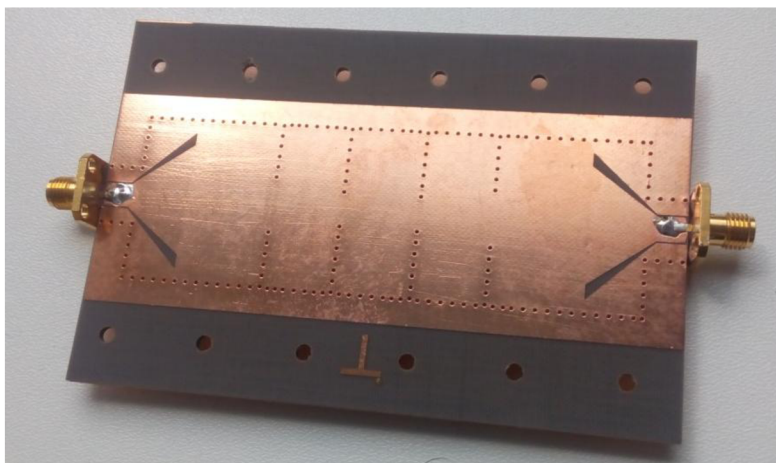
Obrázek 49: Změřené činitele odrazu strojově šitého filtru



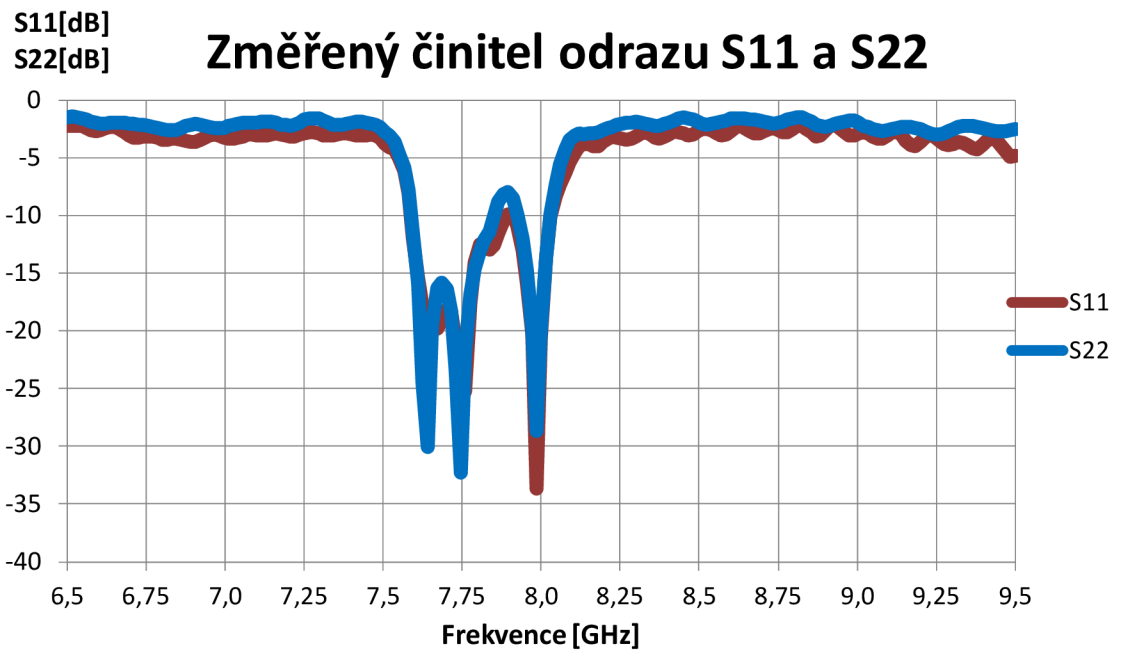
Obrázek 50: Změřené činitele přenosu strojově šitého filtru

7.3 Provedení na CuCladu s prokovy

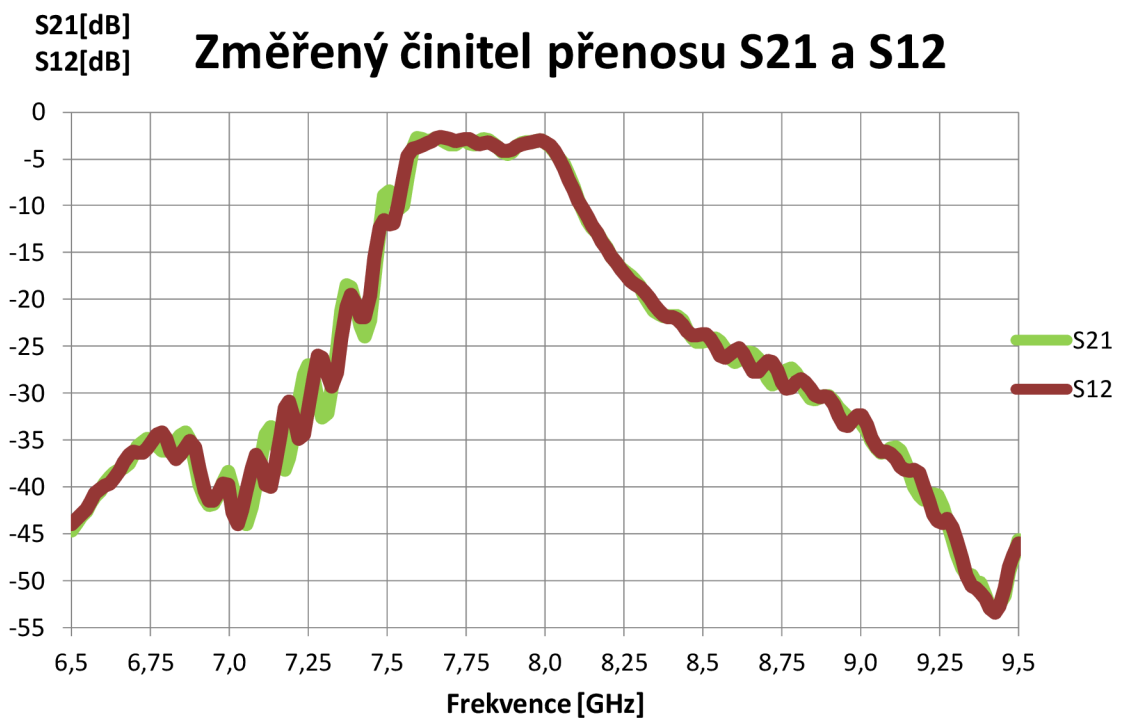
Do substrátu byly vyvrtány otvory o průměru 0,8 mm ve vzdálenosti 2 mm od středů. Následně byl filtr máčen v měděné lázni, a tím byla nanášena měděná vrstva a současně pokoveny vyvrtané otvory. Na takto připravený kus byl vyleptán požadovaný motiv filtru. Během pokovení může být rizikem nesmáčení vyvrtaných otvorů, také špatné sesazení ovlivní činnost filtru. Výsledné provedení filtru i s připájenými konektory je na obrázku 51. Změřené charakteristiky jsou na obrázcích 52 a 53.



Obrázek 51 Vlnovodový filtr v provedení na CuCladu s konektory SMA



Obrázek 52: Změřené činitele odrazu filtru na substrátu CuClad



Obrázek 53: Změřené činitele přenosu filtru na substrátu CuClad

8 ZÁVĚR

V práci jsou shrnuty možnosti použitelných pasivních prvků, po výběru nejvhodnějšího se celá práce zabývá možnými způsoby výroby s různými materiály a technologiemi.

V první části se práce zaměřuje na výrobu filtru pomocí webové stránky. Výsledný filtr byl podle rozměrů návrhu ručně vystřižen, sesazena ručně prošit. Ze změřených charakteristik je patrný útlum textilu, který nebyl v simulacích uvažován, z kmitočtového průběhu změřeného parametru S_{11} je patrný vliv nesymetrického návrhu podle osy X. To způsobuje, že nedochází k žádné filtraci, ale ke značnému odrazu signálu. Naměřené charakteristika činitele přenosu S_{21} se tvarem přibližuje simulacím, ale je tu značný vliv vyzařování mikropáskového buzení do prostoru, i přes nedostatky je zde patrné lepší vyladění na požadovanou střední frekvenci. Činitel odrazu na výstupu S_{22} se více blíží simulovanému činiteli odrazu než změřený činitel odrazu S_{11} . Z charakteristiky činitele odrazu S_{22} je také patrné lepší vyladění na požadovaný kmitočet, než bylo simulováno. Filtrační vlastnosti podle změřených charakteristik S_{21} a S_{22} nelze považovat za dostatečné, tento způsob výroby je značně laický a nezahrnuje v návrhu požadovanou šířku pásma. Z dosažených výsledků lze vyvodit, že tento typ napájení není vhodný vzhledem ke ztrátám v podobě vyzařování do prostoru, proto je v dalším návrhu aplikováno buzení pomocí koplanárního vlnovodu.

V tomto provedení filtru bylo aplikováno buzení pomocí GCPW. Povrch horní a spodní stěny byl tvořen měděnou folií s vyleptaným motivem, která byla nalepena na 3D textilii a pasivní prvky byly prošity ručně. Během výroby byla folie nepřesně sesazena, pokroucena a pomačkána během šití. To vedlo k degradaci přesných rozměrů, jak pasivních prvků, tak přesných rozměrů budící části. Tento problém se razantně projevil v naměřených hodnotách. Zvolený způsob výroby pro tak přesné rozměry buzení vyžaduje vyšší výrobní přesnost a citlivost. Charakteristiky mají nižší úroveň díky útlumu textilu, v simulacích je útlum idealizován. Takovéto průběhy nelze považovat za uspokojivé vlastnosti filtru, proto byla pro další provedení zvolena síťotisková metoda pro výrobu povrchu horní a spodní stěny, a porovnání vlastností s provedením na substrátu CuClad.

Zvolený způsob výroby povrchu filtru, pomocí síťotisku, definoval omezení celkové délky filtru. Díky tomu musel být návrh filtru změněn, z 5. řádu Čebyševovy aproximace na 3. Řád, tím se zajistilo zmenšení filtru, pro přehled vlastností filtru byly provedeny simulace pro více šířek pásma filtru. Na základě těchto údajů, byl vybrán jeden filtr se šířkou pásma 500 MHz. Při nažehlování podkladové folie pro síťotisk nedošlo k žádnému nežádoucímu zvlnění, během nanášení motivu síťotiskem, ale došlo ke špatnému sesazení.

Tento výrobní problém následně ovlivnil přesnost ručního i strojového šití. Ze změřených průběhů níže je patrný útlum signálu v textilním substrátu, tyto ztráty nebyly v simulovaném modelu uvažovány. Činitel odrazu S_{11} se nijak nepřibližuje simulovanému výsledku. Oproti tomu S_{22} se blíží simulaci, ale její střední frekvence je posunuta více jak 500 MHz níže než je simulace, i přesto to není dostatečný výsledek, aby byla zajištěna uspokojující filtrace. Průběhy činitele přenosu jsou značně utlumeny, částečně útlumem substrátu, ale zejména špatným sesazením při síťotisku.

Při strojovém šití se projevil na změřených výsledcích nejen útlum textilu a špatné sesazení, ale zejména posunutí celého prošivaného voru. Byla ovlivněna napájecí část a pasivní prvky byly posunuty mimo požadované rozměry. Díky tomu jsou tím negativně ovlivněny vlastnosti filtru a nedochází tak ani k náznaku požadované nebo simulované filtrace na frekvenci 8 GHz.

Poslední realizací filtru bylo použití mikrovlnného substrátu CuClad 217. Naměřené charakteristiky přenosu kopírují simulace, projevuje se zde vliv reálného prostředí, proto není naměřen činitel odrazu od nulové úrovně, současně jsou zde patrné rezonance, které se v simulacích neobjevovaly, tyto rezonance mohou být způsobeny nedostatečným pokovením vyvrtaných otvorů v substrátu.

Nejlepších filtračních vlastností bylo dosaženo v provedení na substrátu CuClad. Během celé práce se projevovala značná citlivost na změnu rozměrů pasivních prvků, ovlivňovalo to jak šířku pásma filtru, tak střední kmitočet i míru účinnosti filtrace.

Před další výrobou je nutné simulovat ve větší míře vliv nedodržení požadovaných rozměrů napájecí části a pasivních prvků. Dále se zaměřit na realizaci filtru pomocí mikrovlnných substrátů, protože použité textilní materiály jsou příliš citlivé na změnu požadovaných rozměrů.

LITERATURA

- [1] MEDIAVILLA SÁNCHEZ, A., F. MARANTE RIZO a K. CEPERO. Waveguide Subsystems for Antenna Feed. Brno, 2011. Dostupné také z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/kosy/index.php?strana=prednasky-archiv-zahranicni-lektori>
- [2] ICHIKAWA, Y. Y. Ichikawa. *Microstrip Line Calculator* [online]. 2004 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms_line_e.htm
- [3] SINTEX. *Materiálový list: Zátěžná 3D pletenina*. Česká Třebová, 2000.
- [4] CMS - Filter & Coupling Matrix Synthesis Software. *Guided Wave Technology's* [online]. 2012 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.guidedwavetech.com/>
- [5] STATEX. *Shieldex® 235/34 dtex HCB*. Bremen, 2003. Dostupné také z: <http://statex.de/index.php/en/fibres-and-yarns/item/153-shieldex%C2%AE-garne>
- [6] Microstrip Line Calculator. Sphere [online]. 2004 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms_line_e.htm
- [7] LÁČEK, Jaroslav, Tomáš MIKULÁŠEK, Zbyněk RAIDA a Tomáš URBANEC. SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE MONOPOLAR RING-SLOT ANTENNA. Brno, 2013. Brno University of Technology.
- [8] FARAIZIAN, Mohamad a et al. *Fast hopping frequency generation in digital CMOS*. New York: Springer, 2013, s. 168. ISBN 978-1461404897.
- [9] HONG, Jia-Sheng a M.J. LANCASTER. *Microstrip filters for RF/microwave applications*. 2nd ed. New York: Wiley, c2001, s. 488. Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN 0-471-38877-7.
- [10] Band-pass filters: Shunt-inductance-coupled, waveguide filters. MATTHAEI, G. L., Leo YOUNG a E. M. T. JONES. *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. New York: McGraw-Hill, 1964, s. 1096.
- [11] MARCUVITZ, Nathan. *Wavewuide handbook*. London: McGraw-Hill, 1951, s. 453.