

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vysokofrekvenční vlastnosti vyšíváných propojovacích
struktur**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej TÝMA**
Osobní číslo: **E16N0033P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vysokofrekvenční vlastnosti vyšívaných propojovacích struktur**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište způsoby realizace propojovacích struktur na textilních substrátech.
2. Navrhněte propojovací struktury realizované vyšíváním na textilních substrátech.
3. Změřte vysokofrekvenční parametry vyšívaných propojovacích struktur.
4. Zhodnoťte získané výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

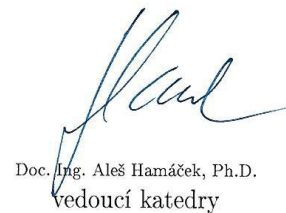
1. Hoffmann K.: Planární mikrovlnné obvody
2. Mattila, H.R.: Intelligent textiles and clothing
3. Schneegass, S.: Smart textiles - Fundamentals, Design and Interaction

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na vysokofrekvenční vlastnosti vyšívaných propojovacích struktur neboli planárních mikrovlnných vedení, porovnává vytvořené propojovací struktury na desce plošných spojů s propojovacími strukturami na textilním substrátu. Dále je v této práci uvedena problematika kontaktování propojovacích struktur, používané materiály pro propojovací struktury na textilních substrátech a jejich výrobní procesy. Tato práce obsahuje také konkrétní návrh a realizaci textilních propojovacích struktur s provedeným měřením a výpočty vysokofrekvenčních parametrů.

Klíčová slova

Propojovací struktura, deska plošných spojů, vodivý motiv na textilním substrátu, planární mikrovlnné vedení, koplanární vedení, koplanární vlnovod, vysokofrekvenční vlastnosti, vyšívaní, vlnová impedance, S-parametry.

Abstract

This diploma thesis is focused on high frequency behavior of embroidered interconnection structures or more precisely planar microwave lines, compares the created interconnection structures on a printed circuit board with interconnection structures on textile substrate. There are also listed the issues of contacting of interconnection structures, used materials for interconnection structures on textile substrates and their manufacturing processes. This diploma thesis also includes the concrete proposal and realization of textile interconnection structures with the executed measurements and the calculations of high frequency parameters.

Key words

Interconnection structure, printed circuit board, conductive motif on textile substrate, planar microwave line, coplanar strip line, coplanar waveguide, high frequency properties, embroidery, characteristic impedance, S-parameters.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 26.5.2019

Bc. Ondřej Týma

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomášovi Blechovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	13
1 PROPOJOVACÍ STRUKTURY	14
1.1 PLANÁRNÍ MIKROVLNNÁ VEDENÍ.....	14
1.1.1 Mikropáskové vedení	15
1.1.2 Koplanární a štěrbinové vedení	16
1.2 KONTAKTOVÁNÍ	20
1.3 PROPOJOVACÍ STRUKTURY NA TEXTILNÍCH SUBSTRÁTECH	22
1.4 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO TEXTILNÍ PROPOJOVACÍ STRUKTURY.....	24
1.4.1 Vodivé příze	24
1.4.1.1 Vodivá příze s kovovým jádrem	24
1.4.1.2 Vodivá příze s nevodivým jádrem	25
1.4.1.3 Vodivá příze bez jádra	26
1.4.2 Vodivé nitě	27
1.4.3 Vodivé pasty.....	27
1.4.4 Vodivé inkousty.....	28
1.5 VÝROBNÍ PROCESY VODIVÝCH PROPOJOVACÍCH STRUKTUR	29
1.5.1 Vyšívání.....	29
1.5.2 Tkaní	30
1.5.3 Pletení	30
1.5.4 Sítotisk.....	31
1.5.5 Inkoustový tisk.....	31
1.5.6 Naprašování.....	32
2 NÁVRH A REALIZACE TEXTILNÍCH PROPOJOVACÍCH STRUKTUR	33
3 NÁVRH A REALIZACE KONTAKTOVÁNÍ	44
4 TEORETICKÉ VÝPOČTY PRO REALIZOVANÉ VZORKY	47
5 MĚŘENÍ A VÝPOČTY PARAMETRŮ PROPOJOVACÍCH STRUKTUR	49
5.1 MĚŘENÍ IMPEDANCE NAKRÁTKO A NAPRÁZDNO	49
5.1.1 Měření impedance nakrátko a naprázdno pro vzorky na textilií	50
5.1.2 Měření impedance nakrátko a naprázdno pro vzorky na DPS.....	51
5.2 MĚŘENÍ ROZPTYLOVÝCH PARAMETRŮ.....	54
5.2.1 Měření S-parametrů pro vzorky na textilním substrátu a na DPS	57
ZÁVĚR	64
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	66
SEZNAM TABULEK	74

SEZNAM OBRÁZKŮ	74
SEZNAM GRAFŮ	75
PŘÍLOHY	76

Seznam symbolů a zkratek

DPS	Deska plošných spojů
m	Metr
mm	Milimetr
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz
kHz	Kilohertz
h	Výška dielektrického substrátu (mm)
L	Délka vedení (mm)
R, a, s	Rozteč mezi aktivním vodičem a zemní plochou (mm)
M	Mezera mezi pájecími ploškami (mm)
Š, w, a	Šířka aktivního vodiče (mm)
Z, g	Šířka zemní plochy (mm)
t	Výška (tloušťka) aktivního vodiče a zemní plochy (mm)
X, Y	Rozměry pájecích plošek (mm)
ϵ_r	Relativní permitivita substrátu (-)
ϵ_0	Permitivita vzduchu (F/m)
Z_0	Vlnová impedance (Ω)
ϵ_{re}	Efektivní relativní permitivita (-)
TEM	Transversal electromagnetic
HEM	Hybrid electromagnetic
K (k)	Úplný eliptický integrál 1. druhu
K (k')	Doplňek úplného eliptického integrálu 1. druhu
k	Modul Jacobiho eliptických funkcí
k'	Doplňek modulu Jacobiho eliptických funkcí
π	Ludolfovo číslo
$\ln(x)$	Zápis funkce přirozeného logaritmu z neznámé x
$\sinh(x)$	Hyperbolická funkce sinus x
VF	Vysokofrekvenční
IEC	International Electrotechnical Commission
Ω	Ohm
MCX	Micro coaxial
MMCX	Miniature Microax

MMBX.....	Micro Miniature Board
BMA	Blind mate connector
SMA.....	Subminiature A
SMB.....	Subminiature B
SMC.....	Subminiature C
BNC	Bayonet Navy Connector
MHV	Miniature High Voltage
SHV	Safe High Voltage
TNC	Threaded Navy Connector
N.....	Navy Connector
kV.....	Kilovolt
EKG	Elektrokardiografie
µm	Mikrometr
α	Teplotní součinitel odporu (K^{-1})
K.....	Kelvin
ρ	Měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot m$)
γ	Měrná elektrická vodivost (S/m)
S	Siemens
mm ²	Čtvereční milimetr
Cu.....	Cuprum (měď)
Ag.....	Argentum (stříbro)
Ms	Mosaz
°C.....	Stupeň Celsia
cm.....	Centimetr
UV.....	Ultraviolet
nm	Nanometr
Pa	Pascal
PES.....	Polyester
S-parameters	Scattering parameters
Z _p	Impedance naprázdno (Ω)
Z _k	Impedance nakrátko (Ω)
Z.....	Impedanční matice
z ₁₁ , z ₁₂ , z ₂₁ , z ₂₂	Prvky impedanční matice Z
I ₁	Vstupní proud (A)

I_2	Výstupní proud (A)
U_1	Vstupní napětí (V)
U_2	Výstupní napětí (V)
a_1, a_2	Zdrojové napěťové vlny
b_1, b_2	Odražené napěťové vlny
U_{i1}, U_{i2}	Napětí pro zdrojové vlny na dané bráně (V)
U_{r1}, U_{r2}	Napětí pro odražené vlny od dané brány (V)
U_S, Z_S	Napětí a impedance zdroje (V; Ω)
Z_L	Impedance zátěže (Ω)
s_{11}	Vstupní koeficient odrazu
s_{12}	Zpětný přenosový koeficient
s_{21}	Přenosový koeficient
s_{22}	Výstupní koeficient odrazu
DUT	Device Under Test

Úvod

Tato diplomová práce porovnává propojovací struktury na desce plošných spojů s propojovacími strukturami na textilním substrátu.

Ve vysokofrekvenční technice často využíváme jako propojovací strukturu planární mikrovlnné vedení, mezi které patří mikropáskové vedení, koplanární a šěrbinové vedení. Tato vedení pracují v oblasti mikrovln čili s frekvencí v řádu jednotek až desítek GHz.

Textilní propojovací struktury jsou vytvářeny výrobními technologiemi (například vyšíváním), které jsou především známé z textilního průmyslu.

Tato diplomová práce je rozdělena do pěti hlavních částí. První část teoreticky popisuje především propojovací struktury na desce plošných spojů a na textilních substrátech, věnuje se jednotlivým planárním mikrovlnným vedením, problematice kontaktování, používaným materiálům pro propojovací struktury na textilních substrátech a textilním výrobním procesům vodivých propojovacích struktur. Druhá část je zaměřena na konkrétní návrh a realizaci textilních propojovacích struktur. Ve třetí části je uveden návrh a realizace kontaktování textilních propojovacích struktur. Čtvrtá část obsahuje teoretické výpočty pro realizované vzorky. V poslední části této práce jsou zdokumentovány a zpracovány naměřené hodnoty a výpočty vysokofrekvenčních parametrů propojovacích struktur.

Cílem této práce je porovnat a zhodnotit získané výsledky z měření vysokofrekvenčních parametrů realizovaných vyšívaných propojovacích struktur a propojovacích struktur na desce plošných spojů.

1 Propojovací struktury

Propojovací struktura na desce plošných spojů (DPS) obecně představuje vodivý motiv a zahrnuje plošné vodiče, pájecí a kontaktní plošky, součástkové a signálové otvory, chladiče a pasivní prvky. DPS zajišťuje nosnou funkci pro elektronické součástky a mechanické prvky, odvádí ztrátové teplo a také poskytuje funkci elektrického i optického propojovacího členu mezi elektronickými součástkami a systémy. DPS musí splňovat elektrické, mechanické, tepelné, chemické a optické požadavky. Propojovací struktura může být provedena jako jednovrstvá DPS (vodivý motiv je vytvořen pouze na jedné straně elektroizolačního substrátu), dvouvrstvá DPS (vodivý motiv se nachází na každé straně substrátu s pokovenými otvory, které zajišťují jejich elektrické propojení) nebo vícevrstvá DPS s určitým způsobem a hustotou propojení a to se třemi či více vodivými motivy, které jsou vzájemně propojeny. Propojovací struktury můžeme rozdělit podle typů použitého dielektrika na monolitické propojovací struktury (je použit jeden druh dielektrika), na modulární propojovací struktury a na modulárně hybridní propojovací struktury (u těchto dvou zmíněných struktur jsou použity různé druhy dielektrik a vyskytují se u vícevrstevných propojovacích struktur). Propojovací struktury mohou také být ohebné či neohebné. [1]

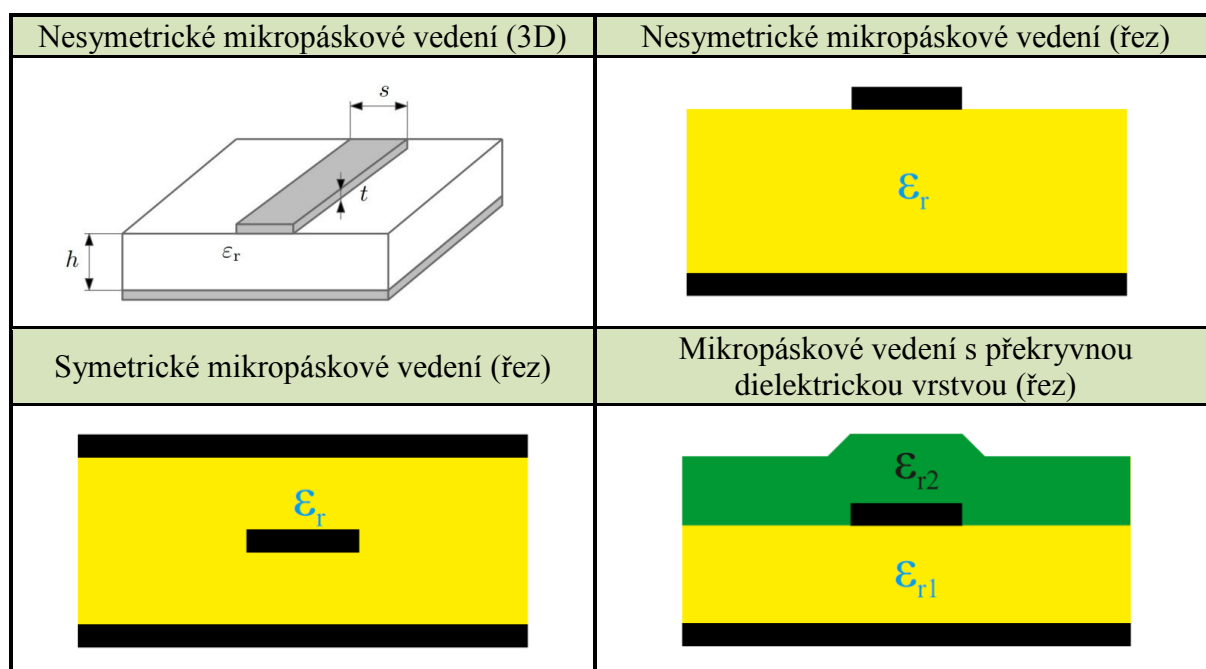
Pro vysokofrekvenční aplikace často využíváme jako propojovací strukturu planární mikrovlnná vedení, kterými v současné době jsou mikropáskové vedení, štěrbinové vedení a koplanární vedení. [2], [3]

1.1 Planární mikrovlnná vedení

Planární mikrovlnná vedení pracují v oblasti mikrovln o vlnové délce 0,1 m až 0,3 mm (používaná frekvence je v těchto vedeních v řádu jednotek až desítek GHz). Planární vedení je tedy využíváno ve vysokofrekvenční technice a představuje strukturu, která obsahuje zemní plochu, dielektrickou vrstvu a vlastní vedení (např. z kovových pásků), které je rovnoběžné se zemní plochou. Planární struktury se vyznačují nízkou hmotností, malými rozměry, nenáročností výroby, nízkými výrobními náklady, vyšší spolehlivostí a stabilitou parametrů. Obecně lze planární mikrovlnná vedení rozdělit na otevřená a stíněná. Dále lze tato vedení rozdělit na jednotlivé typy (např. mikropáskové a koplanární vedení, které můžeme také realizovat například procesem vyšívání, který je vysvětlen v kapitole 1.5.1). [3], [4], [5]

1.1.1 Mikropáskové vedení

Mikropáskové vedení je považováno za základní typ planárního vedení a je tvořeno vedením ve formě mikropásku (viz obr. 1), který je umístěn na daném substrátu o tloušťce h a relativní permitivitě ϵ_r . Na druhé straně tohoto substrátu je vytvořena kovová zemní plocha. Parametry tohoto planárního vedení, které charakterizují elektrické vlastnosti, jsou vlnová impedance Z_0 a kvůli různým prostředím zavedená ekvivalentní (neboli také efektivní) relativní permitivita ϵ_{re} , která závisí na geometrických rozměrech mikropáskového vedení. Vzhledem k příčné nehomogenitě vytvořeného vedení se zde nemůže šířit TEM vlna (TEM vlna má kolmé vektory elektrické a magnetické složky, které jsou zároveň kolmé na směr šíření této elektromagnetické vlny), ale šíří se zde hybridní elektromagnetická vlna HEM s disperzí. V některých případech můžeme složky pole ve směru šíření zanedbat, potom používáme označení kvazi-TEM vlna. Existuje několik základních typů mikropáskového vedení, které jsou zobrazeny na obrázku 1 níže. Mezi výhody této struktury patří jednoduchá konstrukce a její snadná realizace. [3], [5], [6]



Obrázek 1 Základní typy mikropáskového vedení (převzato z [5], [7])

Efektivní relativní permitivitu ϵ_{re} (-) a vlnovou impedanci Z_0 (Ω) pro velmi tenké vodivé vrstvy lze vypočítat ze vztahů uvedených níže, kde ϵ_r je relativní permitivita substrátu. Pro

tato vedení uvažujeme pouze jedno dielektrikum, kdy nahradíme dvě různá prostředí ϵ_r a ϵ_0 (permitivita vzduchu) prostředím homogenním o efektivní relativní permitivitě. Uvedené rovnice jsou pouze přibližné, neberou v úvahu tloušťku t mikropásku a jsou rozděleny na dva konkrétní případy řešení. [6], [7], [8]

- Pro $(s/h) < 1$:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[\left(1 + 12 * \frac{h}{s} \right)^{-0,5} + 0,04 * \left(1 - \frac{s}{h} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{120 * \pi}{2 * \pi * \sqrt{\epsilon_{re}}} * \ln \left(\frac{8 * h}{s} + 0,25 * \frac{s}{h} \right) \quad (2)$$

- Pro $(s/h) \geq 1$:

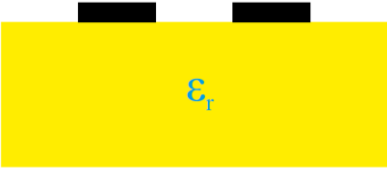



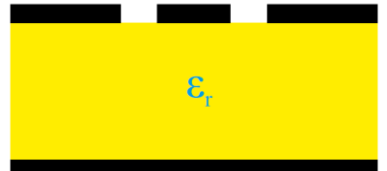
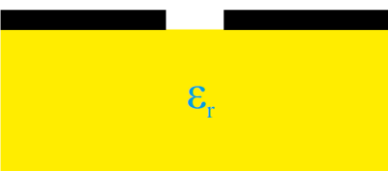
$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left(1 + 12 * \frac{h}{s} \right)^{-0,5} \quad (3)$$

$$Z_0 = \frac{120 * \pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} * \left[\frac{s}{h} + 1,393 + 0,677 * \ln \left(\frac{s}{h} + 1,444 \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

1.1.2 Koplanární a štěrbinové vedení

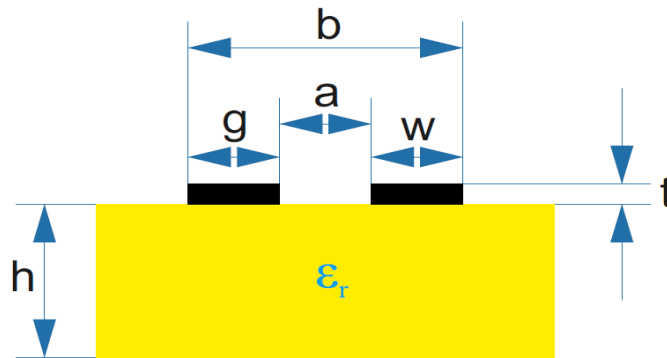
Koplanární vedení je dalším často používaným typem planárního vedení. U koplanárního vedení jsou kovová zemní plocha a vedení ve formě vodivého pásku vytvořeny pouze na jedné straně dielektrické podložky (substrátu). Výhody tohoto vedení jsou opět jednoduchá konstrukce, realizace a také snadné navázání sériových prvků (podobně jako u mikropáskového vedení) a zde navíc i paralelních prvků. Skutečné koplanární vedení obsahuje kovové vrstvy konečné tloušťky i vodivosti, avšak analýza pro toto vedení pracuje s určitým zjednodušením a zanedbáním. Koplanární vedení může být vytvořeno jako symetrické, nesymetrické, dvouvodičové, třívodičové nebo jinými požadovanými způsoby (viz obrázek 2). V souvislosti s tímto koplanárním vedením se můžeme setkat také s pojmem štěrbinové vedení, které je opět vytvořeno pouze na jedné straně substrátu (viz obr. 2). U štěrbinového vedení nelze kvůli velké disperzi vlny HEM provést aproximaci vlnou kvazi-

TEM. [3], [5], [9]

KOPLANÁRNÍ VEDEDNÍ (ŘEZ)	
Symetrické	Nesymetrické
	
KOPLANÁRNÍ VLNOVOD (ŘEZ)	
Symetrický	Nesymetrický
	
KOPLANÁRNÍ VLNOVOD S POKOVENÝM SUBSTRÁTEM (ŘEZ)	ŠTĚRBINOVÉ VEDEDNÍ (ŘEZ)
	

Obrázek 2 Základní typy koplanárního vedení a štěrbinové vedení (převzato z [5])

Výpočet efektivní relativní permitivity ϵ_{re} (-) a vlnové impedance Z_0 (Ω) symetrického koplanárního vedení je znázorněn pomocí následujících rovnic, kde $K(k)$ označujeme jako úplný eliptický integrál 1. druhu, pro který jsou dostupné tabulkové hodnoty a aproximativní vyjádření. Doplnkem tohoto integrálu je potom $K'(k)$ neboli také $K(k')$. Oba tyto integrály jsou závislé na parametru k , což představuje modul Jacobiho eliptických funkcí a k' je opět jeho doplnkem. Pro řešení koplanárního vedení i koplanárního vlnovodu lze využít (podobně jako u mikropáskového vedení) metodu konformního zobrazení, kdy transformujeme danou strukturu na strukturu, která obsahuje pouze jedno dielektrikum o efektivní relativní permitivitě ϵ_{re} . [5], [9], [10], [11]



Obrázek 3 Symetrické koplanární vedení (převzato z [5])

$$k = \frac{a}{b} \quad (5)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot a}{4 \cdot h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot b}{4 \cdot h}\right)} \quad (7)$$

$$k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (8)$$

- Pro $0 \leq K(k) / K(k') \leq 1$ a $0 \leq k \leq 0,707$:

$$\frac{K(k)}{K(k')} \cong \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(2 \cdot \frac{\sqrt{1+k'} + \sqrt[4]{4 \cdot k'}}{\sqrt{1+k'} - \sqrt[4]{4 \cdot k'}}\right)} \quad (9)$$

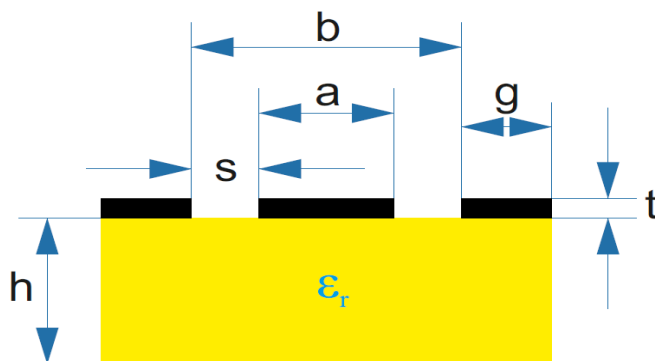
- Pro $1 \leq K(k) / K(k') \leq \infty$ a $0,707 \leq k \leq 1$:

$$\frac{K(k)}{K(k')} \cong \frac{1}{2 \cdot \pi} * \ln\left(2 * \frac{\sqrt{1+k} + \sqrt[4]{4 \cdot k}}{\sqrt{1+k} - \sqrt[4]{4 \cdot k}}\right) \quad (10)$$

$$\epsilon_{re} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \frac{K(k')}{K(k)} * \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \quad (11)$$

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} * \frac{K(k)}{K(k')} \quad (12)$$

Velmi podobným způsobem jako v předchozím případě lze řešit i symetrický koplanární vlnovod, pro který platí následující rovnice. [5], [11]



Obrázek 4 Symetrický koplanární vlnovod (převzato z [5])

$$k = \frac{a}{b}; k_t = \frac{a_t}{b_t} = \frac{a + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot a}{t}\right) \right]}{b - \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot a}{t}\right) \right]} \quad (13)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}; k_t' = \sqrt{1 - k_t^2} \quad (14)$$

$$k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot a_t}{4 \cdot h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot b_t}{4 \cdot h}\right)} \quad (15)$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (16)$$

- Pro $0 \leq K(k) / K(k') \leq 1$ a $0 \leq k \leq 0,707$:

$$\frac{K(k)}{K(k')} \cong \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(2 \cdot \frac{\sqrt{1+k'} + \sqrt[4]{4 \cdot k'}}{\sqrt{1+k'} - \sqrt[4]{4 \cdot k'}}\right)} \quad (17)$$

- Pro $1 \leq K(k) / K(k') \leq \infty$ a $0,707 \leq k \leq 1$:

$$\frac{K(k)}{K(k')} \cong \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{\sqrt{1+k} + \sqrt[4]{4 \cdot k}}{\sqrt{1+k} - \sqrt[4]{4 \cdot k}}\right) \quad (18)$$

$$\epsilon_{re} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{K(k')}{K(k)} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (19)$$

$$\epsilon_{re,t} = \epsilon_{re} - \frac{\epsilon_{re} - 1}{\frac{(b-a)/2}{0,7 \cdot t} \cdot \frac{K(k)}{K(k')} + 1} \quad (20)$$

$$Z_0 = \frac{30 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{re,t}}} \cdot \frac{K(k_t')}{K(k_t)} \quad (21)$$

1.2 Kontaktování

Pro kontaktování propojovacích struktur ve vysokofrekvenčním (VF) spektru lze využít koaxiální vysokofrekvenční konektory (jejich ukázky viz obr. 5), které jsou obecně velmi náročné na výrobu a výběr konkrétního typu závisí na požadované aplikaci. VF konektory se zabývají normy IEC (jedná se o označení mezinárodních norem v elektrotechnice), které definují jejich vysokofrekvenční vlastnosti a tolerance. V současné době rozlišujeme koaxiální vysokofrekvenční konektory podle typu konstrukce a velikosti (viz tabulka 1) na mikrominiaturní, subminiaturní, miniaturní, středně velké, velké a precizní. VF konektory bývají vyrobeny z vysoce kvalitních materiálů (skládají se z odolných izolačních materiálů např. teflonu a z postříbřených nebo pozlacených kontaktů), díky kterým je zaručena vyšší trvanlivost, životnost, spolehlivost a vysoká mechanická stabilita. VF konektory jsou často využívány pro různá testování či měření až do hodnoty frekvence přibližně 67 GHz a jsou vyráběny s hodnotou impedance 50 nebo případně 75 Ohmů. [12], [13], [14], [15]



Obrázek 5 Ukázky koaxiálních vysokofrekvenčních konektorů (převzato z [15])

Tabulka 1 Přehled koaxiálních VF konektorů (převzato z [13])

TYP KONSTRUKCE	OZNAČENÍ ŘADY	POPIS A ODVĚTVÍ APLIKACE
Mikrominiaturní	MCX	západkový spojovací mechanismus, pro frekvence do 6 GHz; pro testování, měření a telekomunikace
	MMCX	
	MMBX	západková a zasouvací konstrukce pro spojení deska – deska, pro frekvence do 12,5 GHz
	MMPX	pro frekvence do 65 GHz
Subminiaturní	BMA	zasouvací spojovací mechanismus, pro frekvence do 18 GHz, snadná montáž, spolehlivost; použití v leteckém odvětví
	QMA	rychle uzamykatelný spojovací mechanismus, pro frekvence do 18 GHz; pro telekomunikace
	SMA	závitový spojovací mechanismus, frekvence do 26,5 GHz, vysoká mechanická pevnost; testování a měření
	SMB	západkový spojovací mechanismus, pro frekvence do 4 GHz, pro rychlé spojení a rozpojení; telekomunikace
	SMC	závitový spojovací mechanismus, pro frekvence do 10 GHz; použití v leteckém odvětví a pro telekomunikace
	SMS	zasouvací spojovací mechanismus, pro frekvence do 4 GHz
	QLA	spojovací mechanismus ve formě rychlé západky, pro frekvence do 2 GHz
Miniaturní	BNC	bajonetový spojovací mechanismus, 50 Ohmová verze (pro frekvence do 4 GHz) a 75 Ohmová verze (pro frekvence do 1 GHz); pro testování a měření
	BNO	bajonetový spojovací mechanismus, pro frekvence do 200 MHz; datová komunikace
	BNT	bajonetový spojovací mechanismus, pro frekvence do 3 GHz; pro testování a měření
	MHV	bajonetový spojovací mechanismus, pro frekvence do 400 MHz, pracovní napětí do 2,2 kV; zdravotnická zařízení a pro vysokonapěťové aplikace
	SHV	bajonetový spojovací mechanismus, pro frekvence do 400 MHz, pracovní napětí do 5 kV; zdravotnická zařízení a pro vysokonapěťové aplikace
	TNC	závitový spojovací mechanismus, pro frekvence do 11 GHz; pro testování a měření
Středně velké	N	závitový spojovací mechanismus, pro frekvence do 18 GHz; pro testování, měření a telekomunikace
	QN	rychle uzamykatelný spojovací mech., pro frekvence do 11 GHz; testování, měření a telekomunikace
Velké	7/16	závitový spojovací mechanismus, pro frekvence do 7,5 GHz, označení je dáno rozměry; telekomunikace
Precizní	PC3,5	závitový spojovací mechanismus, pro frekvence do 26,5 GHz; pro testování a měření
	SK	závitový spojovací mechanismus, pro frekvence do 40 GHz; pro testování a měření

1.3 Propojovací struktury na textilních substrátech

Propojovací struktury mohou být také vytvářeny na textilních substrátech (např. jako součást oděvů a funkčních textilií pro tzv. smart textilie) výrobními technologiemi, které jsou především známé z textilního průmyslu. [16], [17]

Smart textilie lze rozdělit do tří kategorií, kterými jsou pasivní smart textilie, aktivní smart textilie a velmi inteligentní smart textilie. Pasivní smart textilie nemají jako jediné schopnost rozpoznat změnu vnějšího prostředí nebo podnětů, protože jejich struktura obsahuje pouze senzory. Aktivní smart textilie jsou vybaveny senzory a akčními členy, proto umí rozpoznat změnu vnějšího prostředí či podnětů, avšak jejich reakce na tyto podněty je stále stejná. Velmi inteligentní smart textilie (například nositelná elektronika na oblečení) mají ve své struktuře zakomponované senzory, kontrolní jednotku, akční členy, systémy pro přenos a uložení dat a zdroj energie (např. baterie). Velmi inteligentní smart textilie tedy tvoří soběstačný systém, který se dokáže přizpůsobit a lépe tak zareagovat na vnější prostředí nebo podněty. [18]

Vývoj smart textilií a jejich následná výroba se neobejdou bez součinnosti materiálového inženýrství, strukturní mechaniky, biologie, medicíny, chemie, mikroelektroniky a elektrotechniky. Smart textilie mají řadu výhod, mezi které patří například nenáročná údržba, trvanlivost, nízká hmotnost, flexibilita (pružnost a ohebnost), poměrně snadná výroba a přijatelná cena. Smart textilie (ukázky jejich aplikace viz obrázek 6) lze aplikovat v dopravním průmyslu (zejména pro odstranění nadbytečné kabeláže, tím snížit váhu dopravního prostředku a tím spotřebované palivo), ve zdravotnictví (např. nemocniční inteligentní matrace, která dokáže snímat teplotu lidského těla, krevní tlak či EKG; základní myšlenkou v tomto případě je, aby se pacient v těžkém stavu mohl snadněji pohybovat na lůžku a nebyl zbytečně obklopen jemu překážejícími kabely, ke kterým je připojen), u profesionálních hasičů, vojáků či sportovců (senzory a antény zabudované do textilních materiálů). [18], [19]

<p>SPORTOVNÍ TEXTILIE SE SENZORY TEPOVÉ FREKVENCE, TLAKU CHODIDLA A DALŠÍMI SENZORY</p>		
<p>CHYTRÝ HASIČSKÝ OBLEK S TEPLOTNÍMI A DALŠÍMI SENZORY</p>		
<p>CHYTRÝ VOJENSKÝ OBLEK SE SENZORY A KLÁVESNICÍ</p>		<p>CHYTRÝ PŘEPÍNAČ V BUNDĚ</p> 
<p>TEXTILNÍ SENZORY A PŘEPÍNAČ V DOPRAVNÍM PROSTŘEDKU</p>		
<p>SMART TEXTILIE PRO MONITOROVÁNÍ EKG A TEPOVÉ FREKVENCE VE ZDRAVOTNICTVÍ</p>		

Obrázek 6 Aplikace smart textilií (převzato z [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28])

1.4 Materiály používané pro textilní propojovací struktury

Smart textilie využívají k vytvoření integrované inteligentní struktury různé druhy materiálů, kterými lze vytvořit vodivé příze, vodivé nitě, vodivé pasty a vodivé inkousty. Výsledná vytvořená vodivá vlákna, pasta či inkoust musí splňovat několik základních požadavků, kterými jsou odolnost (např. vůči praní), spolehlivost, pružnost, ohebnost, měly by být lehké, levné a nenáročné z hlediska výroby. Důležitými vlastnostmi těchto vodivých vláken (pasta nebo inkoustů) jsou elektrická vodivost (což je převrácená hodnota elektrického odporu a představuje schopnost daného materiálu vést elektrický proud), pevnost v tahu, rozměrové a povrchové vlastnosti, snímací schopnosti a přenos dat. [17], [29], [30], [31]

1.4.1 Vodivé příze

Vodivá příze představuje vodivé vlákno (polymerní vlákno) určité délky a průměru (řádově mikrometry), které je složeno z několika paralelně umístěných vodivých a nevodivých vláken, jejichž soudržnost je dána zákrutem. Vodivé příze lze rozdělit na tři druhy, kterými jsou vodivá příze s kovovým jádrem, vodivá příze s nevodivým jádrem a vodivá příze bez jádra. [32], [33]

1.4.1.1 Vodivá příze s kovovým jádrem

Z uvedeného názvu je patrná struktura této příze (viz obrázek 7), ve které je vytvořeno jádro z tenkého kovového vodivého materiálu (monofilament ze stříbra, mědi, zlata, hliníku, mosazi nebo bronzu) a obal je zhotoven z textilních nevodivých materiálů (například polyester, polyamid, aramid nebo bavlna). U tohoto typu příze mají textilní nevodivá vlákna funkci ochrany a elektrické izolace a zároveň použitá textilní vlákna zlepšují mechanické vlastnosti samotné příze podobně jako u ostatních druhů příze. [33], [34]



Obrázek 7 Vodivá příze s kovovým jádrem (převzato z [33])

V tomto odstavci budou vysvětleny základní pojmy používané v textilní terminologii. Útvar, který je složen z jediného filamentu neboli vlákna neomezené délky, nazýváme

monofilament a pokud daný útvar sestává z více vláken (struktura se zákrutem nebo bez zákrutu), pak je označován jako multifilament. [35]

Tabulka 2 zobrazuje různé elektrické vlastnosti používaných kovových monofilamentů, které mohou být zkombinovány se všemi typy vláken nebo používány přímo pro tkaní a pletení. Teplotní součinitel odporu α vyjadřuje změnu odporu při zvýšení teploty o 1 Kelvin a měrný elektrický odpor ρ znázorňuje odpor daného materiálu o průřezu 1 mm^2 a délce 1 m. Z tabulky 2 je patrné, že nejvyšší hodnotu měrné elektrické vodivosti (tudíž nejnižší měrný elektrický odpor) má zde stříbro. [34], [36]

Tabulka 2 Elektrické vlastnosti kovových monofilamentů (převzato z [34])

Materiál (kov)	Měrná elektrická vodivost γ (S.m/mm ²)	Měrný elektrický odpor ρ (Ω .mm ² /m)	Teplotní součinitel odporu α (10^{-6} K^{-1})		
			Min	Obvyklá hodnota	Max
Cu	58,5	0,0171	3900	3930	4000
Cu/Ag (postříbřená měď)	58,5	0,0171	3900	4100	4300
Ag 99%	62,5	0,0160	3800	3950	4100
Ms (mosaz)	16,0	0,0625	1400	1500	1600
Ms/Ag	16,0	0,0625	1400	1500	1600
AgCu	57,5	0,0174	3800	3950	4100
Bronz	7,5	0,1333	600	650	700
Ocel 304	1,4	0,7300	-	1020	-
Ocel 316L	1,3	0,7500	-	1020	-

1.4.1.2 Vodivá příze s nevodivým jádrem

Vodivá příze s nevodivým jádrem (viz obrázek 8) má podobnou strukturu jako v předchozím typu příze, avšak jádro je v tomto případě tvořeno textilním nevodivým materiálem a jako obal je použit kovový vodivý materiál. Kovové materiály mohou být nanášeny na povrch textilního vlákna různými metodami, kterými jsou zejména pokovování vodivým polymerem, elektrolytické pokovování, naprašování a odpařování. [33], [34]

Polymer představuje makromolekulární látku, která může být organického nebo anorganického charakteru, kde se v molekulární struktuře opakuje základní jednotka zvaná mer. Polymery patří do skupiny látek, které označujeme jako elektrické izolanty. Kromě těchto klasických nevodivých polymerů jsou v současné době také využívány v mikroelektronice tzv. vodivé polymery, které mají ve své molekulární struktuře konjugované vazby, ve kterých se pravidelně střídá jednoduchá a dvojná vazba. Vodivé polymery vynikají mimořádně dobrou elektrickou vodivostí (dopováním určitými prvky jsme zde schopni dosáhnout elektrické vodivosti materiálu), svými elektrickými vlastnostmi připomínají polovodiče a používají se jako elektrovodivé povlaky na různých materiálech. Mezi nejpoužívanější vodivé polymery patří polypyrrol, polythiofen, polyanilin, polyfenylen a poly (p-fenylenvinylen). [37], [38], [39]



Obrázek 8 Vodivá příze s nevodivým jádrem (převzato z [33])

1.4.1.3 Vodivá příze bez jádra

Tento druh vodivé příze (viz obrázek 9) jako jediný z uvedených druhů příze neobsahuje jádro. Strukturu se zákrutem tvoří pouze kovová vodivá vlákna z filamentů nebo staplových vláken. Staplové vlákno je v textilní terminologii textilní prvek, který je charakterizován malým průměrem a krátkou délkou (oproti filamentu). Staplová vlákna mohou být přírodního nebo chemického původu. Základní materiál (kovový drát) určený pro následné vytvoření příze je nejprve vystaven procesu tažení, po kterém následuje proces zvaný žihání (probíhá v rozsahu teplot 600 až 900 °C) a nakonec je daný materiál prudce ochlazen. [33], [34], [40]



Obrázek 9 Vodivá příze bez jádra (převzato z [33])

1.4.2 Vodivé nitě

Struktura vodivé nitě obvykle obsahuje nevodivé jádro (často se jedná o bavlnu, polyester či jiný materiál), které je pokoveno různými kovy (např. stříbro, měď, cín nebo nikl). Této struktury může být dosaženo např. prostřednictvím procesu, který je označován jako bezproudá depozice, kdy dochází na základě chemické reakce k pokrytí monofilního vlákna kovovým materiálem. Takto vytvořené vodivé nitě mají průměr v řádech mikrometrů, jsou neizolované a bývají využívány pro smart textilie neboli jako nositelná technologie například pro přenos dat, vyhřívací prvky nebo mohou také být použity jako elektrody pro monitorování EKG. Kromě těchto zmíněných vodivých nití existují také tzv. elektricky vodivé hybridní nitě, které představují kombinaci syntetického filamentu (např. z polyesteru nebo polyamidu) a určitého počtu setkaných kovových vláken např. na bázi postříbřené mědi. Tyto vodivé hybridní nitě jsou především charakteristické svými dobrými elektrickými vlastnostmi a jsou opět vhodné pro standardní textilní výrobní procesy. [41], [42], [43], [44]

1.4.3 Vodivé pasty

Vodivé pasty slouží k vytvoření kovové vodivé plochy, která je umístěna na textilním substrátu pomocí technologie sítotisku. Technologie sítotisku je popsána níže a to v kapitole 1.5.4. [45]

Vodivé pasty obsahují tři složky, kterými jsou vodivé plnivo (vodivé částice; nejdůležitější složka vodivé pasty), rozpouštědlo a adhezivum. Každá tato složka ovlivňuje výsledné elektrické a mechanické vlastnosti. Mezi hlavní charakteristiky vodivých částic patří jejich elektrická a chemická stabilita a navíc cena vodivých částic hraje důležitou roli z hlediska aplikace ve velkém měřítku. Chemická stabilita vodivých částic je závislá na jejich oxidaci a případné korozi. Oba tyto jevy budou negativně ovlivňovat vodivý systém. Pro vodivé pasty lze použít jako vodivé částice různé materiály (například stříbro, měď, hliník, zlato, uhlík a nikl). Nejpoužívanějším materiálem je stříbro, které má vysokou konduktivitu (měrnou elektrickou vodivost) o hodnotě $6,3 \cdot 10^7$ S/m a jeho výhodou v porovnání s ostatními kovy je, že jeho oxidy v tomto případě zůstávají vodivé na rozdíl od mědi a hliníku. Dalšími vhodnými materiály pro vodivé plnivo je měď a hliník vzhledem k jejich konduktivitě (měď: $5,96 \cdot 10^7$ S/m; hliník: $3,78 \cdot 10^7$ S/m) a ceně. Nevýhodou mědi je, že snadno oxiduje (ovšem hliník oxiduje rychleji než měď) na vzduchu a oba tyto materiály musí být zpracovány v inertním (nereaktivním) prostředí. Zlato je také často využíváno jako vodivé plnivo kvůli jeho vysoce vodivé (konduktivita: $4,42 \cdot 10^7$ S/m) a inertní povaze a jeho hlavní nevýhodou je

vysoká cena. Výběr vodivého plniva je tedy především založen na jeho vodivosti, ceně a reakci na vzduchu. Každá tato vodivá částice má své vlastní výhody a nevýhody. Adheziva jsou používána ve vodivých pastách z toho důvodu, že zajišťují soudržnost materiálu a jeho přilnavost na daný substrát. Rozpouštědla jsou zde také nezbytnou složkou, jelikož zabraňují částicím z jejich seskupení a napomáhají dopravit vodivou pastu na požadované místo v daném substrátu. Jakmile je vodivá pasta nanášena na substrát, rozpouštědlo již přestává být důležitou složkou. V průběhu procesu vytvrzování vodivé pasty dochází k tomu, že se rozpouštědlo začne odstraňovat a nakonec dochází k vytvoření výsledné vodivé struktury. [45]

Sledovanými vlastnostmi u vodivých past jsou například viskozita, přilnavost, teplota vytvrzování, doba vytvrzování, trvanlivost, obsah vodivého materiálu v procentech, obsah pevných částic v procentech, jemnost pasty, vysychavost, tloušťka nanášené vrstvy v mikrometrech, modul pružnosti, tepelná a elektrická vodivost. [45]

1.4.4 Vodivé inkousty

Vodivé inkousty obsahují vhodný vysoce vodivý kovový prekurzor, který představuje částice, pomocí kterých vzniká chemickou přeměnou výsledný produkt. Pro prekurzor lze použít různé materiály např. stříbro (opět zde nejpoužívanější materiál), měď, zlato a uhlík. Většina vodivých inkoustů je na bázi vody, která zde tvoří hlavní složku vodivého inkoustu a je tedy potřeba napřed odstranit znečišťující látky z vody. Vodivé inkousty mohou také obsahovat určitá aditiva, která upravují a zlepšují vlastnosti výsledného inkoustu. Vodivé inkousty mohou být natištěny na různé textilní substráty metodou nazývanou inkoustový tisk (je popsán níže v kapitole 1.5.5) a tím dochází k vytvoření elektricky aktivní plochy. [34]

Vodivé inkousty používané pro technologii inkoustového tisku by měly splňovat následující požadavky. [34]

- vysoká elektrická vodivost
- odolnost proti oxidaci
- dobrá přilnavost k substrátu
- vhodná viskozita a povrchové napětí
- nižší seskupování částic
- být v takovém stavu, aby nedošlo k ucpání trysky během tisku

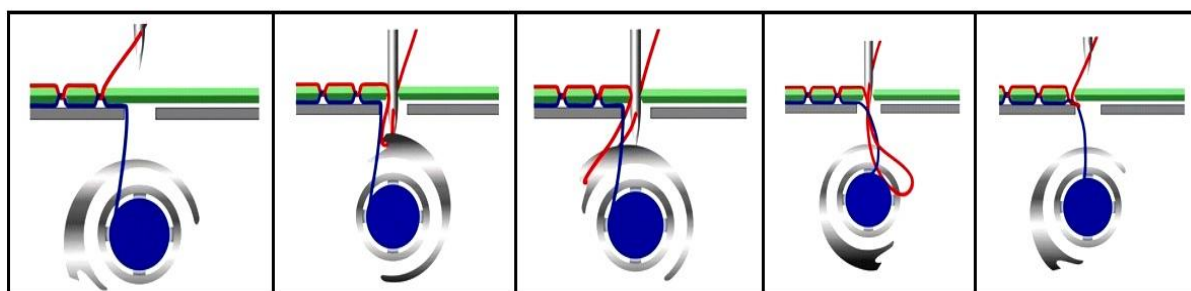
1.5 Výrobní procesy vodivých propojovacích struktur

V současné době existuje několik výrobních procesů, kterými jsou vyšívání, šití, tkaní, pletení, sítotisk, inkoustový tisk a naprašování. Těmito procesy lze vytvořit například vodivé propojovací struktury, antény, textrody (textilní elektrody) nebo senzory. [17]

1.5.1 Vyšívání

Tento výrobní proces využívá základní vyšívací prvek, který označujeme jako steh. Existuje celá řada metod, kterými lze tyto stehy vytvářet. Pomocí stehu dokážeme připevnit a začlenit různé materiály ve formě vlákna do požadované textilní struktury. V tomto procesu jsou vodivé nitě či příze vyšívány do textilních substrátů, které mohou představovat tkaný, netkaný nebo pletený izolační materiál. Samotné vyšívání může probíhat ručně nebo strojově prostřednictvím šicího stroje, u kterého před samotným procesem vyšívání nejsou vyžadovány speciální úpravy. Vodivé nitě či příze jsou při vytváření vodivých drah či prvků ohýbány, a tudíž vystaveny různému namáhání a tření, proto musí být tato vodivá vlákna dostatečně pevná, pružná a ohebná, aby nedošlo k jejich rozlomení (k rozlomení vodivého vlákna může ovšem docházet i u tkané a pletené struktury, ale s menší pravděpodobností než u vyšívané struktury). Výhodou tohoto výrobního procesu je, že vodivá vlákna lze vyšít do textilního substrátu v jakémkoliv požadovaném tvaru a směru. Naopak nevýhodou je, že vyšíváním nelze vytvořit vícevrstvé obvody, kde by vodivá vlákna procházela různými vrstvami, což umožňují tkané obvody. [17], [46]

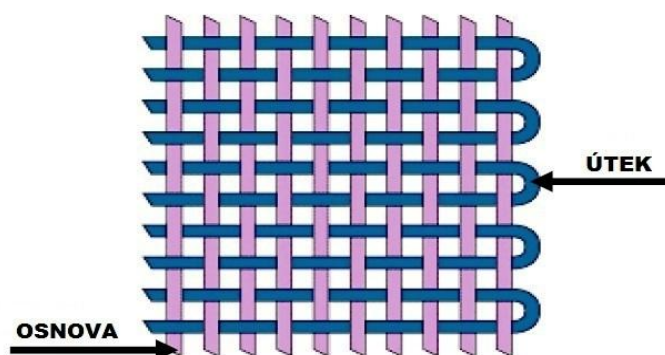
U strojového vyšívání pomocí šicího stroje (viz obrázek 10) probíhá pět základních kroků. V prvním kroku (zleva) začne jehla pronikat do textilního materiálu, aby přenesla horní červené vlákno do oblasti rotačního mechanismu s háčkem. Ve druhém kroku se jehla vrací zpět nahoru a utváří smyčku z tohoto vlákna, kterou zachytí háček. Ve třetím kroku je tato smyčka přesouvána rotačním mechanismem a dochází k přehození přes modré vlákno z cívky. Ve čtvrtém kroku vyklouzne smyčka z háčku a v pátém kroku jsou tato vlákna přitáhnuta a upevněna ve formě vázaného stehu. [47], [48]



Obrázek 10 Strojové vyšívání pomocí šicího stroje (převzato z [48])

1.5.2 Tkaní

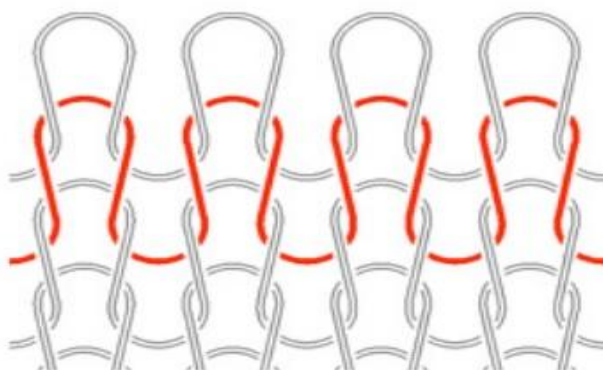
Výrobní proces tkaní představuje další způsob, kterým lze vodivá vlákna začlenit do textilních materiálů. Tkaní je založeno na opakovaném vzájemném křížení mezi dvěma skupinami ortogonálních vláken, která nazýváme osnova a útek (viz obrázek 11 níže). Tato kolmá vlákna jsou tedy vzájemně protkána do požadované struktury, která vytváří daný elektrický obvod. Proces tkaní může opět probíhat ručně nebo strojově. Strojové tkaní je realizováno běžným tkacím strojem, nicméně jsou zde vyžadovány patřičné modifikace stroje vzhledem k použití vodivých vláken, která musí být umístěna ve směru osnova a to na předem stanovených pozicích. Tkaním lze vytvářet poměrně složité a vícevrstvé obvody v textilní struktuře, avšak výsledná tkaná struktura se vyznačuje nízkou flexibilitou. [17], [49]



Obrázek 11 Princip tkaní (převzato z [49])

1.5.3 Pletení

Tento výrobní proces vytváří vodivou strukturu (viz obrázek 12 níže), která je složena ze sériově propojovaných smyček. Pletení z hlediska výroby rozdělujeme na ruční a strojní (pomocí pletacího stroje), kde mohou být vpletena vodivá vlákna (vodivé nitě či příze) mezi nevodivá vlákna pouze jedním konkrétním směrem. Výsledná struktura pleteniny je v porovnání s tkanou strukturou mnohem flexibilnější a velmi prodyšná, a tudíž výhodnější pro smart textilní aplikace. [17], [50]

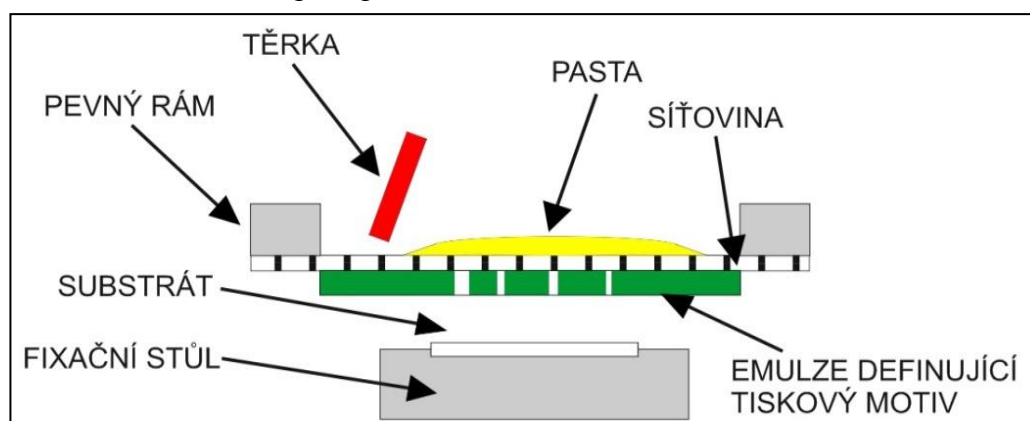


Obrázek 12 Princip pletení (převzato z [50])

1.5.4 Sítotisk

Technologie sítotisku je v současné době velmi často využívána jak v elektronice (např. tištěné elektrické struktury), tak také v jiných oblastech průmyslu. Technologie sítotisku může využívat k tisku různé vhodné materiály (pro účely této práce se jedná zejména o vodivé pasty), které jsou technologickým procesem přeneseny na téměř libovolný substrát (např. textilie, plast, kov, sklo, papír nebo jiné vhodné materiály). Existují ruční, poloautomatická a automatická sítotisková zařízení. Sítotisk označujeme jako tlustovrstvou metodu a představuje poměrně jednoduchou a finančně dostupnou technologii. Za nevýhody této technologie v souvislosti s použitím vodivé pasty lze považovat její poměrně nízkou mechanickou odolnost a její nerovnoměrnou vodivost při ohýbání. [17], [34], [51], [52]

Sítotisk (viz obrázek 13) je aditivní proces, při kterém dochází pomocí třerky k protlačení dané vodivé pasty přes síto (rám a síťovina) s vytvořenou tiskovou šablonou na upevněný textilní substrát. Síťovina (parametry síťoviny: elasticita, tloušťka vláken, velikost ok a počet vláken na cm) může být například tvořena napnutou tkaninou z polyesteru, na kterou je nanášena světlocitlivá vrstva (fotoemulze), která je následně přes vytvořenou filmovou matici osvětlena UV zářením. Tím vytvrdnou požadovaná osvětlená místa, která jsou poté vypláchnuta proudem vody a vysušena. Takto je vytvořen požadovaný tiskový motiv, kterým bude procházet vodivá pasta. Po nanášení vodivé pasty na předem určená místa v textilním substrátu následuje proces vytvrzování, který je vzhledem k textilnímu materiálu realizován v délce maximálně 30 minut při teplotách nižších než 150 °C. [34], [51], [52], [53]

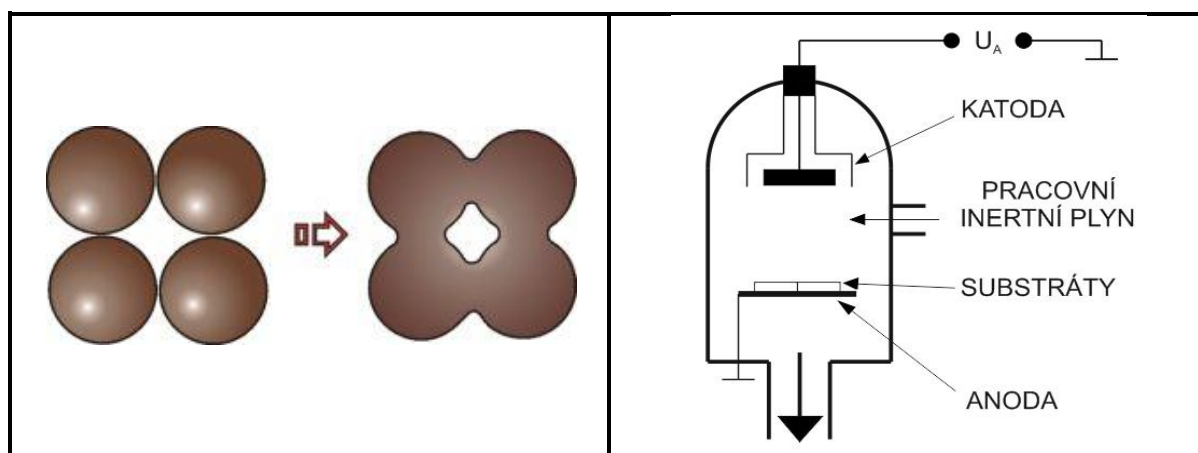


Obrázek 13 Princip sítotisku (převzato z [53])

1.5.5 Inkoustový tisk

Technologie inkoustového tisku vytváří vodivý tištěný motiv, k čemuž používá vodivé inkousty, které jsou nanášeny na textilní substrát pomocí inkjet tiskárny, která tiskne inkoust

bezkontaktně ve formě kapek. Po nanesení vodivého inkoustu musí být obsažené částice sintrovány (viz obrázek 14), aby došlo k nepřetržitému vzájemnému spojení mezi nimi. Sintrování (neboli spékání) je proces, při kterém dochází k zahřátí materiálu na vysokou teplotu (resp. na takovou teplotu, která je potřebná pro difuzi mezi částicemi), která musí být nižší než teplota tání obsaženého objemového kovu. Například u stříbrných inkoustů o velikosti částic 15 až 20 nm je dosahováno úplného sintrování obsažených částic při teplotě 180 °C. Mezi nevýhody vodivých inkoustů pro tuto technologii patří opět nízká mechanická odolnost a výskyt nerovnoměrné vodivosti způsobený ohýbáním. V porovnání s již zmíněným sítotiskem je tato technologie rychlejší a méně nákladná. [34], [54], [55]



Obrázek 14 Sintrování částic a katodové naprašování (převzato z [54], [58])

1.5.6 Naprašování

Naprashování je další proces, kterým lze vytvořit tenké vodivé vrstvy na textilním substrátu. Klasické katodové naprašování (viz obr. 14) probíhá ve vakuové komoře, kde je udržován nízký tlak 10^{-1} Pa a umístěn terč z vodivého materiálu tvořícího katodu. Na anodě je umístěn textilní substrát spolu s maskou, která definuje výsledný motiv. Jako pracovní inertní plyn je zde často používán argon. V takto sestaveném prostoru vznikne doutnavý výboj, který je způsoben náhodným elektronem urychleným ve vytvořeném silném elektrickém poli. Tento elektron má velkou kinetickou energii a dochází ke srážce s neionizovaným atomem, kterému vyrazí elektron z vazby a vytvoří tak kladný iont. Tento děj se opakuje a nastává tzv. lavinová ionizace. Kladné ionty následně atakují katodu, ze které vyrážejí atomy daného materiálu určeného pro naprašování a vytvořené volné elektrony směřují na uzemněnou kostru komory. Vyražené atomy jsou rozprášeny uvnitř komory a usazeny především na textilním substrátu. Takto vytvořené tenké vodivé vrstvy jsou poměrně mechanicky odolné, avšak tato technologie v porovnání s předešlými je finančně a časově náročná. [56], [57], [58]

2 Návrh a realizace textilních propojovacích struktur

V této části diplomové práce bude nejprve uveden návrh, který byl vytvořen v programu CorelDRAW Graphics Suite. Pro tuto diplomovou práci byly navrženy dvě planární mikrovlnné struktury, kterými jsou koplanární vedení a koplanární vlnovod, přičemž bylo navrženo celkem 16 vzorků, které jsou uvedeny níže. Jejich rozměry napodobují tzv. dlouhé vedení, kdy je vlnová délka přenášeného signálu srovnatelná či menší než je délka samotného vedení. Zakončení jednotlivých vedení je přizpůsobeno k nakontaktování pomocí SMA konektorů, které jsou použity pro připojení měřicích přístrojů k měření VF parametrů těchto koplanárních struktur. [59], [60]

Následující tabulka 3 zobrazuje současně rozměry navrhnutých a realizovaných vzorků na textilním substrátu (resp. na DPS), kde vzorky 1 až 9 znázorňují koplanární vedení, vzorky 10 až 16 představují koplanární vlnovod a vzorky 17 až 23 znázorňují zahnuté koplanární vedení. Uvedené rozměry jsou v milimetrech - L je délka, R je rozteč, M je mezera mezi pájecími ploškami, Š je šířka aktivního vodiče (pro koplanární vedení jsou Š a Z rozměrově shodné), Z je šířka zemní plochy, X a Y jsou rozměry pájecích plošek. Navržený poloměr čtvrtkružnice u zahnutých vzorků je 190,986 mm ($L = 300$ mm).

Navržené propojovací struktury byly realizovány dvěma způsoby, přičemž první způsob byl realizován vyšíváním pomocí šicího stroje BERNINA 750 QE na textilním substrátu. Dané propojovací struktury byly pro následné porovnávání s těmito vyšívanými vzorky vytvořeny ve druhém případě na DPS (desce plošných spojů).

Navržené propojovací struktury vzhledem k jejich rozměrům a s tím související proces výroby neodpovídaly přesně vytvořeným propojovacím strukturám na textilním substrátu. Tyto převážně mírně odlišné rozměry vytvořených propojovacích struktur jsou také uvedeny v tabulce 3 níže. Kromě toho bylo vyrobeno i několik dalších podobných vzorků navíc, které jsou opět zaznamenány v tabulce 3 (u těchto vzorků však nejsou uvedeny navržené rozměry). Teprve poté byly vytvořeny vzorky na DPS (v tomto případě byly vytvořeny pouze vzorky 1 až 14) s odpovídajícími propojovacími strukturami, které jsou totožné s vytvořenými strukturami na textilním substrátu.

Tabulka 3 Navrhnuté a realizované vzorky

Označení vzorku	Ilustrativní zobrazení vzorků	L (mm)	R (mm)	M (mm)	Š (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Vzorek 1 (návrh)		300	2	1	0,5	3	6	0,5
Vzorek 1 (reálný)		296	1,5	1	0,5	3	5,5	0,5
Vzorek 2 (návrh)		300	3	1	0,5	3	6	0,5
Vzorek 2 (reálný)		296,5	2,5	1	0,5	3	5,5	0,5
Vzorek 3 (návrh)		300	5	1	0,5	3	6	0,5
Vzorek 3 (reálný)		296	4,5	1	0,5	3	5,5	0,5
Vzorek 4 (reálný)		294	1,8	1	1	3	5,5	1
Vzorek 5 (reálný)		295	2,8	1	1	3	5,5	1
Vzorek 6 (reálný)		295	4,8	1	1	3	5,5	1
Vzorek 7 (návrh)		300	2	1	2	3	6	2
Vzorek 7 (reálný)		293	1,8	1	2	3	5,5	2
Vzorek 8 (návrh)		300	3	1	2	3	6	2
Vzorek 8 (reálný)		292	2,8	1	2	3	5,5	2
Vzorek 9 (návrh)		300	5	1	2	3	6	2
Vzorek 9 (reálný)	293	4,8	1	2	3	5,5	2	

Označení vzorku	Ilustrativní zobrazení vzorků	L (mm)	R (mm)	M (mm)	Š (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Vzorek 10 (návrh)		300	2	1	0,5	3	6	10
Vzorek 10 (reálný)		293	1,8	1	0,5	3	5,5	10
Vzorek 11 (návrh)		300	3	1	0,5	3	6	10
Vzorek 11 (reálný)		294	2,8	1	0,5	3	5,5	10
Vzorek 12 (návrh)		300	5	1	0,5	3	6	10
Vzorek 12 (reálný)		295	4,8	1	0,5	3	5,5	10
Vzorek 13 (návrh)		300	2	1	2	3	6	10
Vzorek 13 (reálný)		293	1,8	1	2	3	5,5	10
Vzorek 14 (návrh)		300	3	1	2	3	6	10
Vzorek 14 (reálný)		293	2,8	1	2	3	5,5	10
Vzorek 15 (návrh)		300	5	1	2	3	6	10
Vzorek 15 (reálný)		293	4	1	2	3	5,5	10
Vzorek 16 (reálný)		294	2,8	1	0,5	3	5,5	10

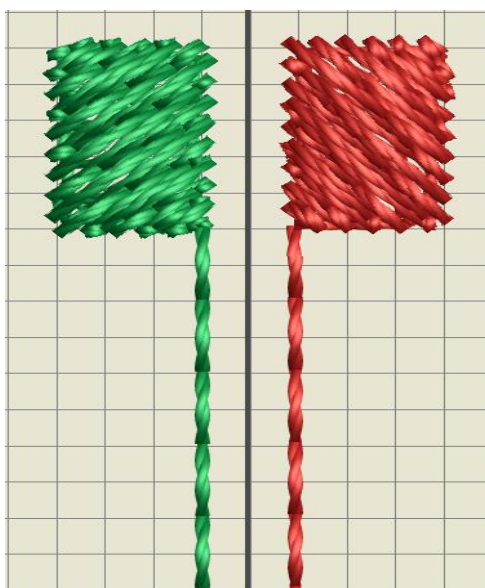
Označení vzorku	Ilustrativní zobrazení vzorků	L (mm)	R (mm)	M (mm)	Š (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Vzorek 17 (návrh)		300	3	1	0,5	3	6	0,5
Vzorek 17 (reálný)		190	2,5	1	0,5	3	5,5	0,5
Vzorek 18 (reálný)		190	2	1	1	3	5,5	1
Vzorek 19 (reálný)		297	2,8	1	1	3	5,5	1
Vzorek 20 (reálný)		190	1	1	2	3	5,5	2
Vzorek 21 (návrh)		300	3	1	2	3	6	2
Vzorek 21 (reálný)		294	1,2	1	2	3	5,5	2
Vzorek 22 (návrh)		300	3	1	0,5	3	6	0,5
Vzorek 22 (reálný)		141,4	2,8	1	0,5	3	5,5	0,5
Vzorek 23 (návrh)		300	3	1	2	3	6	2
Vzorek 23 (reálný)		149,2	1,2	1	2	3	5,5	2

Celkem tedy bylo vytvořeno 23 vzorků na textilním substrátu a 14 vzorků na DPS. V následujících tabulkách 5 a 6 jsou naskenovány všechny tyto zmíněné vzorky. V případě vzorků na textilním substrátu jsou vždy na jedné textilií (látka s označením F14 – modrý kepr) vytvořeny 3 (případně 4) shodné planární mikrovlnné struktury. Každá tato struktura je vždy realizována dvěma druhy nití a u vzorku 16 (rozměrově shodný se vzorkem 11) je

kromě těchto nití navíc použita pro zemní plochu také vodivá tkanina KASSEL. Jako horní nit je použita vodivá nit (postříbřená měď) s označením č. 53 a jako spodní nevodivá nit je využita bílá polyesterová (PES) nit. Spotřeba těchto nití s vytvořeným počtem stehů pro vybrané vzorky 1 (koplanární vedení), 10 (koplanární vlnovod) a 17 (zahnuté koplanární vedení) je uvedena v tabulce 4 níže. Z tabulky 4 je patrné, že největší spotřeba materiálu okolo 55 metrů byla u vzorku 10 a vytvořený počet stehů pro tento vzorek přesáhl hodnotu 9500. Pro vzorek 1 je na obrázku 15 zobrazena zvětšená vyšitá struktura vedení. Šicí stroj BERNINA 750 QE, kterým byly vyšity dané vzorky, využíval jehlu s označením Ti-Organ 80 a rychlost jeho šití byla cca 200 mm za minutu. V případě vzorků zhotovených na DPS byl každý konkrétní vzorek vytvořen pouze jednou. Jako substrát pro DPS byl zde využit organický substrát známý pod názvem FR-4, který má dobré mechanické a elektrické vlastnosti a je obvykle používán pro náročnější aplikace a to zejména v měřicí a regulační technice. Na tomto substrátu je určitou výrobní technologií (metodou fotolitografie) naplátována měděná fólie o tloušťce 0,035 mm, která tvoří výsledný vodivý motiv DPS. [61]

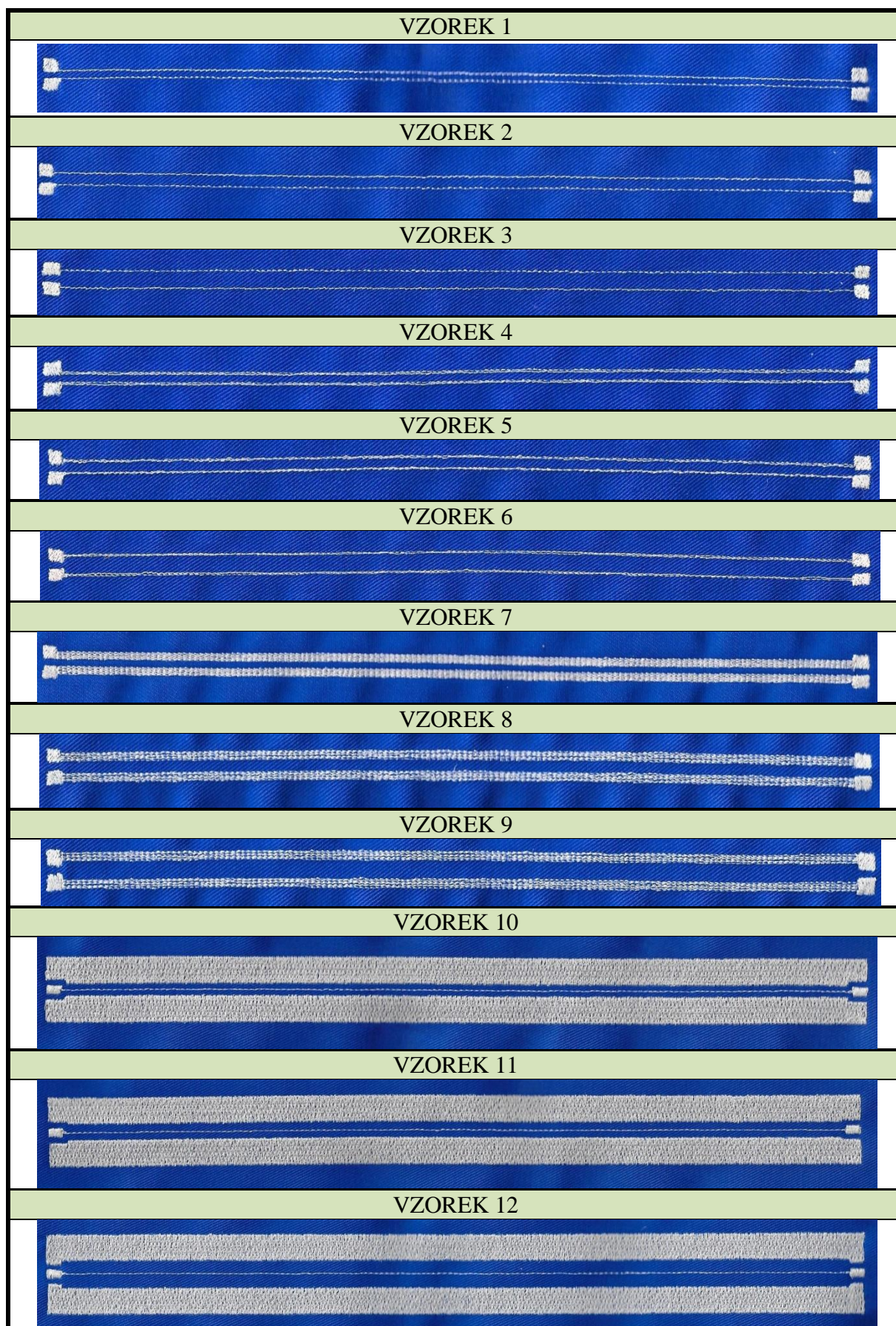
Tabulka 4 Spotřeba materiálu a vytvořený počet stehů pro vybrané vzorky

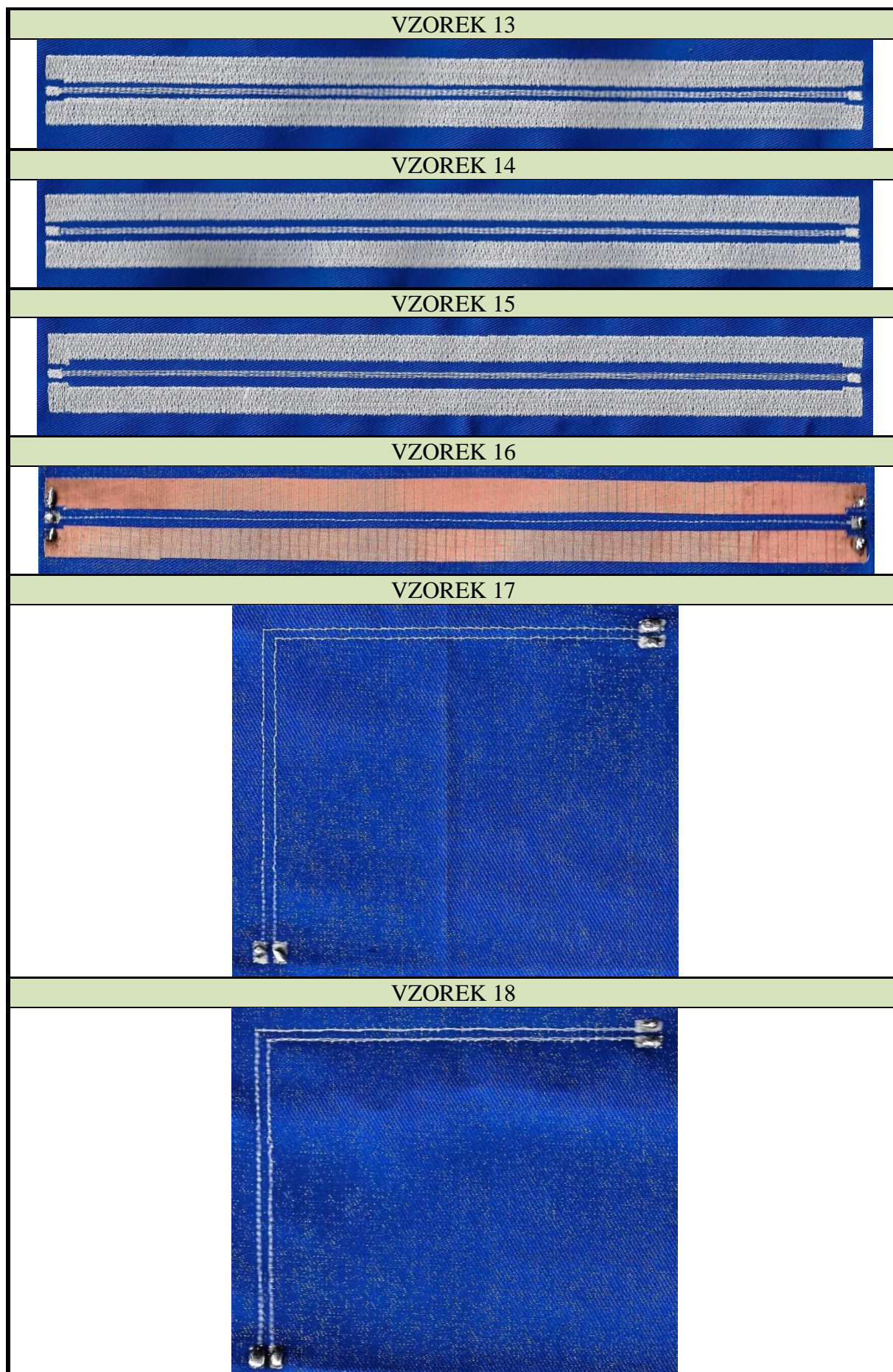
Označení vzorku	Spotřeba nití v metrech (m)	Vytvořený počet stehů
Vzorek 1	3,25	723
Vzorek 10	54,49	9502
Vzorek 17	2,71	619



Obrázek 15 Zobrazení zvětšené struktury pro vzorek 1

Tabulka 5 Realizované vzorky na textilním substrátu

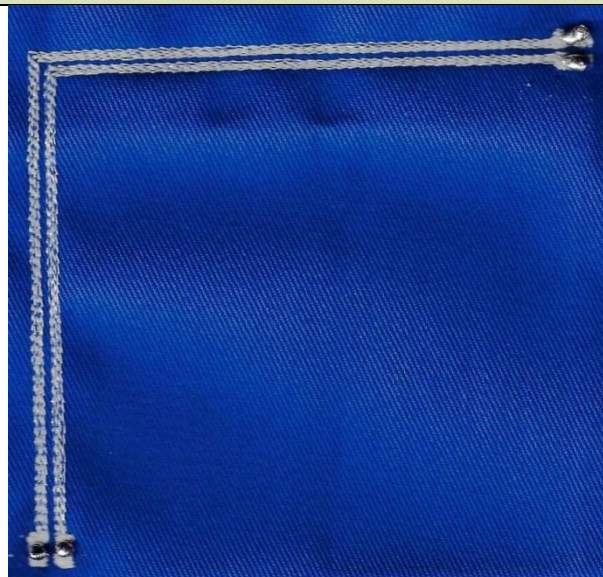




VZOREK 19

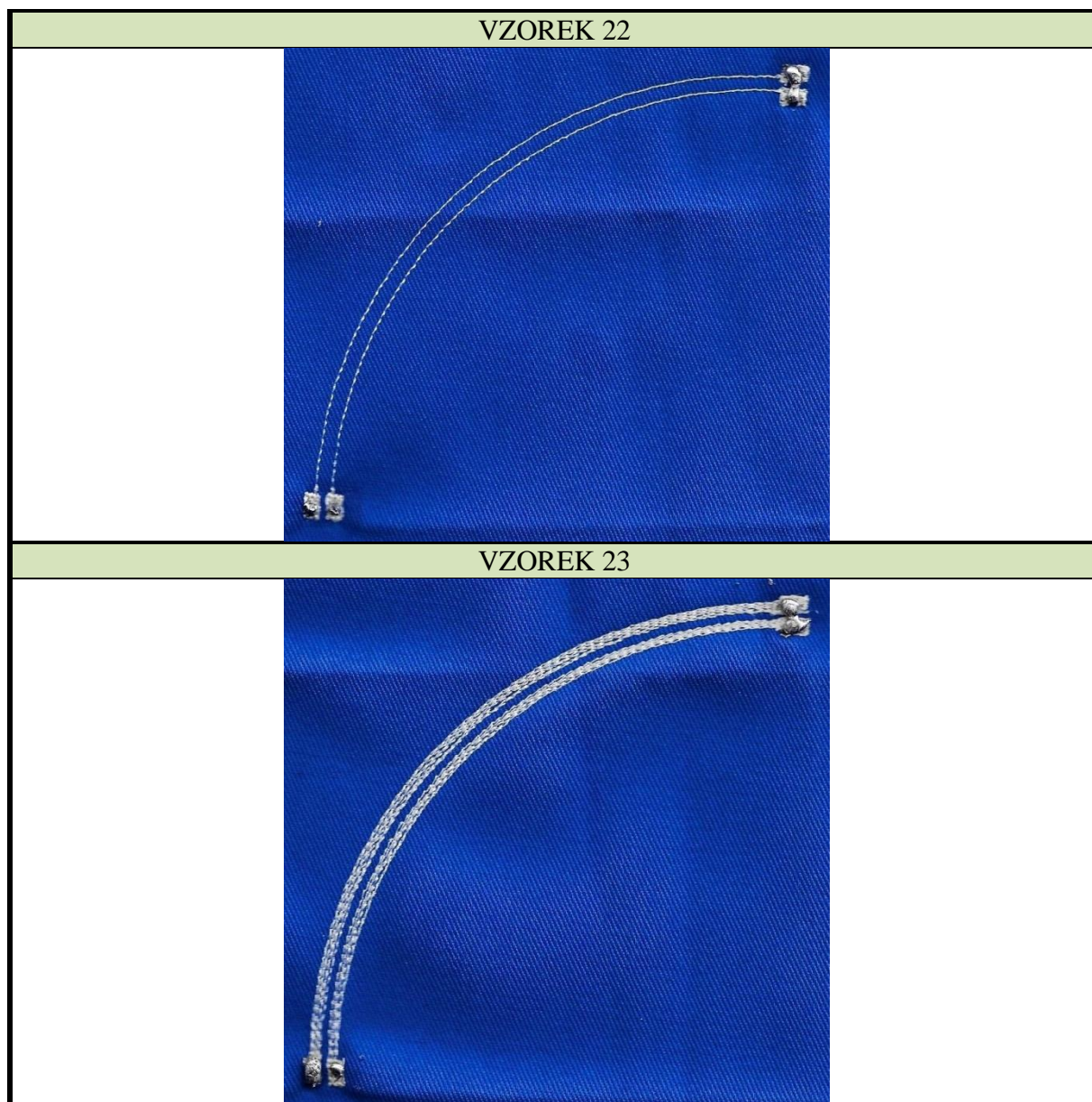


VZOREK 20



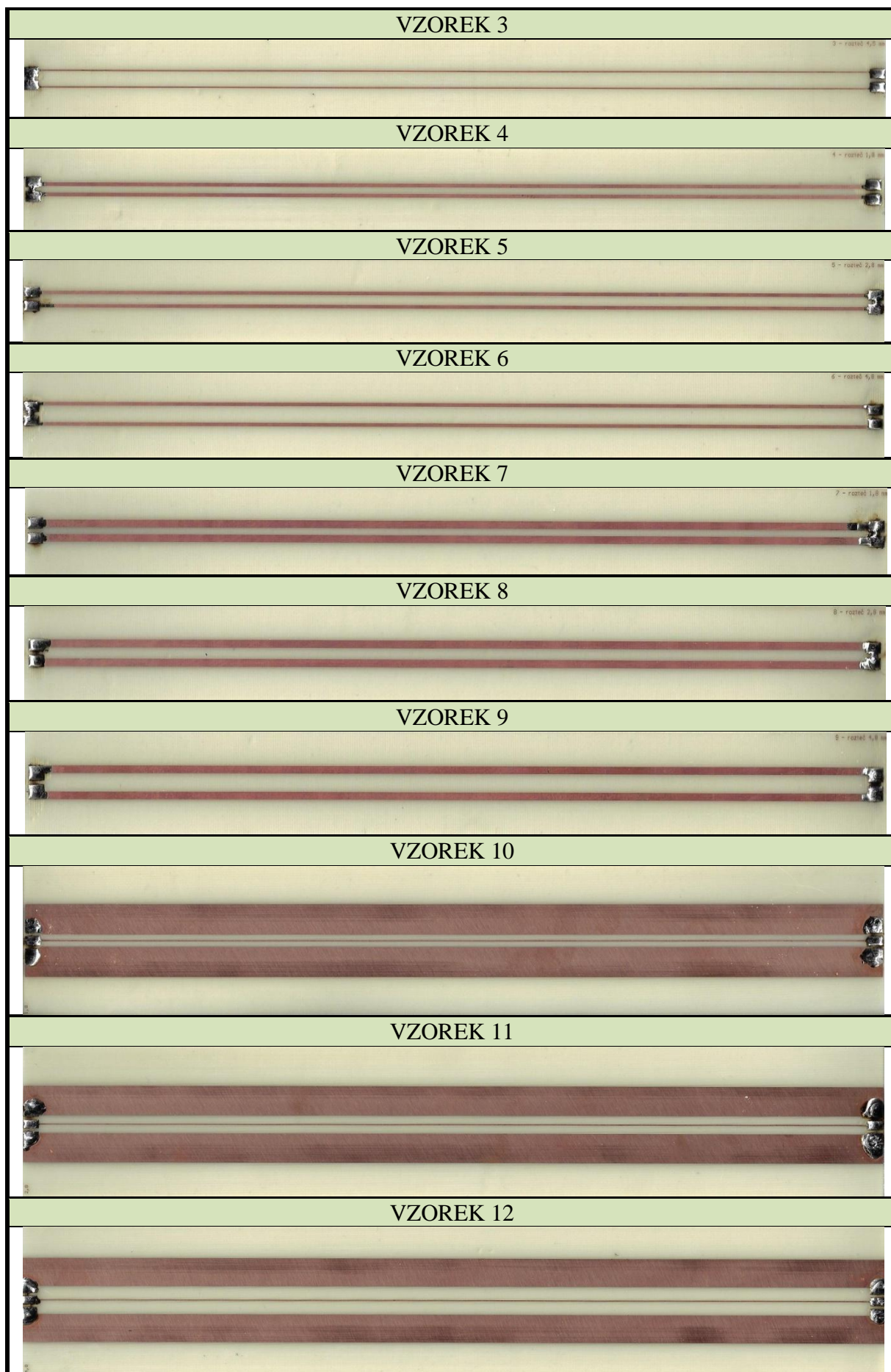
VZOREK 21





Tabulka 6 Realizované vzorky na DPS

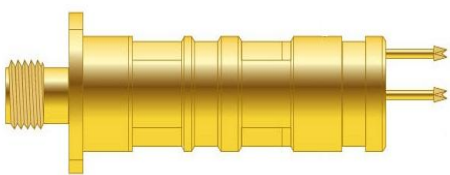







3 Návrh a realizace kontaktování

Tato část diplomové práce se zabývá návrhem a následnou realizací vhodného způsobu kontaktování realizovaných vzorků. Byly navrženy celkem 3 možné způsoby kontaktování. První způsob využívá pro měření vysokofrekvenčních parametrů vysokofrekvenční sondy. Ukázky těchto vhodných vysokofrekvenčních sond jsou zobrazeny na obrázku 16. Tyto vysokofrekvenční sondy nebyly vzhledem k jejich vysoké ceně nakonec zakoupeny pro měřicí účely. [62]





OZNAČENÍ TYPU VYSOKOFREKVENČNÍ SONDY	
K-50L-QG (pro koplanární vedení)	K-50L (pro koplanární vlnovod)
Cena (17 693 Kč/kus)	Cena (16 056 Kč/kus)
	

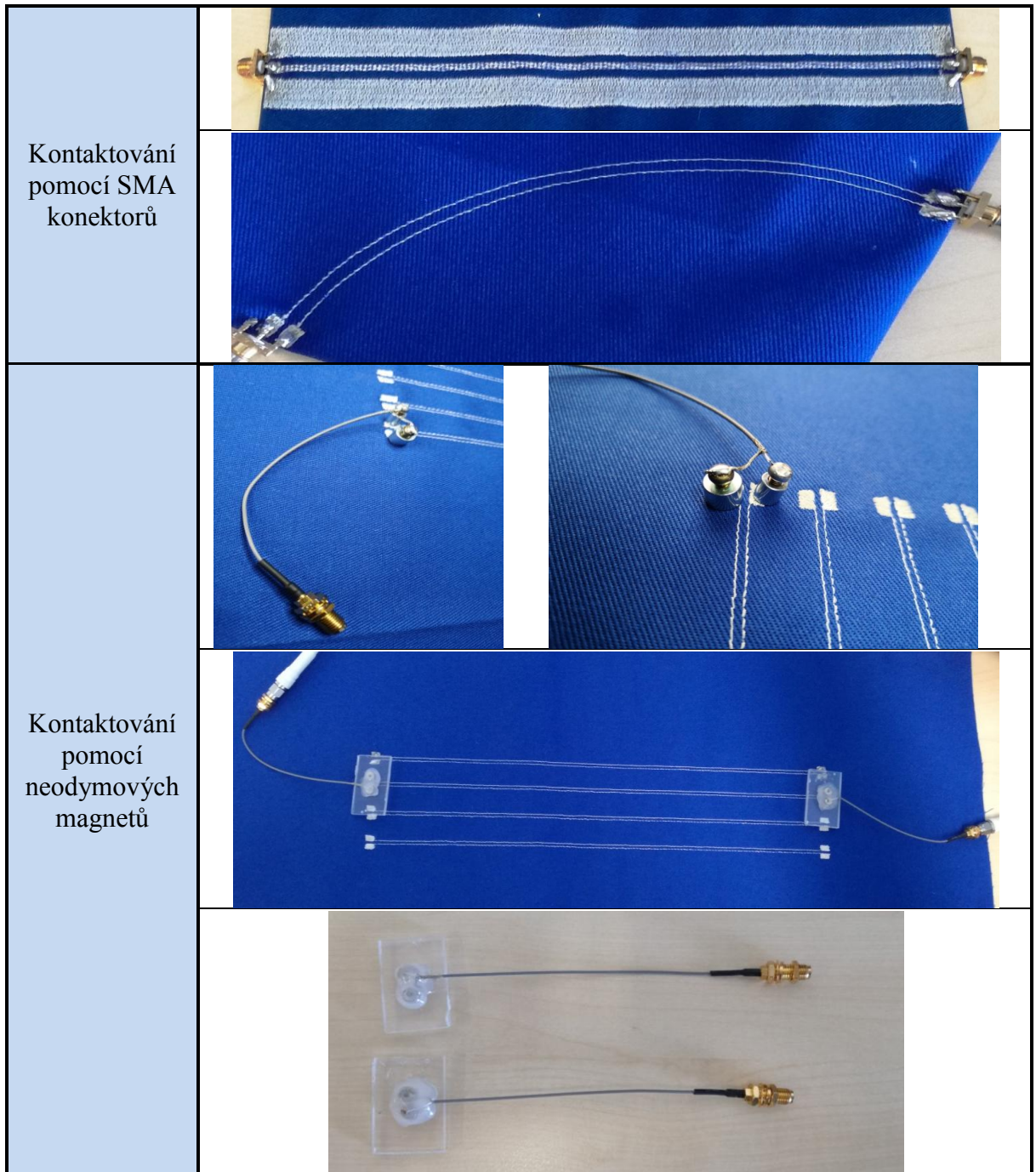
Obrázek 16 Vysokofrekvenční sondy (převzato z [62])

Jelikož použité hybridní šicí vodivé nitě jsou kompatibilní s procesem pájení, proto jako druhá možnost vytvoření kontaktu je navržena technologie pájení v kombinaci s SMA konektorem (viz tabulka 7). V současné době používáme v elektrotechnice měkké pájení do 450 °C. Třetí možností je vytvoření kontaktu na základě páru magnetických prvků, kterými mohou být magnetické konektory nebo kombinace magnetů (nakontaktovaných ke koaxiálnímu kabelu zakončeném SMA konektorem) a tenkých kovových plechů. Tyto zmíněné magnetické prvky jsou také zobrazeny v tabulce 7. [63]

Třetí možnost vytvoření kontaktu s využitím magnetických prvků (neodymových magnetů) byla realizována přesně podle teoretického návrhu (viz obr. 17) a za výhodu lze považovat velmi nízkou cenu neodymových magnetů či magnetických konektorů. Tento třetí způsob kontaktování při zkušebním měření vysokofrekvenčních parametrů ovšem vykazoval příliš velký útlum signálu, proto byl vytvořen a použit pouze druhý způsob kontaktování, který je také zdokumentován na obrázku 17 níže.

Tabulka 7 Návrh druhého a třetího způsobu kontaktování (převzato z [64], [65], [66])

VARIANTA	ZOBRAZENÍ		CENA	
Konektor SMA F pro druhou možnost vytvoření kontaktu (rozměry: délka 1,4 cm a šířka 0,9 cm)			15 Kč/kus	
Magnetické prvky pro třetí způsob kontaktování	Magnetické konektory		54 Kč/kus	
	Neodymové magnety	KT-05-03-N (Ø 5 mm, výška 3 mm)		1,50 Kč/kus
		KR-05-1,5-03-N (Ø 5/1,5 mm a výška 3 mm)		2,50 Kč/kus



Obrázek 17 Realizace druhého a třetího způsobu kontaktování

4 Teoretické výpočty pro realizované vzorky

Následující tabulka 8 pro realizované vzorky 1 až 16 (vzorek 16 není v tabulce uveden, protože je rozměrově shodný se vzorkem 11) na textilním substrátu a tabulka 9 pro realizované vzorky 1 až 14 na DPS obsahují teoretické výpočty efektivní relativní permitivity ϵ_{re} a vlnové impedance Z_0 podle vztahů uvedených v kapitole 1.1.2, kde ϵ_r je relativní permitivita dielektrického substrátu, h je výška dielektrického substrátu, R je rozteč mezi aktivním vodičem a zemní plochou (pro koplanární vedení je vyjádřena v rovnicích jako a a pro koplanární vlnovod je vyjádřena jako s), \check{S} je šířka aktivního vodiče (pro koplanární vedení je vyjádřena v rovnicích jako w a pro koplanární vlnovod je vyjádřena jako a), Z je šířka zemní plochy (v rovnicích je vyjádřena jako g) a t je výška aktivního vodiče a zemní plochy. [5], [11]

Tabulka 8 Teoretické výpočty pro vzorky na textilním substrátu

Označení vzorku	Typ koplanární struktury	ϵ_r (-)	h (mm)	$R = a$ (mm)	$\check{S} = w$ (mm)	$Z = g$ (mm)	t (mm)	ϵ_{re} (-)	Z_0 (Ω)
Vzorek 1	koplanární vedení	4	0,4	1,5	0,5	0,5	0,5	1,802	246,4
Vzorek 2		4	0,4	2,5	0,5	0,5	0,5	1,698	292,0
Vzorek 3		4	0,4	4,5	0,5	0,5	0,5	1,600	349,7
Vzorek 4		4	0,4	1,8	1	1	0,5	1,585	227,1
Vzorek 5		4	0,4	2,8	1	1	0,5	1,515	263,5
Vzorek 6		4	0,4	4,8	1	1	0,5	1,444	313,2
Vzorek 7		4	0,4	1,8	2	2	0,5	1,411	197,0
Vzorek 8		4	0,4	2,8	2	2	0,5	1,362	227,8
Vzorek 9		4	0,4	4,8	2	2	0,5	1,310	271,3
Označení vzorku	Typ koplanární struktury	ϵ_r (-)	h (mm)	$R = s$ (mm)	$\check{S} = a$ (mm)	$Z = g$ (mm)	t (mm)	ϵ_{re} (-)	Z_0 (Ω)
Vzorek 10	koplanární vlnovod	4	0,4	1,8	0,5	10	0,5	1,640	112,1
Vzorek 11		4	0,4	2,8	0,5	10	0,5	1,462	142,7
Vzorek 12		4	0,4	4,8	0,5	10	0,5	1,313	180,0
Vzorek 13		4	0,4	1,8	2	10	0,5	1,598	80,6
Vzorek 14		4	0,4	2,8	2	10	0,5	1,391	108,4
Vzorek 15		4	0,4	4	2	10	0,5	1,290	130,3

Tabulka 9 Teoretické výpočty pro vzorky na DPS

Označení vzorku	Typ koplanární struktury	ϵ_r (-)	h (mm)	R = a (mm)	Š = w (mm)	Z = g (mm)	t (mm)	ϵ_{re} (-)	Z_0 (Ω)
Vzorek 1	koplanární vedení	4,2	0,4	1,5	0,5	0,5	0,035	1,856	242,8
Vzorek 2		4,2	0,4	2,5	0,5	0,5	0,035	1,744	288,1
Vzorek 3		4,2	0,4	4,5	0,5	0,5	0,035	1,640	345,4
Vzorek 4		4,2	0,4	1,8	1	1	0,035	1,624	224,3
Vzorek 5		4,2	0,4	2,8	1	1	0,035	1,550	260,6
Vzorek 6		4,2	0,4	4,8	1	1	0,035	1,474	310,0
Vzorek 7		4,2	0,4	1,8	2	2	0,035	1,438	195,1
Vzorek 8		4,2	0,4	2,8	2	2	0,035	1,386	225,8
Vzorek 9		4,2	0,4	4,8	2	2	0,035	1,330	269,2
Označení vzorku	Typ koplanární struktury	ϵ_r (-)	h (mm)	R = s (mm)	Š = a (mm)	Z = g (mm)	t (mm)	ϵ_{re} (-)	Z_0 (Ω)
Vzorek 10	koplanární vlnovod	4,2	0,4	1,8	0,5	10	0,035	1,659	154,0
Vzorek 11		4,2	0,4	2,8	0,5	10	0,035	1,501	181,8
Vzorek 12		4,2	0,4	4,8	0,5	10	0,035	1,363	217,0
Vzorek 13		4,2	0,4	1,8	2	10	0,035	1,464	114,4
Vzorek 14		4,2	0,4	2,8	2	10	0,035	1,356	135,8

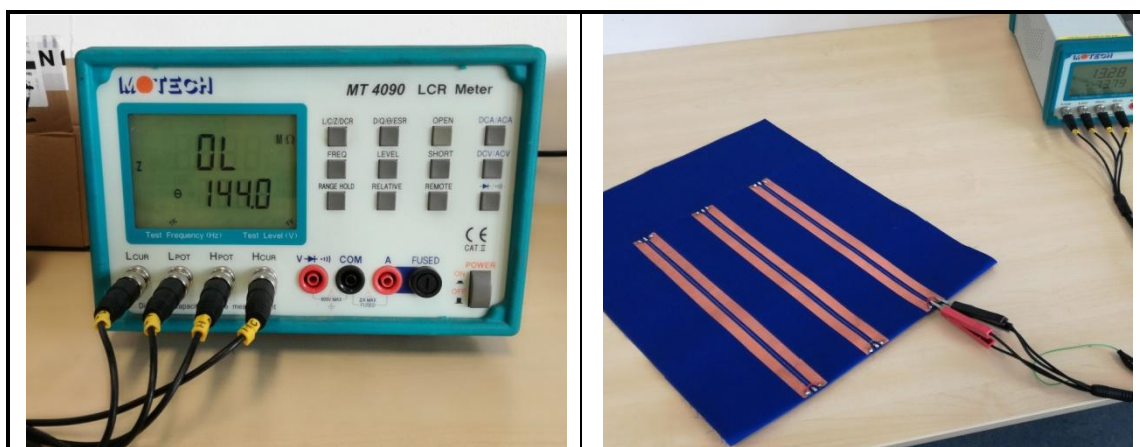
5 Měření a výpočty parametrů propojovacích struktur

V této části diplomové práce je zpracováno měření parametrů propojovacích struktur. Měření bylo realizováno pro všechny vytvořené vzorky, které jsou zaznamenány v předchozích částech diplomové práce. Toto měření je rozděleno do dvou částí, kde v první části byla u vzorků měřena impedance nakrátko a naprázdno a ve druhé části byly pro vzorky měřeny rozptylové parametry (neboli S-parametry).

5.1 Měření impedance nakrátko a naprázdno

Měření impedance nakrátko a naprázdno probíhalo na LCR měřiči s označením MOTECH MT 4090, který je zobrazen na obrázku 18. Měření impedance nakrátko Z_k probíhalo při spojených (zkratovaných) výstupních svorkách daného planárního vedení a měření impedance naprázdno Z_p probíhalo naopak při rozpojených výstupních svorkách vedení. Z naměřených hodnot byla posléze podle vztahu (22) vypočtena hodnota vlnové impedance Z_0 . Vlnová (neboli také charakteristická) impedance je významným parametrem vedení, jehož hodnota závisí na dielektriku, příčných rozměrech a tvaru vedení. Pokud je tato vlnová impedance rovna zatěžovací impedanci, kterou je vedení zakončeno, nedochází k odrazu vln a hovoříme tedy o tzv. impedančním přizpůsobení. V opačném případě dochází sloučením postupně a odražené vlny ke vzniku stojatého vlnění. [60], [67]

$$Z_0 = \sqrt{Z_p * Z_k} \quad (\Omega) \quad (22)$$



Obrázek 18 Měření impedance nakrátko a naprázdno LCR měřičem

5.1.1 Měření impedance nakrátko a naprázdno pro vzorky na textilií

Impedance nakrátko a naprázdno byly vždy v tomto případě změřeny pro 3 vytvořené struktury na dané textilii a to pro dvě nastavované frekvence (1 kHz a 100 kHz). Tabulky 10 (pro frekvenci 1 kHz) a 11 (pro frekvenci 100 kHz) obsahují naměřené a vypočtené hodnoty impedancí pro vytvořené vzorky na textilním substrátu.

Tabulka 10 Naměřené a vypočtené hodnoty impedancí (textilie) pro frekvenci 1 kHz

	FREKVENCE $f = 1$ kHz								
	Impedance naprázdno Z_p (M Ω)			Impedance nakrátko Z_k (Ω)			Vlnová impedance Z_0 (Ω)		
Vzorek 1	18,850	18,400	17,730	5,781	5,429	5,255	10 439	9 995	9 653
Vzorek 2	20,430	20,140	19,880	5,845	5,371	5,479	10 928	10 401	10 437
Vzorek 3	20,090	19,650	20,450	7,615	8,756	8,230	12 369	13 117	12 973
Vzorek 4	12,700	12,040	11,710	3,431	2,790	3,120	6 601	5 796	6 044
Vzorek 5	14,480	15,240	15,360	2,814	2,970	3,280	6 383	6 728	7 098
Vzorek 6	19,250	18,200	18,890	2,936	3,209	3,073	7 518	7 642	7 619
Vzorek 7	10,790	10,180	10,980	1,980	1,722	1,852	4 622	4 187	4 509
Vzorek 8	13,750	12,620	12,830	2,130	2,563	1,508	5 412	5 687	4 399
Vzorek 9	16,480	15,880	16,010	4,033	4,075	4,737	8 153	8 044	8 709
Vzorek 10	11,760	12,120	66,410	3,649	3,543	47,000	6 551	6 553	55 868
Vzorek 11	12,870	12,630	12,740	3,652	3,766	3,488	6 856	6 897	6 666
Vzorek 12	16,700	16,080	15,930	4,662	4,185	4,525	8 824	8 203	8 490
Vzorek 13	7,693	6,917	7,104	1,720	1,750	2,167	3 638	3 479	3 924
Vzorek 14	9,682	9,240	9,377	2,356	1,764	2,164	4 776	4 037	4 505
Vzorek 15	12,460	12,300	12,440	3,458	2,686	2,904	6 564	5 748	6 010
Vzorek 16	13,350	13,240	13,470	2,962	3,106	5,551	6 288	6 413	8 647
Vzorek 17	39,500	36,080	33,420	4,073	4,806	3,844	12 684	13 168	11 334
Vzorek 18	30,220	30,150	30,260	4,648	2,162	2,063	11 852	8 074	7 901
Vzorek 19	19,400	16,900	19,010	4,202	4,991	3,864	9 029	9 184	8 571
Vzorek 20	20,650	19,660	19,440	0,997	1,137	1,045	4 537	4 728	4 507
Vzorek 21	12,510	12,950	12,530	1,102	1,134	1,485	3 713	3 832	4 314
Vzorek 22	38,000	94,050	38,110	2,972	92,930	2,975	10 627	93 488	10 648
Vzorek 23	21,770	22,690	20,850	0,744	0,793	0,850	4 025	4 242	4 210

Tabulka 11 Naměřené a vypočtené hodnoty impedancí (textilie) pro frekvenci 100 kHz

	FREKVENCE $f = 100$ kHz								
	Impedance naprázdno Z_p (k Ω)			Impedance nakrátko Z_k (Ω)			Vlnová impedance Z_0 (Ω)		
Vzorek 1	307,9	300,5	291,1	14,730	13,380	10,930	2 130	2 005	1 784
Vzorek 2	370,6	360,3	346,5	16,090	12,870	13,110	2 442	2 153	2 131
Vzorek 3	404,1	379,0	407,7	10,190	11,570	10,900	2 029	2 094	2 108
Vzorek 4	283,5	279,2	276,8	18,420	15,450	18,020	2 285	2 077	2 233
Vzorek 5	291,1	320,6	329,0	15,500	16,750	17,060	2 124	2 317	2 369
Vzorek 6	382,4	358,0	381,1	14,350	16,640	15,560	2 343	2 441	2 435
Vzorek 7	214,7	210,2	219,8	19,050	17,440	18,900	2 022	1 915	2 038
Vzorek 8	261,6	251,2	260,0	17,070	18,300	15,010	2 113	2 144	1 975
Vzorek 9	301,9	297,1	300,4	5,775	5,803	6,716	1 320	1 313	1 420
Vzorek 10	165,7	177,0	727,5	12,160	9,983	82,630	1 419	1 329	7 753
Vzorek 11	184,3	182,5	184,0	12,100	12,540	11,330	1 493	1 513	1 444
Vzorek 12	222,3	219,2	214,4	10,930	9,324	9,616	1 559	1 430	1 436
Vzorek 13	116,9	106,2	108,1	12,310	13,140	15,720	1 200	1 181	1 304
Vzorek 14	138,2	131,7	134,3	14,320	13,550	13,600	1 407	1 336	1 351
Vzorek 15	158,2	156,1	158,0	14,560	12,020	14,440	1 518	1 370	1 510
Vzorek 16	188,9	188,6	194,2	12,360	15,190	15,510	1 528	1 693	1 736
Vzorek 17	488,8	475,0	468,4	13,530	14,070	12,170	2 572	2 585	2 388
Vzorek 18	405,7	402,6	407,6	16,570	15,920	14,910	2 593	2 532	2 465
Vzorek 19	313,5	260,6	305,8	16,010	17,320	12,350	2 240	2 125	1 943
Vzorek 20	277,5	273,6	271,5	15,370	18,410	16,850	2 065	2 244	2 139
Vzorek 21	193,8	196,4	194,9	15,740	16,770	18,470	1 747	1 815	1 897
Vzorek 22	570,1	977,0	577,7	15,430	159,800	17,650	2 966	12 495	3 193
Vzorek 23	342,0	352,4	331,6	18,350	18,610	19,220	2 505	2 561	2 525

5.1.2 Měření impedance nakrátko a naprázdno pro vzorky na DPS

Měření impedance nakrátko a naprázdno pro vzorky na DPS probíhalo stejně jako v předchozím případě. Tabulka 12 obsahuje naměřené a vypočtené hodnoty pro nastavenou frekvenci 1 kHz a tabulka 13 zobrazuje totéž, ale uvedené hodnoty odpovídají nastavené frekvenci 100 kHz.

Tabulka 12 Naměřené a vypočtené hodnoty impedancí (DPS) pro frekvenci 1 kHz

	FREKVENCE $f = 1$ kHz		
	Impedance naprázdno Z_p (M Ω)	Impedance nakrátko Z_k (Ω)	Vlnová impedance Z_0 (Ω)
Vzorek 1	20,40	2,008	6 400
Vzorek 2	26,09	1,835	6 919
Vzorek 3	31,26	1,824	7 551
Vzorek 4	20,82	1,047	4 669
Vzorek 5	26,64	1,055	5 301
Vzorek 6	28,80	1,022	5 425
Vzorek 7	17,91	0,936	4 094
Vzorek 8	20,92	0,652	3 693
Vzorek 9	26,50	0,663	4 192
Vzorek 10	13,01	1,061	3 715
Vzorek 11	15,88	1,065	4 112
Vzorek 12	18,19	1,129	4 532
Vzorek 13	10,15	1,092	3 329
Vzorek 14	11,84	1,321	3 955

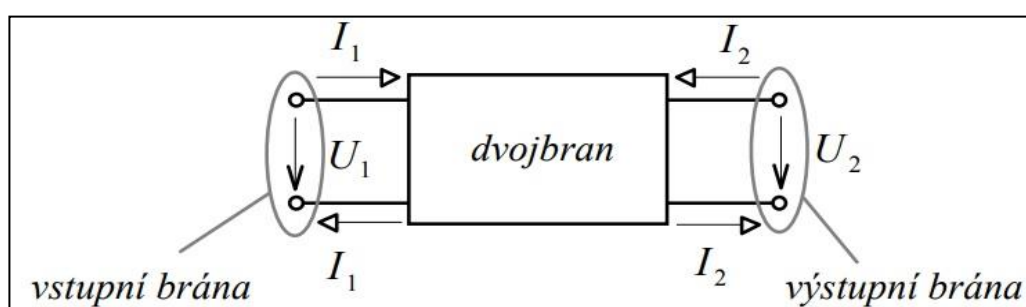
Tabulka 13 Naměřené a vypočtené hodnoty impedancí (DPS) pro frekvenci 100 kHz

	FREKVENCE $f = 100$ kHz		
	Impedance naprázdno Z_p (k Ω)	Impedance nakrátko Z_k (Ω)	Vlnová impedance Z_0 (Ω)
Vzorek 1	220,30	20,33	2 116
Vzorek 2	285,50	19,79	2 377
Vzorek 3	332,10	19,80	2 564
Vzorek 4	204,40	20,11	2 027
Vzorek 5	237,20	20,64	2 213
Vzorek 6	284,60	21,38	2 467
Vzorek 7	183,60	21,32	1 978
Vzorek 8	210,20	21,39	2 120
Vzorek 9	257,60	18,33	2 173
Vzorek 10	129,50	20,63	1 634
Vzorek 11	146,40	18,02	1 624
Vzorek 12	174,70	20,89	1 910
Vzorek 13	98,95	18,85	1 366
Vzorek 14	115,60	16,30	1 373

Výše uvedené hodnoty vlnové impedance Z_0 realizovaných vzorků jsou v porovnání s teoretickými výpočty (kapitola 4) velmi odlišné a zároveň je patrný i rozdíl mezi hodnotami vlnové impedance Z_0 pro vzorky na textilním substrátu a vzorky na DPS. Tento rozdíl hodnot je způsoben tím, že použité hybridní šicí vodivé nitě nedosahují takové elektrické vodivosti jako měděná fólie a navíc vodivá struktura vytvořená z nití na textilním substrátu představuje mnohem delší smyčku resp. uzavřenou dráhu. Vyskytují se zde také jiné poměry kapacit a indukčností realizovaných planárních mikrovlnných vedení a v neposlední řadě dochází k ovlivnění hodnot kontaktními jevy. Dále jsou z naměřených hodnot vyšších vzorků patrné poměrně velké rozdíly hodnot vlnové impedance mezi teoreticky stejnými vzorky na dané textilií, jedná se zde o vzorek 10 – c (poslední sloupec) a vzorek 22 – b (předposlední sloupec). V těchto dvou případech byla daná struktura zřejmě poškozena již při samotné výrobě, tyto vodivé struktury mohou být na určitém místě přerušeny nebo mohlo dojít k nalomení hybridní šicí vodivé nitě.

5.2 Měření rozptylových parametrů

V této části diplomové práce bude popsáno a realizováno měření rozptylových parametrů pro vzorky na textilním substrátu a na desce plošných spojů. Vytvořené vzorky reprezentují symetrický reciproční dvojbran. Dvojbran je obecně obvod obsahující vstupní a výstupní bránu resp. 2 páry svorek (viz obrázek 19). Pro reciproční dvojbran platí princip reciprocity, kdy je umožněna záměna vstupní brány za výstupní a naopak. Popis recipročního dvojbranu například pomocí prvků impedanční matice Z (matice Z je uvedena níže) je symetrický kolem hlavní diagonály, čili jeho prvky matice na pozicích 12 a 21 se rovnají. Symetrie dvojbranu je poté vyjádřena jako rovnost prvků matice na pozicích 11 a 22. [68]



Obrázek 19 Schéma dvojbranu s orientací proudů a napětí (převzato z [68])

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\text{Reciprocita: } z_{12} = z_{21} \quad \text{a} \quad \text{symetrie: } z_{11} = z_{22} \quad (25)$$

Rozptylové parametry neboli tzv. S-parametry používáme pro popis mikrovlnných prvků a obvodů ve vysokofrekvenčním spektru. Pro tyto S-parametry také platí princip reciprocity a symetrie (tudíž rovnost: $s_{11} = s_{22}$ a $s_{12} = s_{21}$). S-parametry obecně představují přenos elektrického výkonu mezi branami mnohobranu (resp. poměry vstupujících a vystupujících napěťových vln). S-parametry pracují se třemi druhy vln a to se zdrojovou, odraženou a

přúchozí (neboli postupnou) vlnou. Pro měření S-parametrů je tedy zapotřebí zdroj vln, přenosové vedení s obvyklou hodnotou impedance 50 Ohmů a zátěž. Pro odvození těchto S-parametrů zavedeme proměnné a_i a b_i , které jsou vyjádřeny pomocí napětí, proudů a vztažné impedance. Uvedený index i popisuje i -tou bránu n -branu. Jedná se o napěťové vlny zdrojové (nezávislé parametry a_i) a vlny odražené (závislé parametry b_i), které zobrazuje obrázek 20. Rovnice vztažené k vlnové impedanci Z_0 pro takovýto dvojbran z obrázku 20 jsou uvedeny níže, přičemž U_{i1} a U_{i2} představují napětí pro zdrojové vlny na dané bráně, U_{r1} a U_{r2} označují napětí pro odražené vlny od dané brány. Následně můžeme provést maticový zápis (viz (30)) pro tyto S-parametry a jednotlivé parametry můžeme stanovit podle zmíněných vztahů níže. [69], [70]



Obrázek 20 Dvojbran s vyznačenými zdrojovými a odraženými vlnami (převzato z [70])

$$a_1 = \frac{U_1 + I_1 * Z_0}{2 * \sqrt{Z_0}} = \frac{U_{i1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (26)$$

$$a_2 = \frac{U_2 + I_2 * Z_0}{2 * \sqrt{Z_0}} = \frac{U_{i2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (27)$$

$$b_1 = \frac{U_1 - I_1 * Z_0}{2 * \sqrt{Z_0}} = \frac{U_{r1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (28)$$

$$b_2 = \frac{U_2 - I_2 * Z_0}{2 * \sqrt{Z_0}} = \frac{U_{r2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

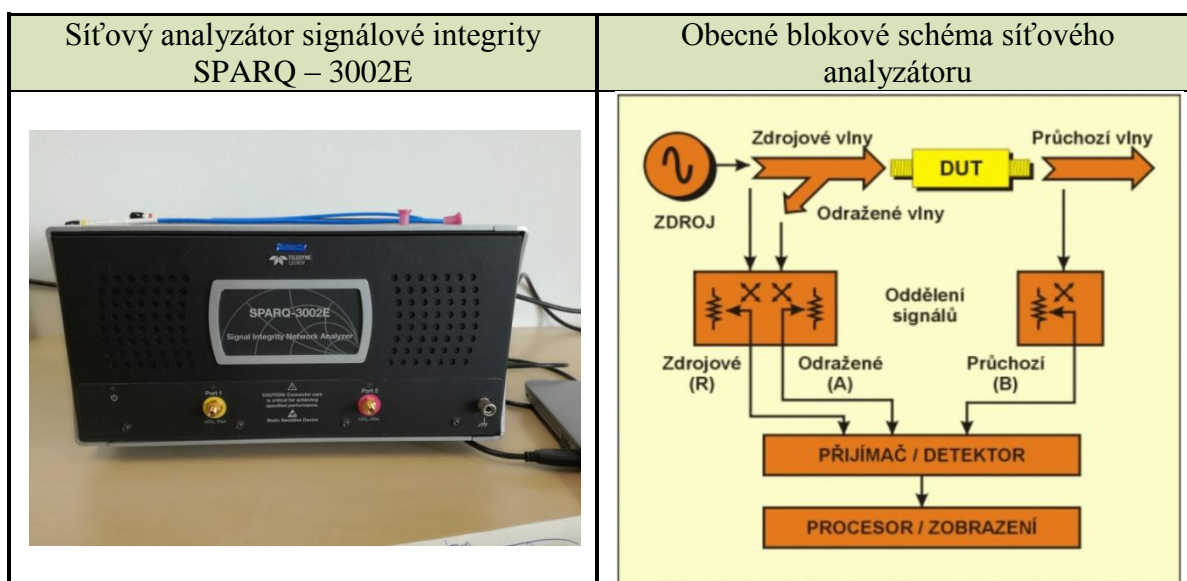
$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2 = 0} \rightarrow \text{vstupní koeficient odrazu při } Z_L = Z_0 \quad (31)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1 = 0} \rightarrow \text{zpětný přenosový koeficient při } Z_S = Z_0 \quad (32)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2 = 0} \rightarrow \text{přenosový koeficient při } Z_L = Z_0 \quad (33)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1 = 0} \rightarrow \text{výstupní koeficient odrazu při } Z_S = Z_0 \quad (34)$$

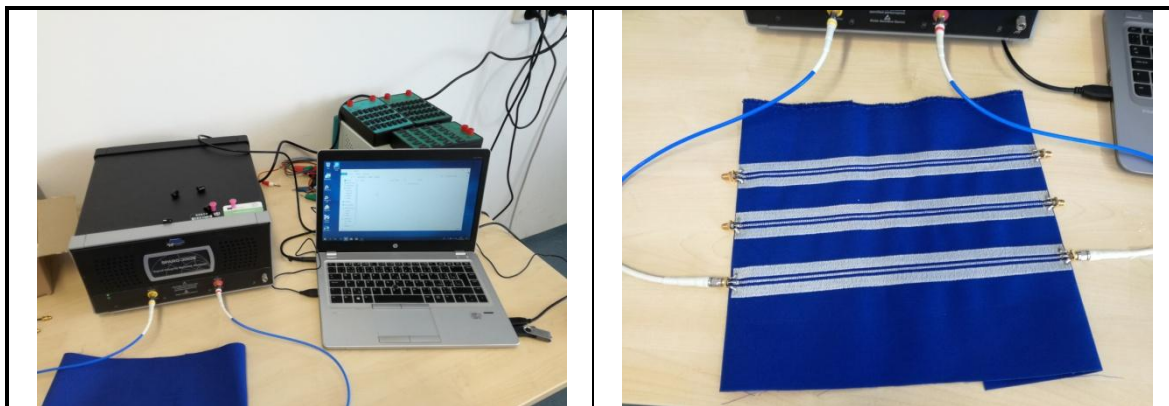
Samotné měření S-parametrů bylo uskutečněno pomocí síťového analyzátoru signálové integrity s označením SPARQ-3002E od firmy LeCroy (viz obrázek 21, kde DUT = Device Under Test označuje měřený objekt), který je určen k měření těchto S-parametrů. Princip měření tímto analyzátozem je založen na opakovaném vysílání krátkých strmých impulzů daného tvaru do buzené brány a na výstupní bráně je zpracováván přijímaný signál vzorkovačem. Požadované S-parametry nakonec získáme z podílu Fourierových obrazů buzeného a přijímaného signálu. [70], [71], [72], [73]



Obrázek 21 Síťový analyzátor signálové integrity a jeho blokové schéma (převzato z [70])

5.2.1 Měření S-parametrů pro vzorky na textilním substrátu a na DPS

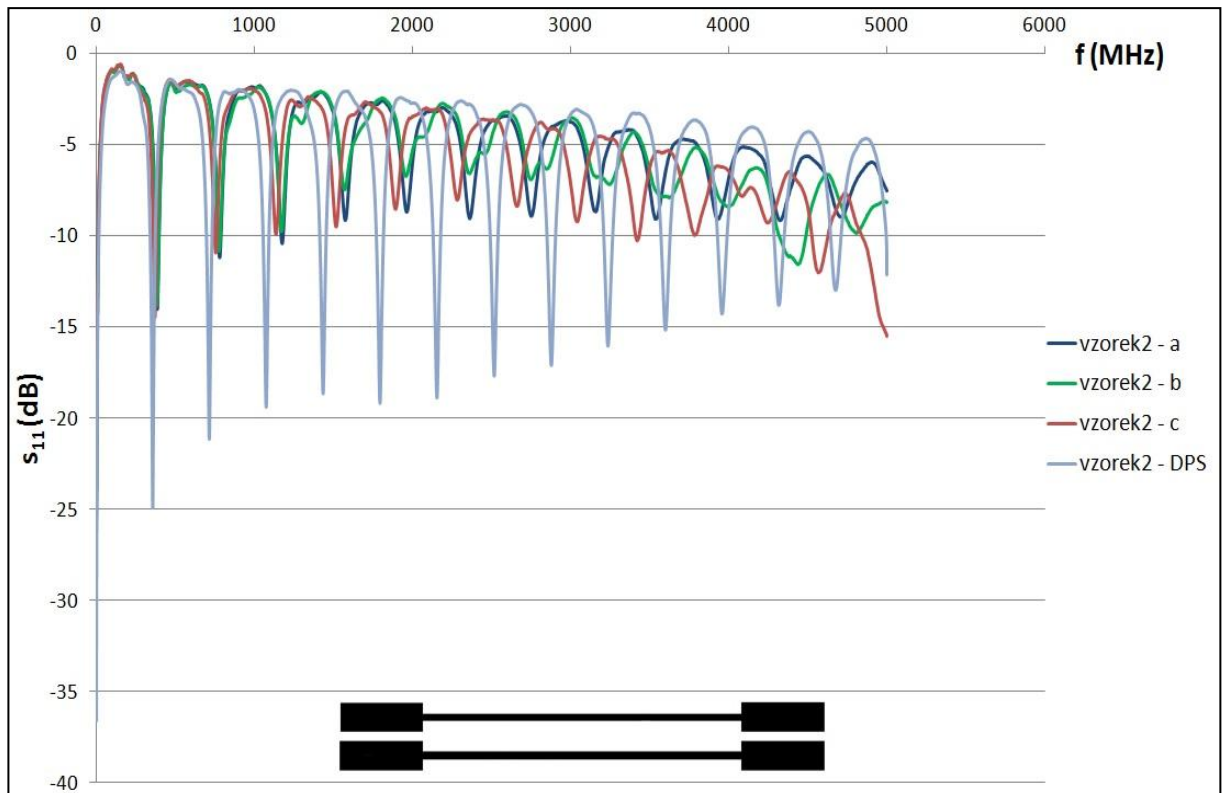
Měření rozptylových parametrů bylo provedeno ve frekvenčním pásmu 0 až 5 GHz. V tomto frekvenčním pásmu bylo měření provedeno v 16 000 bodech. Ukázka měřeného vzorku je zobrazena na obrázku 22 níže. Z naměřených a uložených dat byly poté vytvořeny grafy pro S-parametry, které jsou uvedeny níže.



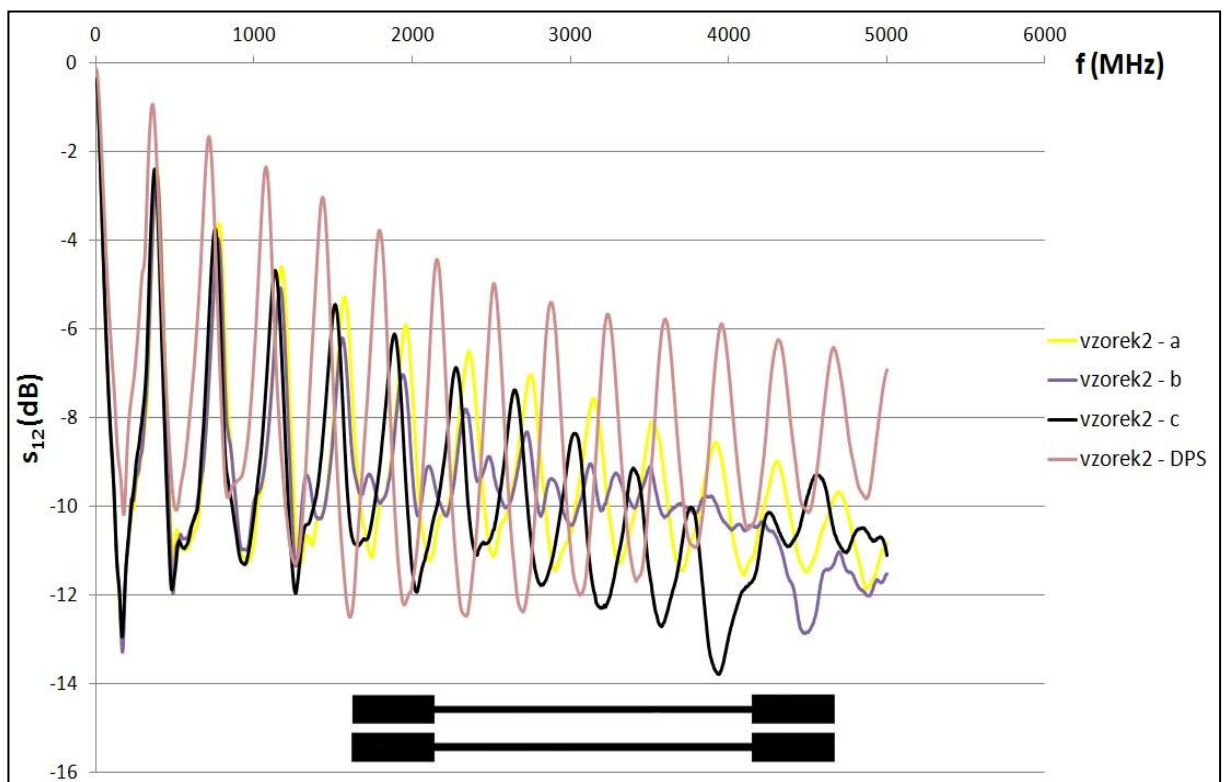
Obrázek 22 Ukázka měřeného vzorku

Následně jsou porovnávány výsledky 4 vybraných skupin vzorků, ostatní výsledky jsou součástí příloh této diplomové práce.

Prvními porovnávanými vzorky jsou vzorek 2 (3 teoreticky shodné struktury a, b, c) na textilním substrátu a vzorek 2 na DPS. Vzhledem k tomu, že zde platí princip reciprocity a symetrie, stačí tedy porovnávat u změřených vzorků pouze parametry s_{11} a s_{12} . Všechny vytvořené grafy v této práci pro S-parametry představují závislost amplitudy v decibelech (dB) na frekvenci f (MHz). Z grafů 1 a 2 je patrné, že zde dochází k rezonancím, které lze od těchto struktur očekávat. V těchto dvou grafech je při zvyšující se frekvenci také viditelný posun rezonančních frekvencí a větší rozdíl v amplitudě. Vzorek 2 na textilním substrátu a vzorek 2 na DPS představují největší shodu výsledků pro takto porovnávanou skupinu vzorků.

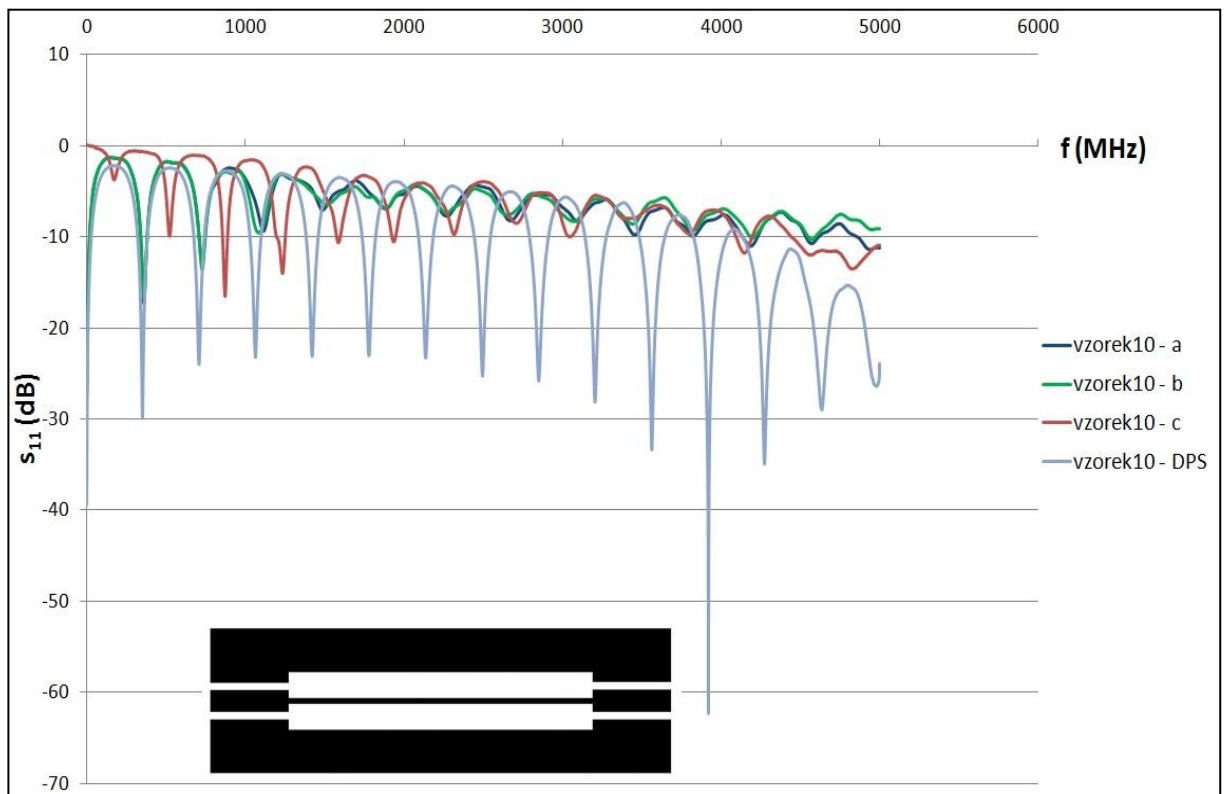


Graf 1 Parametry s_{11} pro vzorek 2

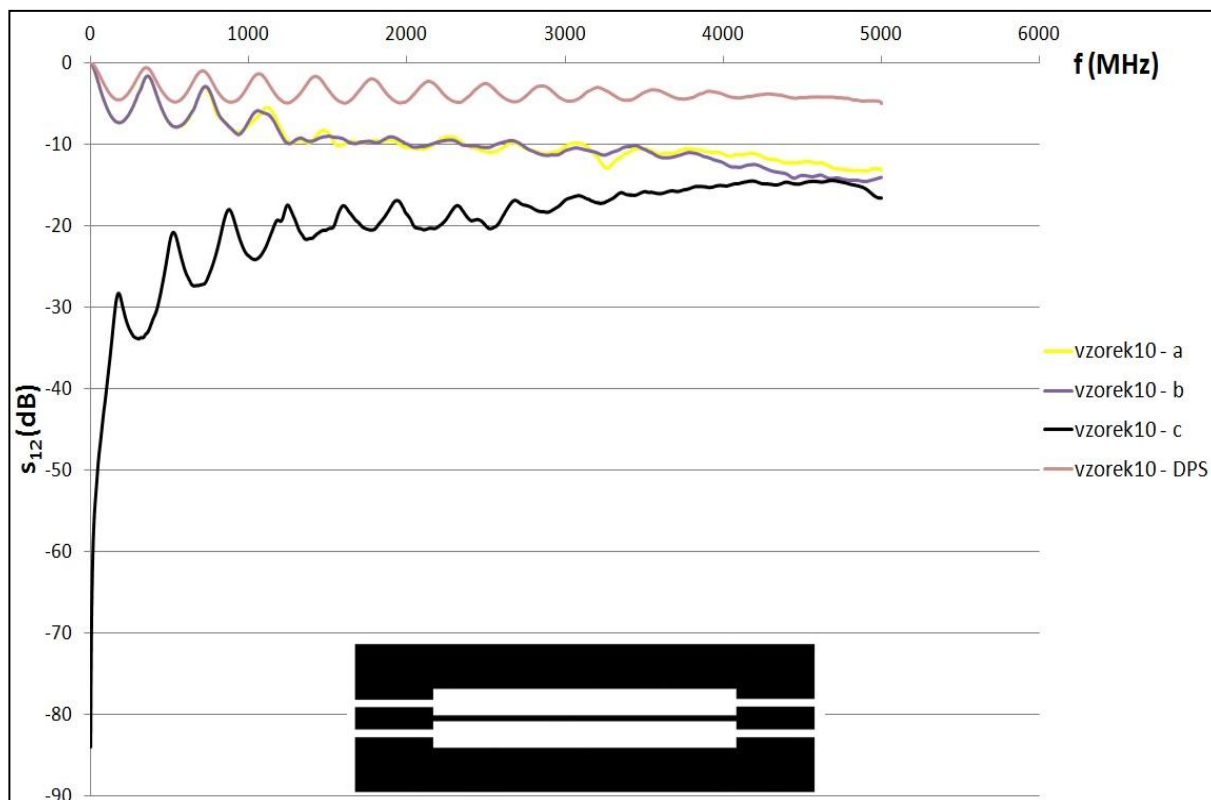


Graf 2 Parametry s_{12} pro vzorek 2

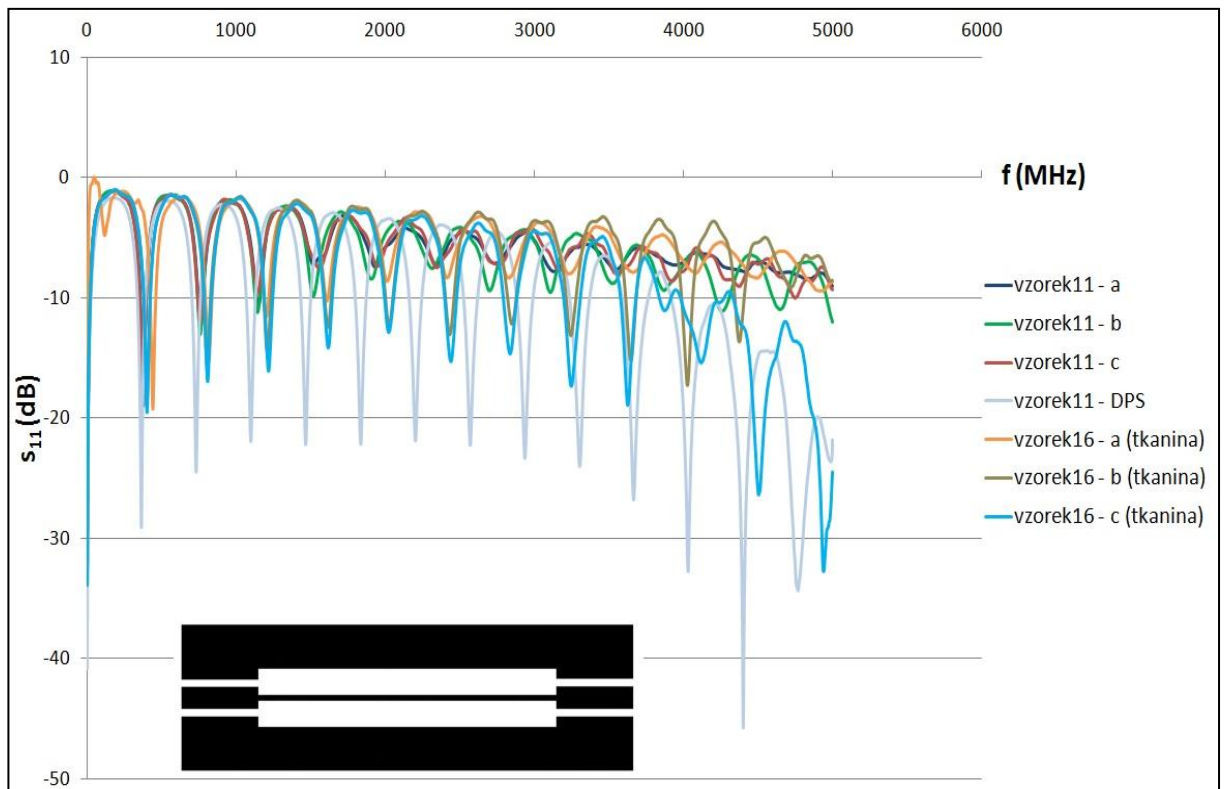
Dalšími porovnávanými vzorky jsou vzorek 10 na textilním substrátu (opět jsou změřeny tři teoreticky shodné struktury na stejné textilií označené jako a, b, c) a vzorek 10 na DPS. Z grafů 3 a 4 lze vyčíst pro jednotlivé struktury velmi rozdílné hodnoty amplitud a výrazné posuny rezonančních frekvencí. U těchto vzorků také dochází na vyšších frekvencích k velkému útlumu signálu a struktura označená jako vzorek 10 – c vykazuje naprosto odlišné vlastnosti, což je zřejmě způsobeno poškozením již při samotné výrobě této vodivé struktury (např. nalomená hybridní šicí vodivá nit) či nedokonalým nakontaktováním.



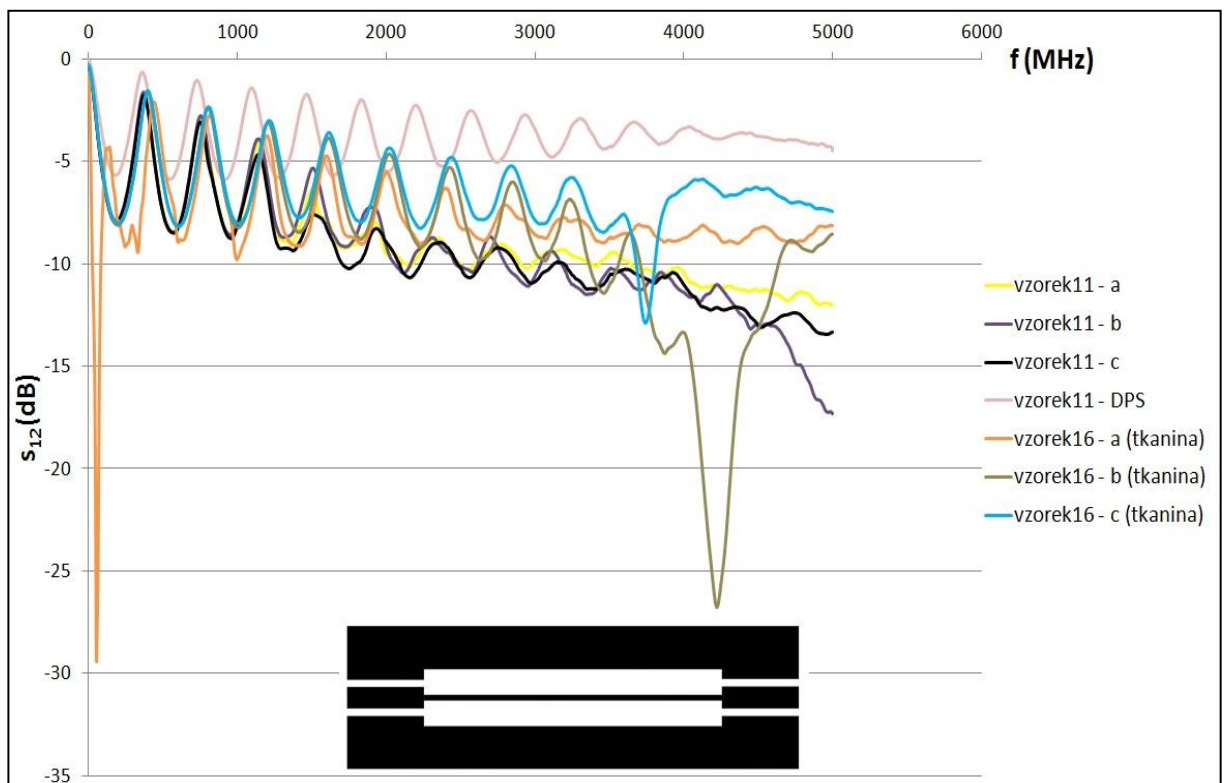
Graf 3 Parametry s_{11} pro vzorek 10

Graf 4 Parametry s_{12} pro vzorek 10

Nyní jsou porovnávány struktury reprezentující vzorek 11 (vzorek 11 a, b, c na textilním substrátu a vzorek 11 na DPS) a vzorek 16 (rozměrově shodný se vzorkem 11), u kterého je použita pro zemní plochu vodivá tkanina KASSEL. Opět u grafů 5 a 6 dochází se zvyšující se frekvencí k větším rozdílům amplitud a také jsou patrné větší posuny rezonančních frekvencí. Pro nižší frekvence do 1 GHz vyšité struktury a struktury částečně vytvořené pomocí tkaniny přibližně odpovídají struktuře na DPS. Dále je z těchto grafů viditelné, že struktury s tkaninou mají pozitivní vliv na výsledné průběhy, přibližují se tedy více průběhu struktury na DPS než struktury vytvořené pouze z nití.

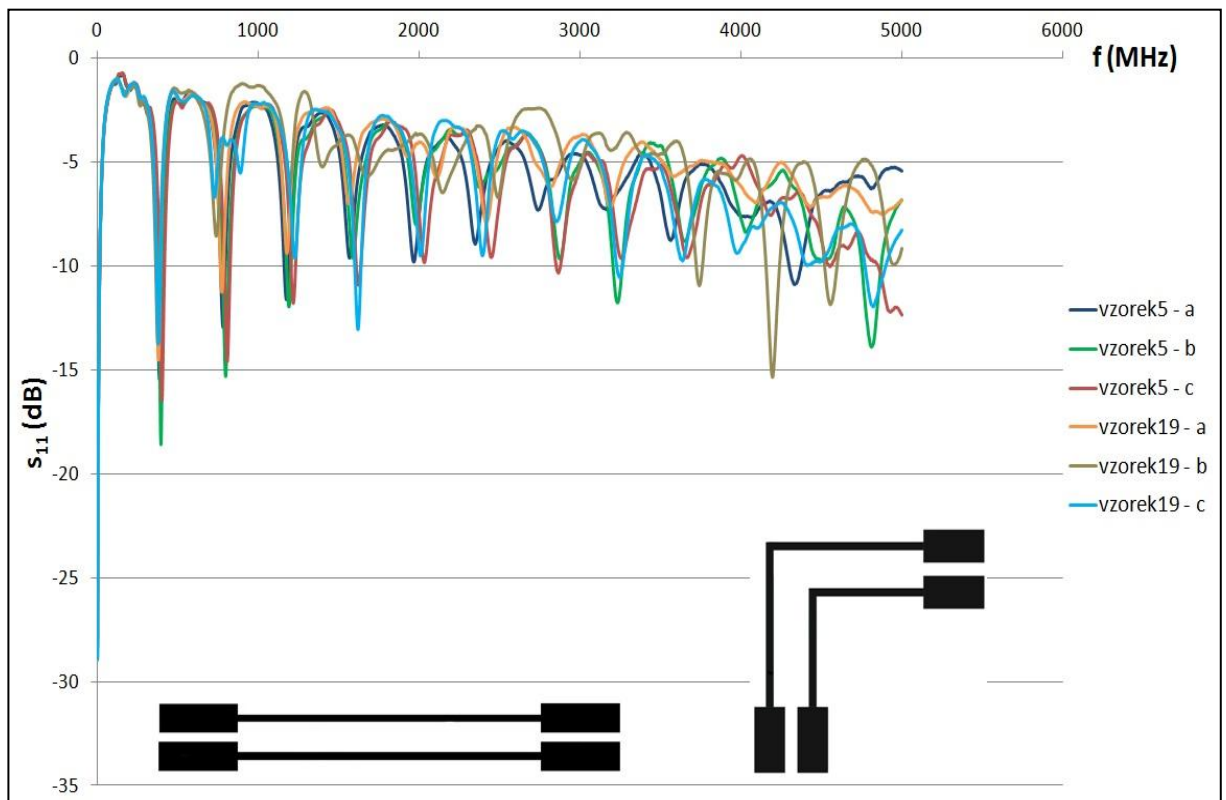


Graf 5 Parametry s_{11} pro vzorek 11 a 16

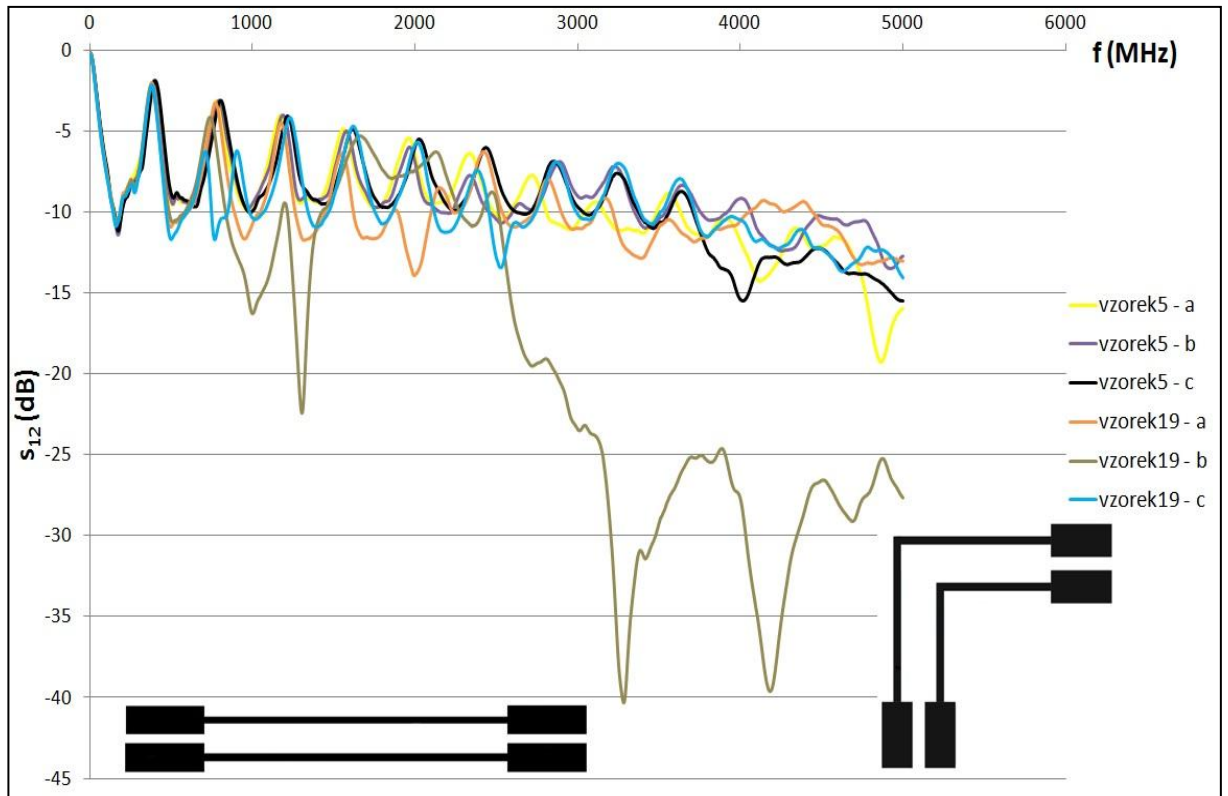


Graf 6 Parametry s_{12} pro vzorek 11 a 16

Posledními porovnávanými vzorky v této části diplomové práce jsou vzorek 5 a vzorek 19. Jedná se v tomto případě o porovnání klasického koplanárního vedení se zahnutým koplanárním vedením téměř shodných rozměrů. Pro nižší frekvence zhruba do 1 GHz lze z grafů 7 a 8 usoudit, že zahnuté struktury se téměř neodlišují od klasických rovných koplanárních struktur, ovšem pro vyšší frekvence již pozorujeme rozdílnost těchto porovnávaných struktur (tedy rozdílné amplitudy, posunuté rezonanční frekvence a zvyšující se útlum signálu).



Graf 7 Parametry s_{11} pro vzorek 5 a 19



Graf 8 Parametry s_{12} pro vzorek 5 a 19

Závěr

Propojovací struktury realizované na textilních substrátech představují v současné době aktuálně řešenou a neustále se rozvíjející problematiku. Tyto textilní propojovací struktury jsou vytvářeny určitými výrobními technologiemi, které jsou především také využívány v textilním průmyslu. Jedná se zejména o vyšívání, tkaní či pletení. Ovšem lze využít i další výrobní technologie, kterými jsou sítotisk, inkoustový tisk a naprašování. Každý z těchto uvedených výrobních procesů má však své výhody a nevýhody.

Pro vysokofrekvenční aplikace často využíváme jako propojovací strukturu planární mikrovlnná vedení, mezi které patří mikropáskové vedení, koplanární a štěrbinové vedení. U těchto vedení je využívána frekvence v řádu jednotek až desítek GHz a představují strukturu, která obsahuje zemní plochu, dielektrickou vrstvu a vlastní vedení. Tyto struktury svými rozměry představují tzv. dlouhé vedení, kdy je vlnová délka přenášeného signálu srovnatelná či menší než je délka samotného vedení. Planární struktury se především vyznačují nízkou hmotností, malými rozměry a nenáročnou výrobou.

Vlastním přínosem této diplomové práce je vytvoření konkrétního návrhu a realizace různých druhů planárních mikrovlnných vedení vyšitých na textilním substrátu, návržení a realizace způsobu nakontaktování, provedené měření a výpočty s následným porovnáním se vzorky realizovanými na desce plošných spojů.

Jako propojovací struktury byly navrženy a realizovány struktury, kterými jsou koplanární vedení, koplanární vlnovod a zahnuté koplanární vedení. Celkem bylo vodivou nití (postříbřená měď) vyšito 23 vzorků na textilním substrátu pomocí šicího stroje BERNINA 750 QE a vytvořeno 14 vzorků na DPS metodou fotolitografie, kdy byla naplátována měděná fólie o tloušťce 0,035 mm, která tvoří výsledný vodivý motiv. Pro nakontaktování těchto struktur byl použit SMA konektor, který byl připájen k realizovaným kontaktním ploškám.

Měření realizovaných vzorků bylo rozděleno na dvě části, kde v první části byla u vzorků měřena impedance nakrátko a naprázdno a ve druhé části byly pro realizované vzorky měřeny rozptylové parametry neboli tzv. S-parametry. Z naměřených hodnot impedance nakrátko a naprázdno byla vypočtena hodnota vlnové impedance, která je v kapitole 4 vypočtena také teoreticky podle přesně definovaných vztahů pro jednotlivé planární mikrovlnné struktury. Z naměřených a vypočtených hodnot je patrný rozdíl hodnot vlnové impedance pro vzorky na textilním substrátu a vzorky na DPS. Rozdílné hodnoty vlnové impedance jsou především způsobeny tím, že vodivé nitě vykazují menší elektrickou vodivost v porovnání s měděnou

fólií. Rozdílné hodnoty jsou ale také způsobeny mnohem delší smyčkou, kterou na textilním substrátu vytváří vodivá struktura z nití. Vliv zde mají i jiné poměry kapacit a indukčností realizovaných vzorků nebo může docházet k ovlivnění hodnot kontaktními jevy. U některých struktur jsou také patrné příliš velké rozdíly hodnot vlnové impedance, kdy je zřejmě vodivá nit nějakým způsobem poškozena (např. přerušení struktury či nalomení hybridní šicí vodivé nitě). Toto poškození struktury se také promítlo do vytvořených grafů pro S-parametry, kde jsou viditelně odlišné vlastnosti pro tyto struktury v porovnání s rozměrově shodnými vzorky. Z grafů je zřejmé, že zde dochází k rezonancím, které lze od těchto struktur očekávat. Pro nižší frekvence zhruba do 1 GHz přibližně odpovídají vyšité struktury vytvořeným strukturám na DPS. Naopak pro zvyšující se frekvenci do 5 GHz v těchto grafech obecně pozorujeme výraznější posuny rezonančních frekvencí, čím dál větší rozdíl amplitud a zvyšující se útlum signálu. Rozdílnost těchto S-parametrů může také být způsobena v některých případech poškozením struktury či nedokonalým nakontaktováním.

Tato diplomová práce byla vypracována přesně podle předložených bodů zadání, které jsou tímto splněny a dále podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. Plošné spoje a povrchová montáž. *ÚSTAV telekomunikací: Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: http://www.utko.feec.vutbr.cz/~misurec/vyuka/ls0607/Plosne_spoje_a_povrchova_montaz_S_P.pdf
- [2] ŠMÍD, Petr. Návrh planárních mikrovlnných filtrů a využití umělých neuronových sítí pro odhad řádu filtru. *Elektrorevue* [online]. [cit. 2019-02-20]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03041/index.html#kapL>
- [3] SOKOL, Vratislav a Jiří VAJTR. Mikrovlnná vedení. *Vizualizace elektromagnetického pole* [online]. 2003 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://vizualizace.elmag.org/>
- [4] RAIDA, Zbyněk. Slovník pojmů: Planární mikrovlnné vedení. *UREL: ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY* [online]. Brno [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=planarni_mikrovlnne_vedeni&bck=3-2-A
- [5] HANUS, Stanislav a Jiří SVAČINA. Mikrovlnná integrovaná technika (MIT). *SlidePlayer* [online]. Brno, 2002 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2332766/>
- [6] Šíření vln na mikropáscích a ve vlnovodech. *FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY: VŠB - TU Ostrava* [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/sireni_vln/teze/otazka_17.pdf
- [7] WU, Tzong-Lin. Microwave Filter Design: Microstrip Lines. *Electro Magnetic Compatibility Lab.: National Taiwan University* [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://ntuemc.tw/upload/file/2011021716275842131.pdf>
- [8] Microstrip. *MICROWAVES101.COM: Microwave Encyclopedia* [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/microstrip>
- [9] Koplanární vedení a jejich analýza metodou konformního zobrazení. *Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR* [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: https://www.ufe.cz/sites/default/files/ctyroky/FJFI/ELDY2/koplanarni_vedeni.pdf

- [10]NOVÁK, Mirko. Aplikace matematiky: Některé metody pro určení numerické hodnoty funkce $sn(u, k)$. *Czech Digital Mathematics Library* [online]. 1958 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/102635/AplMat_03-1958-6_1.pdf
- [11]WADELL, Brian C. *Transmission line design handbook*. Boston: Artech House, 1991. ISBN 0-89006-436-9.
- [12]Vysokofrekvenční konektory SMC. *Vyvoj.hw: profesionální elektronika* [online]. 2001 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/soucastky/vysokofrekvencni-konektory-smc.html>
- [13]RF Connector guide. *Lane Electronics* [online]. 2007 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.fclane.com/sites/default/files/rfguideen.pdf>
- [14]HIGH FREQUENCY CONNECTORS. *Radiall* [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.radiall.com/products/rf-coaxial-connectors/high-frequency-connectors.html>
- [15]Vysokofrekvenční konektory. *TME Electronic Components* [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/pages/New_Product:vysokofrekvencni-konektory-unicon.html
- [16]LINZ, Torsten, Christine KALLMAYER a Herbert REICHL. *Embroidering Electrical Interconnects with Conductive Yarn for The Integration of Flexible Electronic Modules into Fabric* [online]. 2005, 4 s. [cit. 2018-10-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/4198454_Embroidering_electrical_interconnects_with_conductive_yarn_for_the_integration_of_flexible_electronic_modules_into_fabric
- [17]MATTILA, H. R. *Intelligent Textiles and Clothing*. North America: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [18]Co to jsou smart textilie?. *Envi Web: zpravodajství životního prostředí již od roku 1999* [online]. 2008 [cit. 2018-10-04]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/68946>
- [19]BĚLSKÝ, Michal. Nový typ textilu českých vědců umí nahradit kabely. *Pozitivní zprávy* [online]. 06.06.2016 [cit. 2018-10-04]. Dostupné z: <http://pozitivni-zpravy.cz/novy-typ-textilu-ceskych-vedcu-umi-nahradit-kabely/>

- [20] GOW Smart Fabric Shirt With Integrated Sensors. *THINKGEEK* [online]. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.thinkgeek.com/product/179f/>
- [21] TYLER, Neil. While smart textiles for wearables remains in its infancy, its potential is huge. *Newelectronics* [online]. 2016 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/while-smart-textiles-for-wearables-remains-in-its-infancy-its-potential-is-huge/119045/>
- [22] 11 Startups Weaving Smart Clothes for Athletes. *Nanalyze* [online]. 2018 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.nanalyze.com/2018/02/11-startups-smart-clothes-athletes/>
- [23] Embroidered Smart Textiles Electronic Components in Life Saving Applications. *EPCI European Passive Components Institute* [online]. 2017 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://passive-components.eu/embroidered-smart-textiles-electronic-components-in-life-saving-applications/>
- [24] Global Smart Textiles for Military Market 2018 – BAE Systems, Mide Technology, Ohmatex, Advanced Fabric Technology, BeBop Sensors, Directa Plus. *Northwest Trail* [online]. 2018 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://nwctrail.com/2018/04/09/global-smart-textiles-for-military-market-2018-bae-systems-mide-technology-ohmatex-advanced-fabric-technology-bebop-sensors-directa-plus/>
- [25] STENING, Belinda. LincLab. *Curve* [online]. 2003 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.curvelive.com/Magazine/Archives/two/LincLab>
- [26] Smart textiles. *ATRIA Innovation* [online]. 2016 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://atriainnovation.com/en/textiles-inteligentes/>
- [27] SCHEULEN, Klaus. Smart textiles - technology and application fields. *SlideShare* [online]. 2013 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/sirris_be/03-smart-textiles-technology-and-application-fields-scheulen-lige
- [28] The age of smart fabrics | Smart textiles in healthcare. *Dr. Hempel Digital Health Network* [online]. 2018 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.dr-hempel-network.com/digital-health-technology/smart-textiles-in-healthcare/>

- [29]RAIDA, Zbyněk. Tištěné antény - realizace, vlastnosti, aplikace. XXVIII. *KONFERENCE RADIOKOMUNIKACE 2018* [online]. [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: http://www.konferadio.cz/files/prezentace/2016/23_Raida_Tistene-anteny.pdf
- [30]SYDUZZAMAN, Md, S. U. PATWARY, K. FARHANA a S. AHMED. Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview. *ResearchGate* [online]. 2015 [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/279847961>
- [31]REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Elektrický odpor vodiče, Ohmův zákon pro část obvodu. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/241-elektricky-odpor-vodice-ohmuv-zakon-pro-cast-obvodu>
- [32]PEČÍRKOVÁ, Jaroslava. Příze - nit - vlákno. *NAŠE ŘEČ* [online]. [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <http://nase-rec.ujc.cas.cz/archiv.php?art=6635>
- [33]E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies. *Textile World* [online]. 2010 [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2010/04/e-textiles-for-wearability-review-of-integration-technologies/>
- [34]STOPPA, Matteo a Alessandro CHIOLERIO. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. *NCBI* [online]. 2014 [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4168435/>
- [35]POLÁK, Pavel. Intrastat: příručka pro zpracování statistických hlášení Intrastat. Praha: BOVA POLYGON, 2005. ISBN 80-727-3126-2.
- [36]Elektricky vodivé materiály. *Publi* [online]. [cit. 2018-10-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/04.html>
- [37]Podstata, význam a historie polymerů. *Publi* [online]. [cit. 2018-10-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>
- [38]Speciální termoplasty pro náročné aplikace. *Publi* [online]. [cit. 2018-10-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/19.html>
- [39]NEŠPŮREK, Stanislav, Jan PROKEŠ a Jaroslav STEJSKAL. Vodivé polymery: Inteligentní materiály pro nové století. *Vesmír: věda, příroda, člověk, společnost* [online]. 2001 [cit. 2018-10-18]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2001/cislo-1/vodive-polymery.html>

- [40] REJSA, Dagmar. TEXTILNÍ VLÁKNA. *Krinolína* [online]. 2017 [cit. 2018-10-18]. Dostupné z: <http://www.krinolina.cz/textilni-vlakna/>
- [41] CONDUCTIVE THREADS. *KOBAKANT* [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=379>
- [42] JAMADAR, Saddamhusen. Applications of Smart and Interactive Textiles. *Textile Learner* [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://textilelearner.blogspot.com/2013/04/applications-of-smart-and-interactive.html>
- [43] PRINIOTAKIS, Georgios, Ioannis CHRONIS a Anastasios TZERACHOGLU. Development of conductive sewing threads using experimental laboratory device. *ResearchGate* [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/259849979_Development_of_conductive_sewing_threads_using_experimental_laboratory_device
- [44] ELEKTRICKY VODIVÉ HYBRIDNÍ NITĚ. *CLEVERTEX* [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://www.clevertex.cz/vodive-nite/elektricky-vodive-hybridni-nite-detail-761>
- [45] SAMANO, Anthony. Measurements of Conductive Film. *Brunel University London* [online]. 2017, leden [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/14982/1/FulltextThesis.pdf%20>
- [46] ONDROUŠKOVÁ, Marie. RUČNÍ ŠITÍ. *PEDAGOGICKÁ FAKULTA Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: www.ped.muni.cz/wtech/03_studium/textil-rucni_siti.ppt
- [47] KHAN, Rahat. Principle of Lock Stitch Formation Techniques. *TextileLearner: One stop solution for textiles* [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://textilelearner.blogspot.com/2015/06/principle-of-lock-stitch-formation.html>
- [48] How a sewing machine works. *REBRN* [online]. 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://rebrn.com/re/how-a-sewing-machine-works-5041461/>
- [49] Design & Technology: Fabrics. *BBC* [online]. [cit. 2018-11-07]. Dostupné z: <http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/design/textiles/fabricsrev1.shtml>
- [50] The Differences Between Woven and Knit Fabrics. *DRESSED.SO* [online]. 2014 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <http://www.dressed.so/blog/2014/07/15/woven-and-knit/>

- [51] PÁN, Václav. TISK / TECHNOLOGIE. *MALONÁKLADOVÝ SÍTOTISK PRECIZNÍ RUČNÍ PRÁCE* [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: http://www.pan-tisk.cz/01.01.tisk_technologie.html
- [52] Tiskové technologie: Sítotisk. *Printing* [online]. 2001 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.printing.cz/clanky/tiskove-technologie/sitotisk-1128cz>
- [53] HOBBY, Alan. SCREEN PRINTING FOR THE INDUSTRIAL USER. *Gwent Group: Advanced Materials systems* [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: http://www.gwent.org/gem_screen_printing.html
- [54] Sintrování. *E-learning VŠCHT* [online]. [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: https://e-learning.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/sintrovani.html
- [55] THOMA, Patrik. Je budoucnost tisku inkjetová?. *SVĚT TISKU* [online]. [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=7017
- [56] YONGSANG, Kim, Yoo HOI-JUN a Kim HYEJUNG. Electrical Characterization of Screen - Printed Circuits on the Fabric. *ResearchGate* [online]. 2010, únor [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/224086148_Electrical_Characterization_of_Screen-Printed_Circuits_on_the_Fabric
- [57] KHUN, Josef a Vladimír SCHOLTZ. Nízkoteplotní plazma IV – doutnavý výboj. *ALDEBARAN* [online]. 2012 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_42_pla.php
- [58] Technologie výroby a používané materiály. *FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ: Ústav mikroelektroniky* [online]. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_3_2.htm
- [59] CoreDRAW X8: Příručka. *SW.cz* [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: https://data.sw.cz/sw/extranet/Novinky/CoreDRAWX8_p%C5%99%C3%ADru%C4%8Dka.pdf
- [60] VLNY NA VEDENÍCH, LECHEROVY DRÁTY. *VŠB - TU Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky* [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/sireni_vln/mereni/vlny_na_vedenich.pdf

- [61]SZENDIUCH, Ivan. Trendy v pouzdření a propojování: moderní substráty a pouzdra. *FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ: Ústav mikroelektroniky* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/04a_pouzdeni_a_substraty.pdf
- [62]ECT - RF High Frequency Probes. *Everett Charles Technologies (ECT)* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: https://ect-cpg.com/wp-content/uploads/2018/10/RF-probe_Overview-flyer.pdf
- [63]Pájení v elektrotechnice (měkké). *Publi* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/396/02.html>
- [64]Konektor SMA (f) straight. *SECTRON* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://eshop.sectron.cz/cs/konektor-sma-f-straight-edge/p-1434/>
- [65]Magnetic Connectors. *Mindsets* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://mindsetsonline.co.uk/shop/magnetic-connectors/>
- [66]Neodymové magnety. *UNIMAGNET* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/>
- [67]RAIDA, Zbyněk. Charakteristická impedance. *UREL: ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=charakteristicka_impedance&bck=2-5-A
- [68]PUNČOCHÁŘ, Josef. Dvojbrany - rozdělení, rovnice (modely). *VŠB - TU Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_04.pdf
- [69]VRBA, Jan. *Úvod do mikrovlnné techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02112-2.
- [70]PROCHÁZKA, Tomáš a Zdeněk BARTOŇ. S-parametry. *Elektrorevue: Časopis pro elektrotechniku* [online]. [cit. 2019-04-28]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html>
- [71]LeCroySPARQ - vícebranové vektorové analyzátoři signálové integrity. *Vyvoj.hw.cz: profesionální elektronika* [online]. 2013 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/lecroy-sparq-vicebranove-vektorove-analyzatory-signalove-integrity>

- [72] Měření strukturované kabeláže. *SOLARIX* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.solarix.cz/info.jsp?name=mereni&print=1>
- [73] ŠIMŮNEK, Martin. Testování kabelů a PCB. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2011 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:11894/testovani-kabelu-a-pcb>

Seznam tabulek

TABULKA 1 PŘEHLED KOAXIÁLNÍCH VF KONEKTORŮ (PŘEVZATO Z [13]).....	21
TABULKA 2 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI KOVOVÝCH MONOFILAMENTŮ (PŘEVZATO Z [34]).....	25
TABULKA 3 NAVRHNUTÉ A REALIZOVANÉ VZORKY	34
TABULKA 4 SPOTŘEBA MATERIÁLU A VYTVOŘENÝ POČET STEHŮ PRO VYBRANÉ VZORKY.....	37
TABULKA 5 REALIZOVANÉ VZORKY NA TEXTILNÍM SUBSTRÁTU	38
TABULKA 6 REALIZOVANÉ VZORKY NA DPS	41
TABULKA 7 NÁVRH DRUHÉHO A TŘETÍHO ZPŮSOBU KONTAKTOVÁNÍ (PŘEVZATO Z [64], [65], [66])	45
TABULKA 8 TEORETICKÉ VÝPOČTY PRO VZORKY NA TEXTILNÍM SUBSTRÁTU	47
TABULKA 9 TEORETICKÉ VÝPOČTY PRO VZORKY NA DPS.....	48
TABULKA 10 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY IMPEDANCÍ (TEXTILIE) PRO FREKVENCI 1 KHz ...	50
TABULKA 11 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY IMPEDANCÍ (TEXTILIE) PRO FREKVENCI 100 KHz	51
TABULKA 12 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY IMPEDANCÍ (DPS) PRO FREKVENCI 1 KHz.....	52
TABULKA 13 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY IMPEDANCÍ (DPS) PRO FREKVENCI 100 KHz.....	52

Seznam obrázků

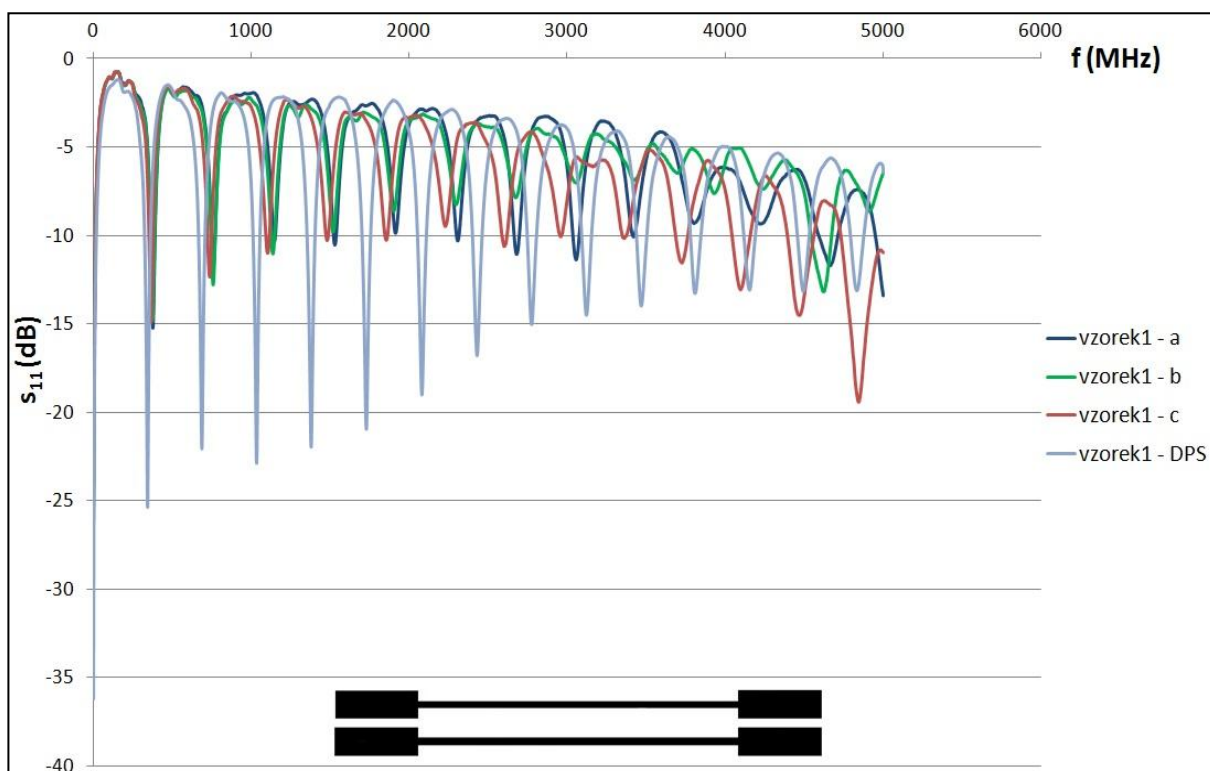
OBRÁZEK 1 ZÁKLADNÍ TYPY MIKROPÁSKOVÉHO VEDENÍ (PŘEVZATO Z [5], [7]).....	15
OBRÁZEK 2 ZÁKLADNÍ TYPY KOPLANÁRNÍHO VEDENÍ A ŠTĚRBINOVÉ VEDENÍ (PŘEVZATO Z [5])	17
OBRÁZEK 3 SYMETRICKÉ KOPLANÁRNÍ VEDENÍ (PŘEVZATO Z [5])	18
OBRÁZEK 4 SYMETRICKÝ KOPLANÁRNÍ VLNOVOD (PŘEVZATO Z [5])	19
OBRÁZEK 5 UKÁZKY KOAXIÁLNÍCH VYSOKOFREKVENČNÍCH KONEKTORŮ (PŘEVZATO Z [15]) .	20
OBRÁZEK 6 APLIKACE SMART TEXTILIÍ (PŘEVZATO Z [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]).....	23
OBRÁZEK 7 VODIVÁ PŘÍZE S KOVOVÝM JÁDREM (PŘEVZATO Z [33]).....	24
OBRÁZEK 8 VODIVÁ PŘÍZE S NEVODIVÝM JÁDREM (PŘEVZATO Z [33]).....	26
OBRÁZEK 9 VODIVÁ PŘÍZE BEZ JÁDRA (PŘEVZATO Z [33]).....	26
OBRÁZEK 10 STROJOVÉ VYŠÍVÁNÍ POMOCÍ ŠICÍHO STROJE (PŘEVZATO Z [48])	29
OBRÁZEK 11 PRINCIP TKANÍ (PŘEVZATO Z [49])	30
OBRÁZEK 12 PRINCIP PLETENÍ (PŘEVZATO Z [50]).....	30
OBRÁZEK 13 PRINCIP SÍTOTISKU (PŘEVZATO Z [53])	31
OBRÁZEK 14 SINTROVÁNÍ ČÁSTIC A KATODOVÉ NAPRAŠOVÁNÍ (PŘEVZATO Z [54], [58]).....	32
OBRÁZEK 15 ZOBRAZENÍ ZVĚTŠENÉ STRUKTURY PRO VZOREK 1	37
OBRÁZEK 16 VYSOKOFREKVENČNÍ SONDY (PŘEVZATO Z [62]).....	44
OBRÁZEK 17 REALIZACE DRUHÉHO A TŘETÍHO ZPŮSOBU KONTAKTOVÁNÍ.....	46
OBRÁZEK 18 MĚŘENÍ IMPEDANCE NAKRÁTKO A NAPRÁZDNO LCR MĚŘIČEM	49
OBRÁZEK 19 SCHÉMA DVOJBRANU S ORIENTACÍ PROUDŮ A NAPĚTÍ (PŘEVZATO Z [68]).....	54
OBRÁZEK 20 DVOJBRAN S VYZNAČENÝMI ZDROJOVÝMI A ODRAŽENÝMI VLNAMÍ (PŘEVZATO Z [70]).....	55
OBRÁZEK 21 SÍŤOVÝ ANALYZÁTOR SIGNÁLOVÉ INTEGRITY A JEHO BLOKOVÉ SCHÉMA (PŘEVZATO Z [70])	56
OBRÁZEK 22 UKÁZKA MĚŘENÉHO VZORKU	57

Seznam grafů

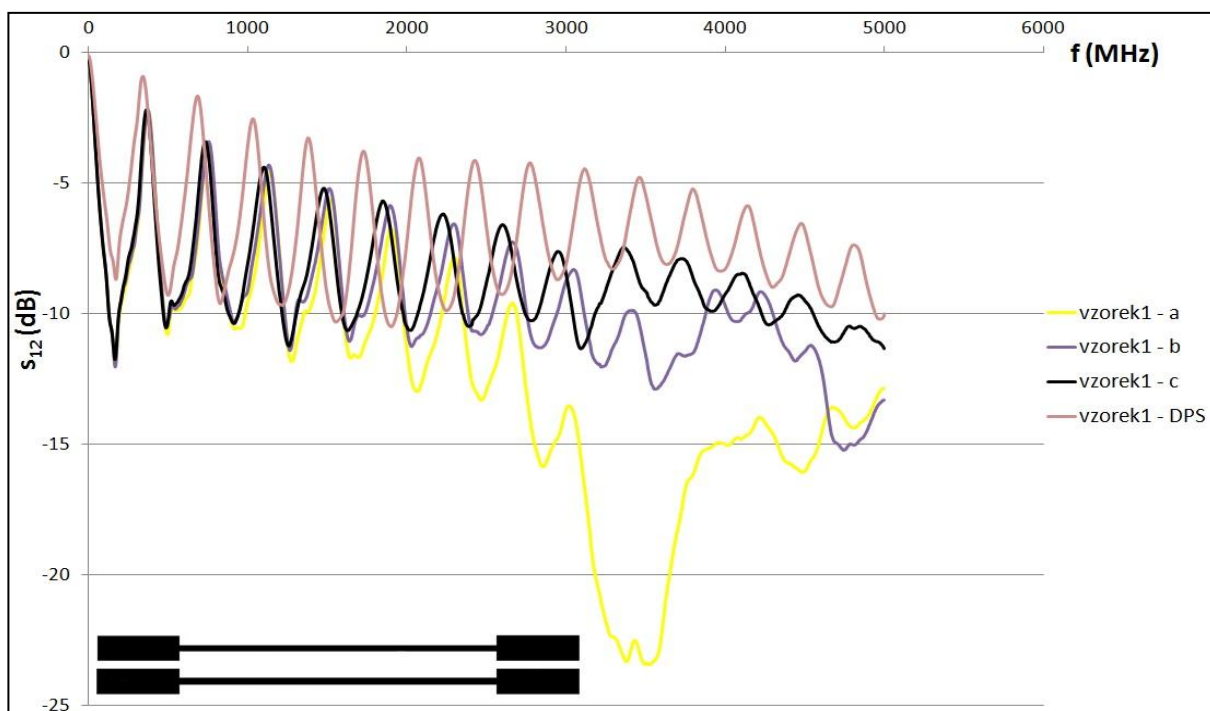
GRAF 1 PARAMETRY S_{11} PRO VZOREK 2	58
GRAF 2 PARAMETRY S_{12} PRO VZOREK 2	58
GRAF 3 PARAMETRY S_{11} PRO VZOREK 10	59
GRAF 4 PARAMETRY S_{12} PRO VZOREK 10	60
GRAF 5 PARAMETRY S_{11} PRO VZOREK 11 A 16	61
GRAF 6 PARAMETRY S_{12} PRO VZOREK 11 A 16	61
GRAF 7 PARAMETRY S_{11} PRO VZOREK 5 A 19	62
GRAF 8 PARAMETRY S_{12} PRO VZOREK 5 A 19	63

Přílohy

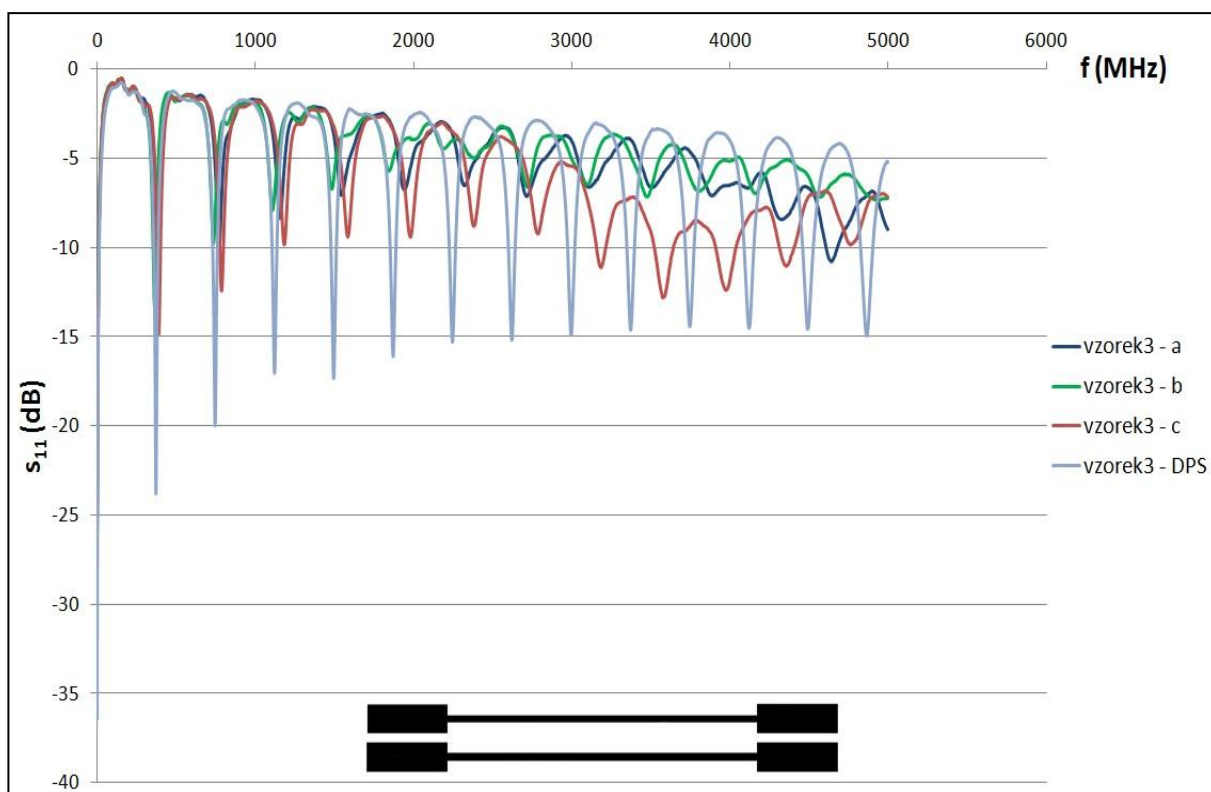
Příloha A – Grafy S-parametrů pro porovnávaná koplanární vedení



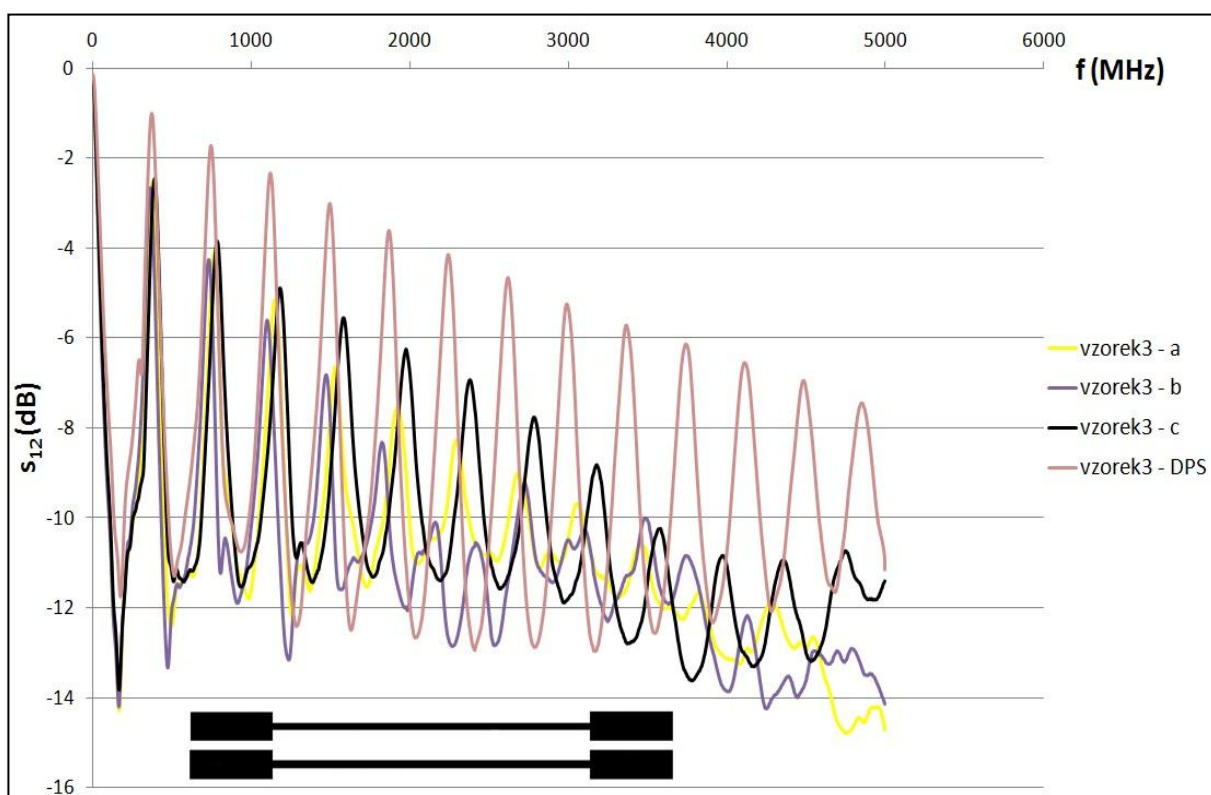
Graf A 1 Parametry s_{11} pro vzorek 1



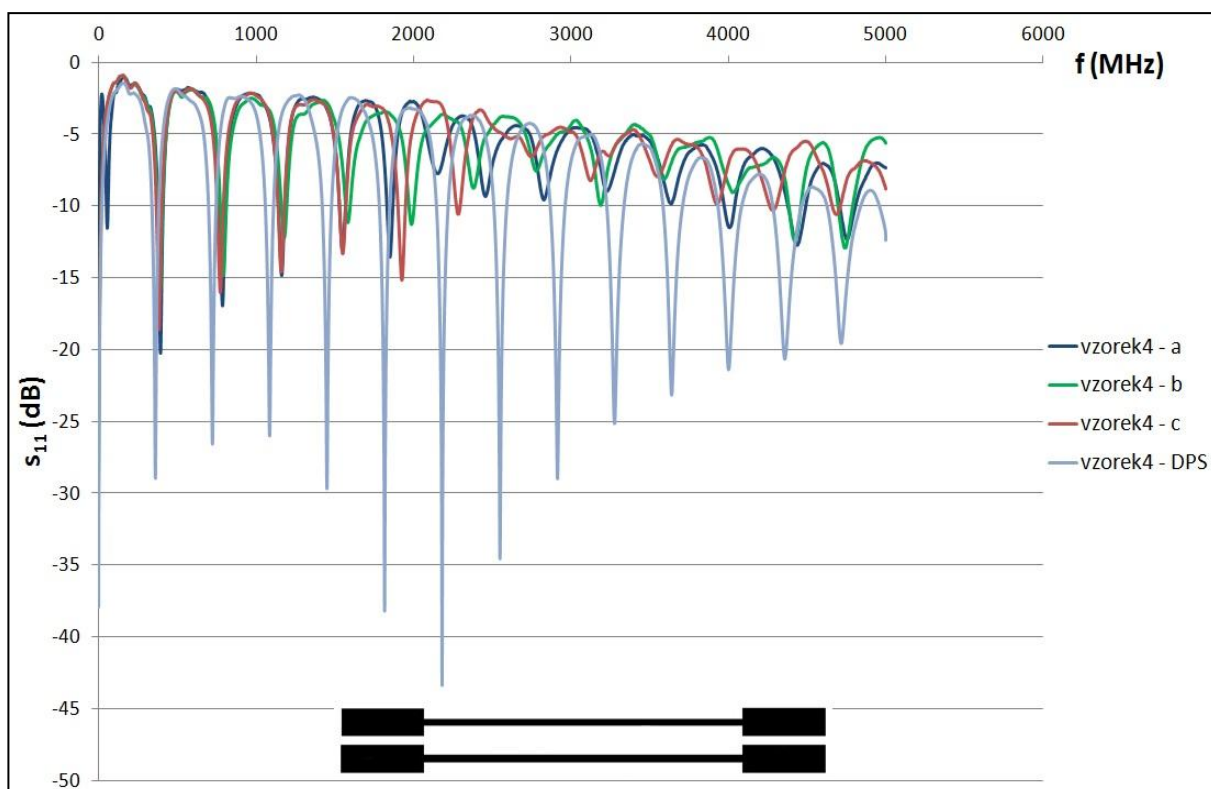
Graf A 2 Parametry s_{12} pro vzorek 1



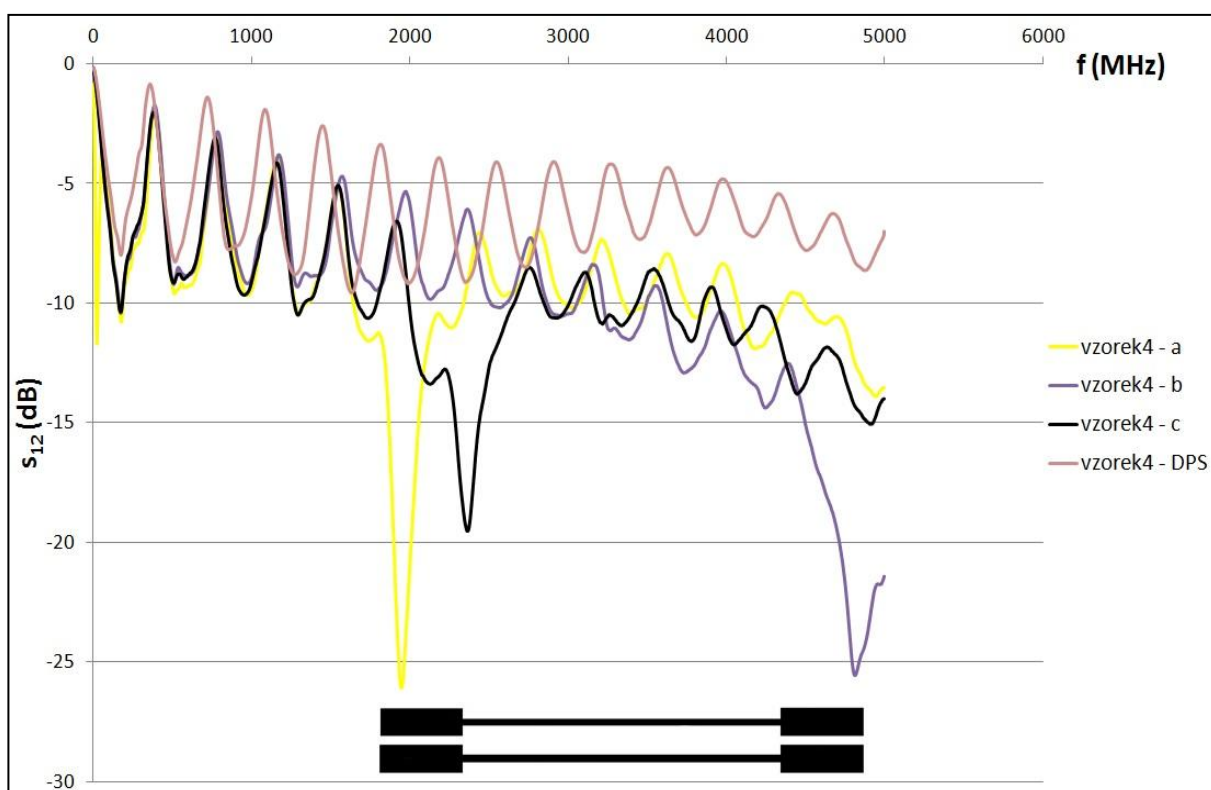
Graf A 3 Parametry s_{11} pro vzorek 3



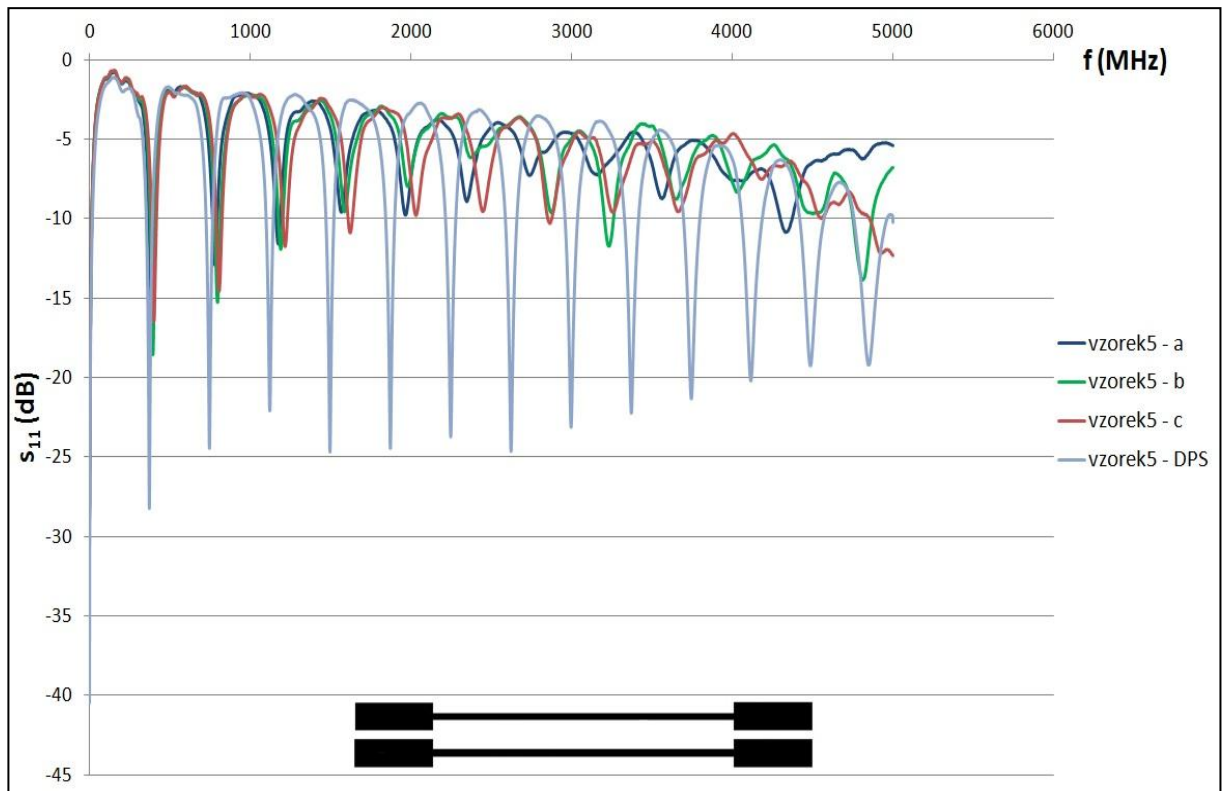
Graf A 4 Parametry s_{12} pro vzorek 3



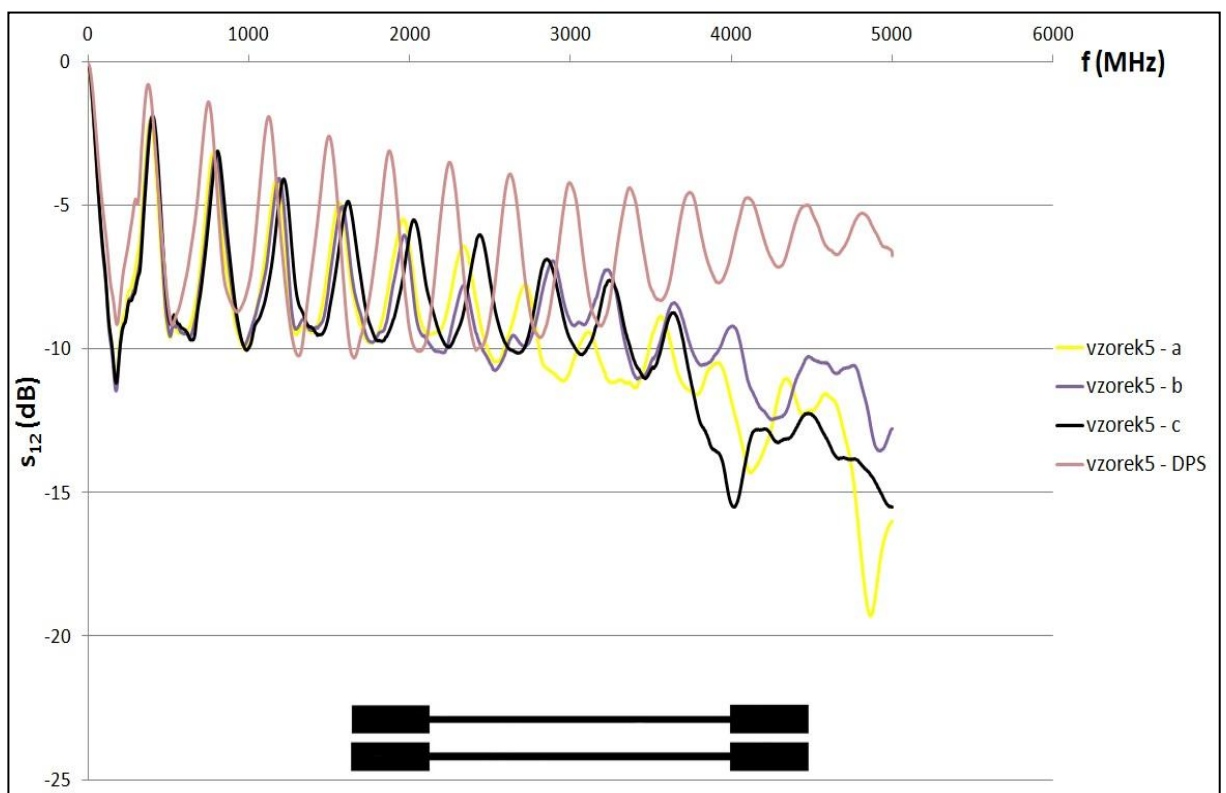
Graf A 5 Parametry s_{11} pro vzorek 4



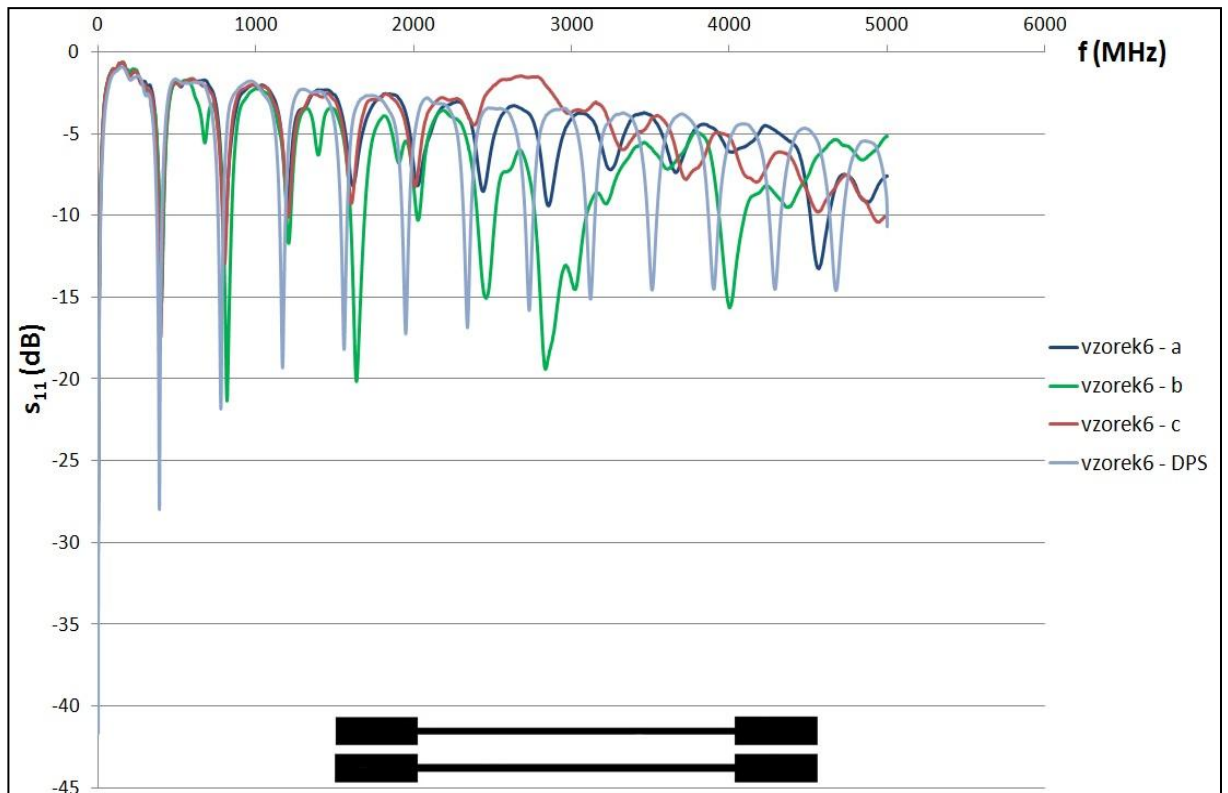
Graf A 6 Parametry s_{12} pro vzorek 4



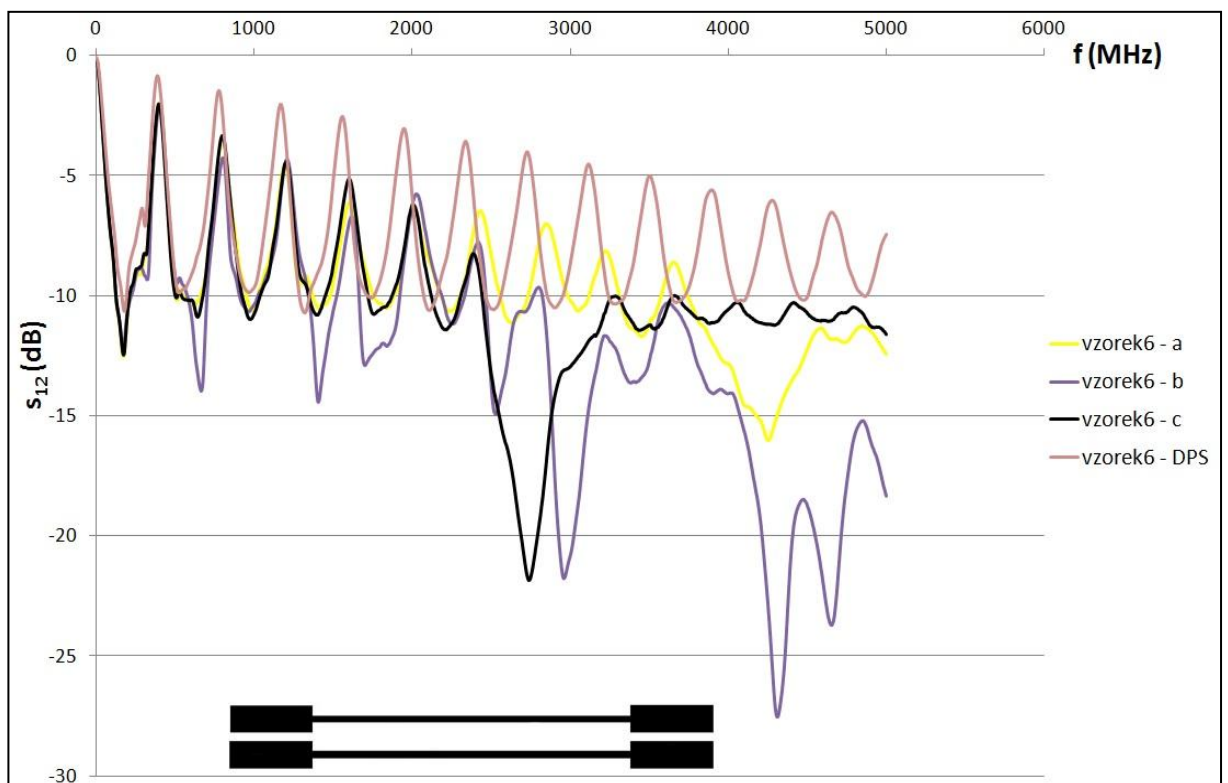
Graf A 7 Parametry s_{11} pro vzorek 5



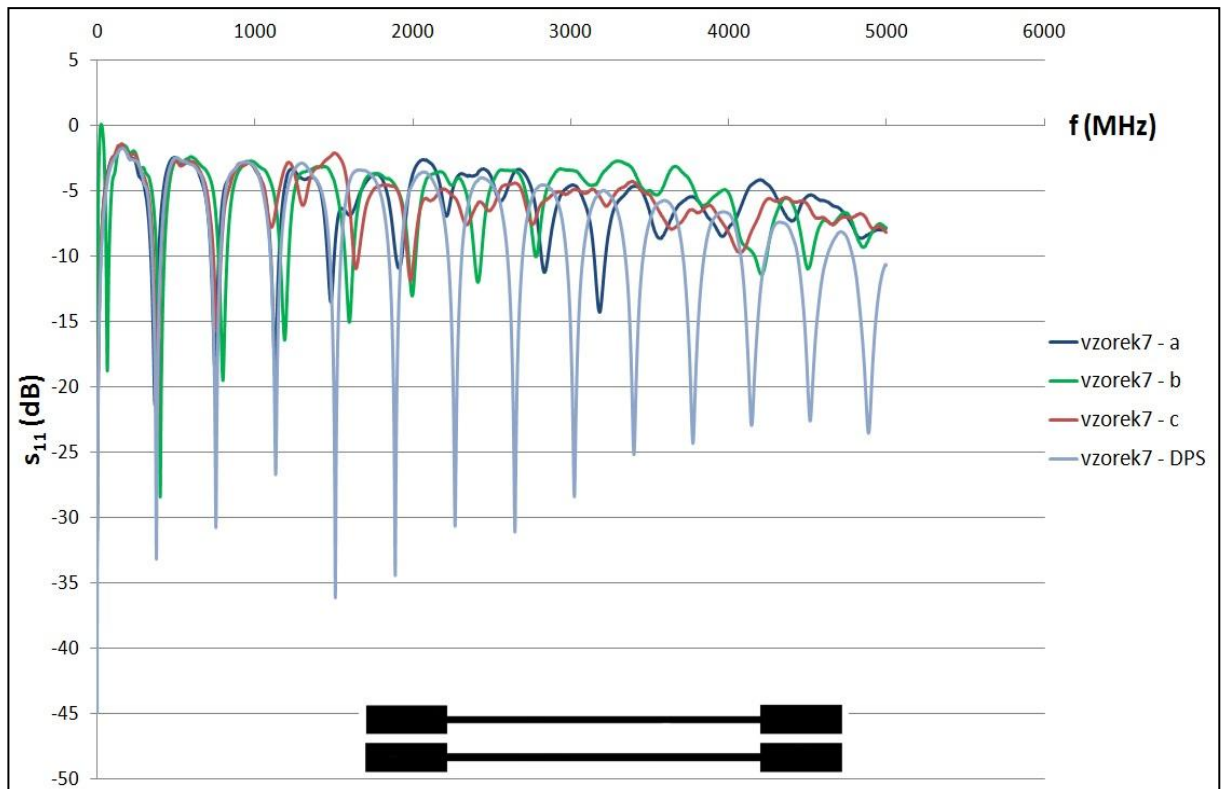
Graf A 8 Parametry s_{12} pro vzorek 5



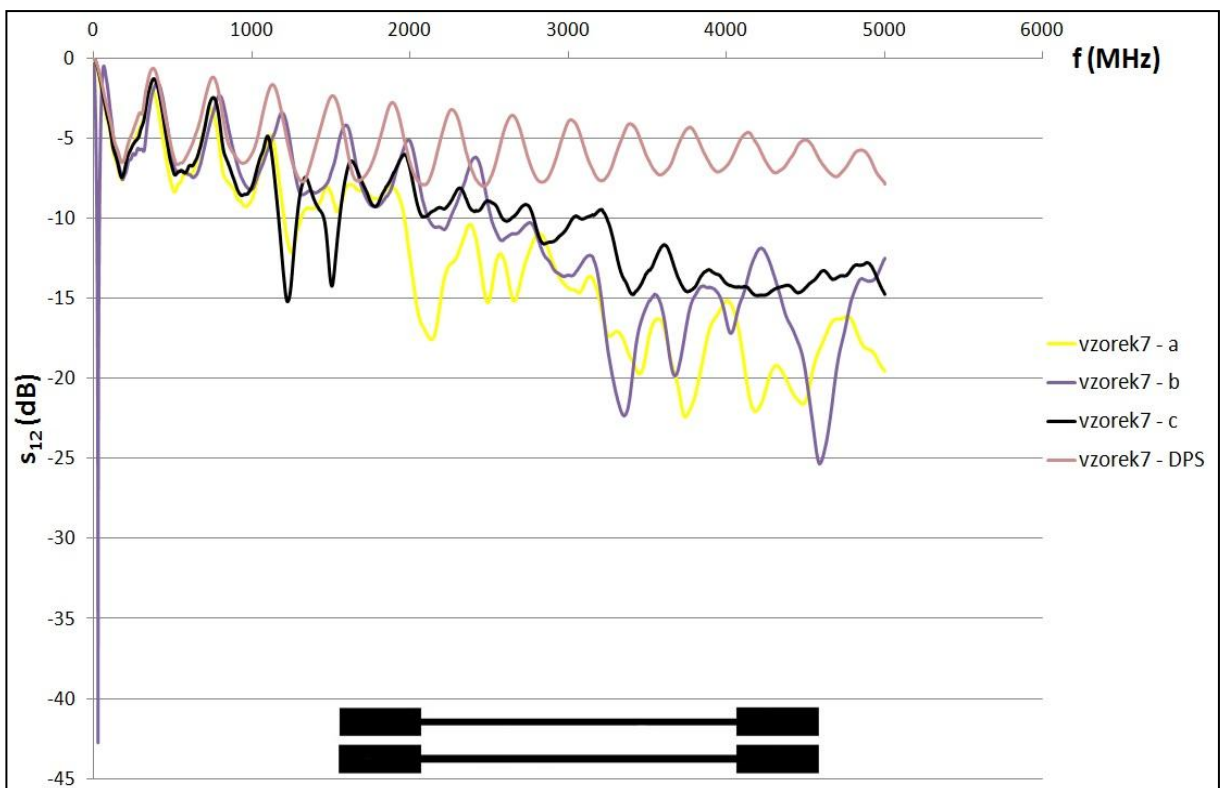
Graf A 9 Parametry s_{11} pro vzorek 6



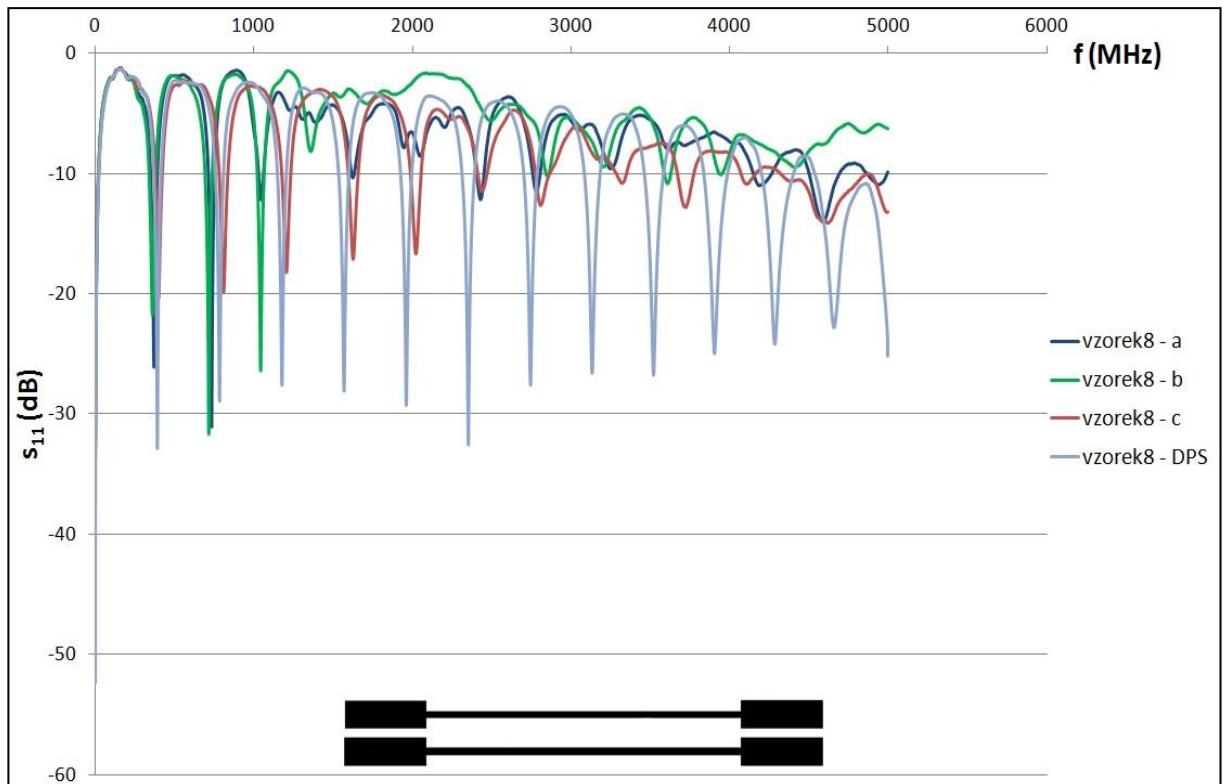
Graf A 10 Parametry s_{12} pro vzorek 6



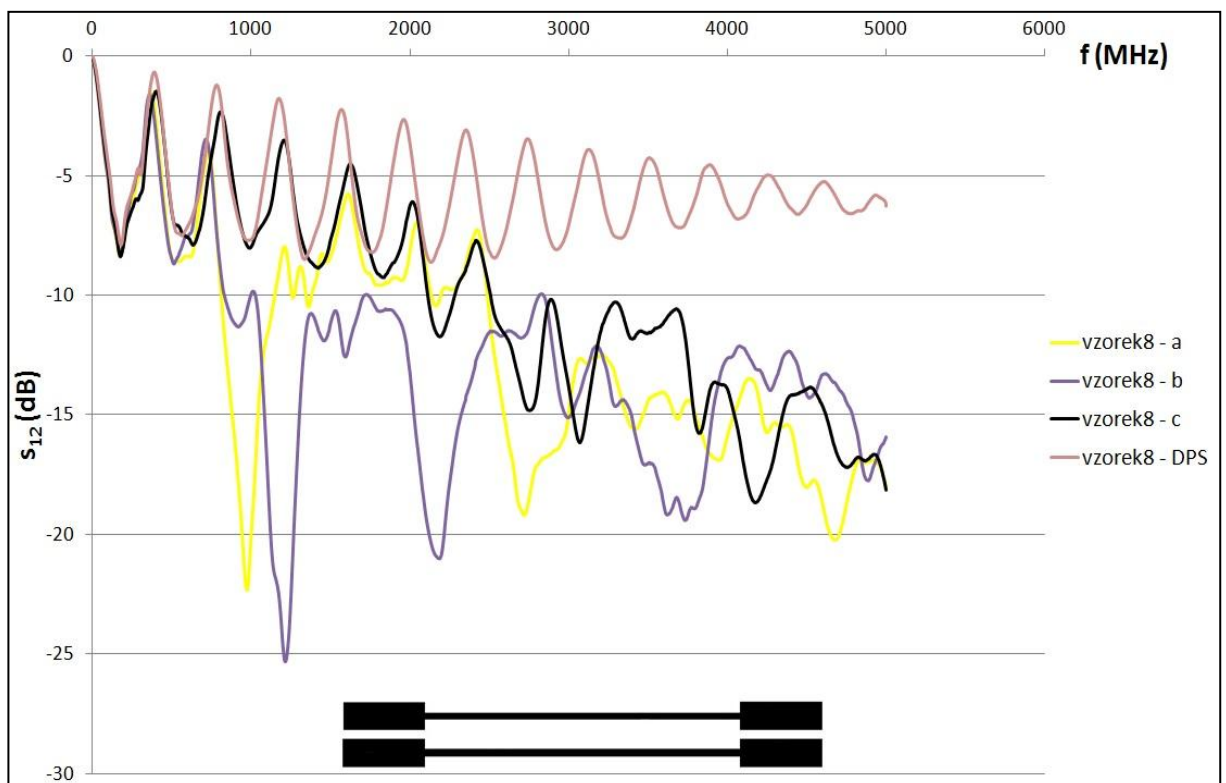
Graf A 11 Parametry s_{11} pro vzorek 7



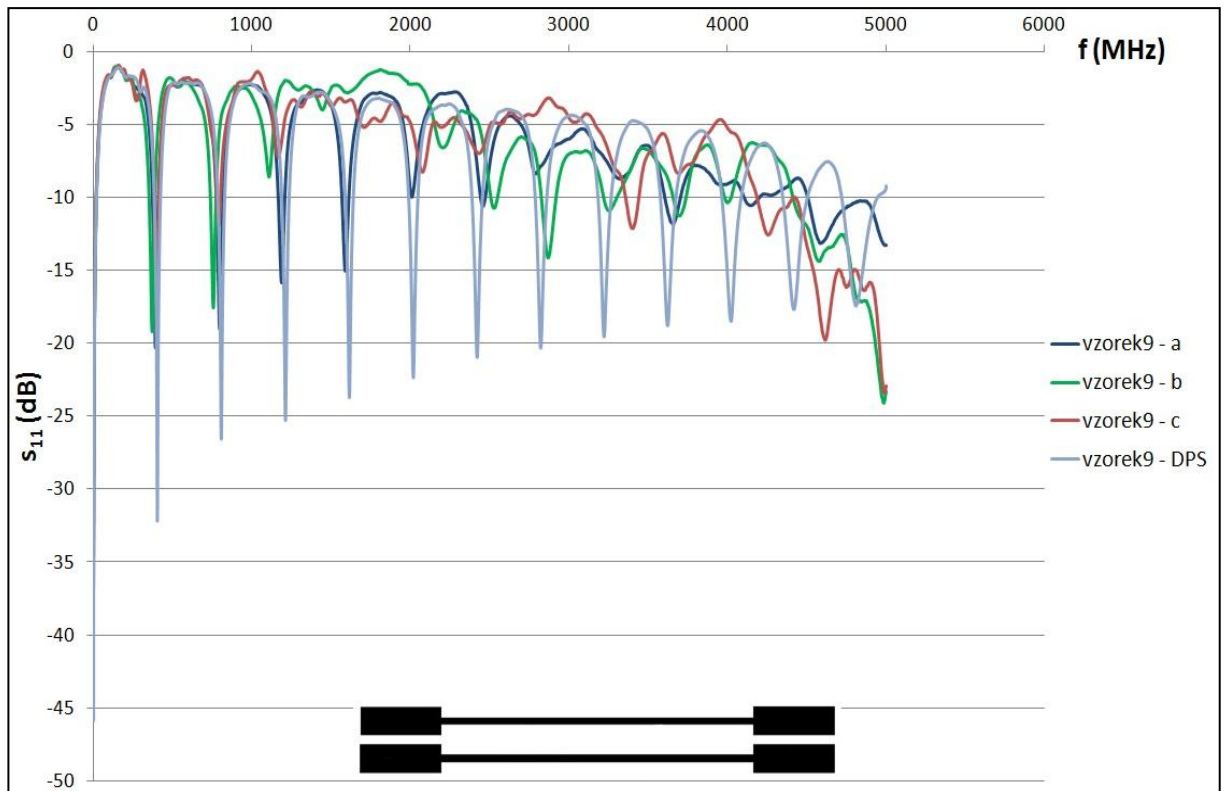
Graf A 12 Parametry s_{12} pro vzorek 7



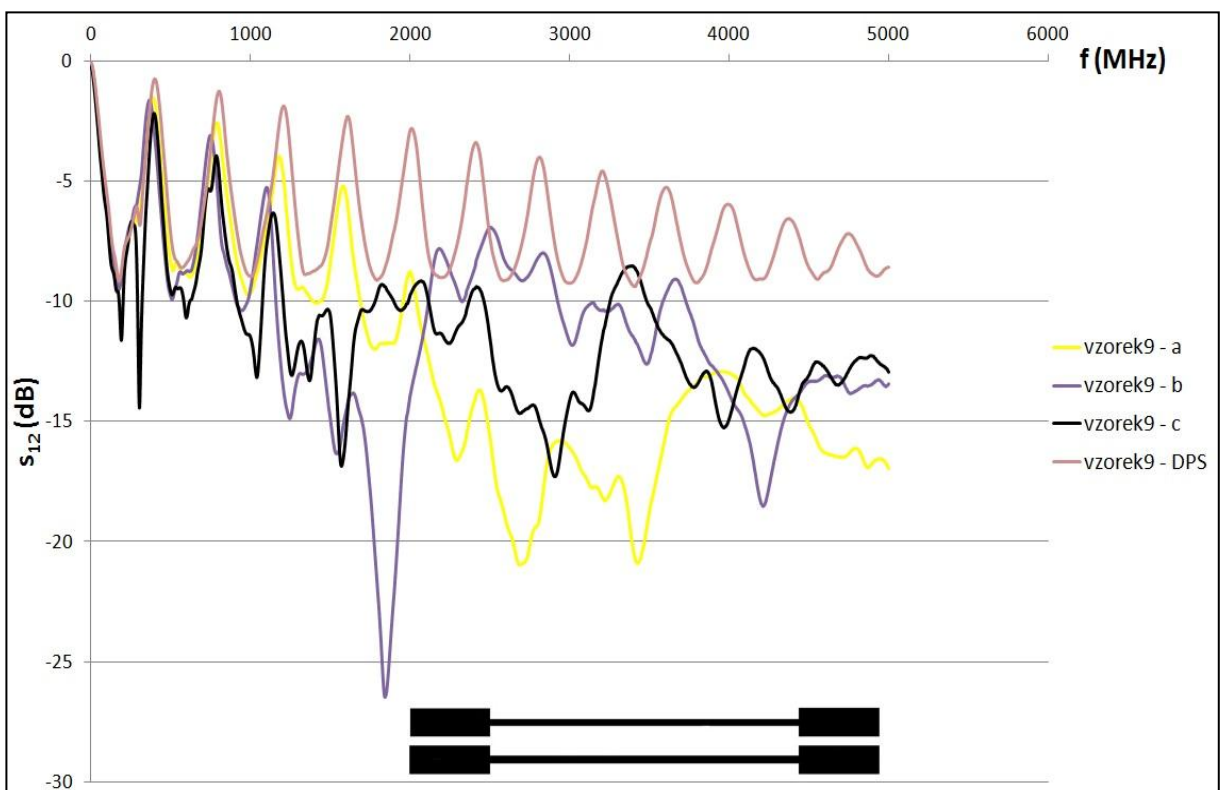
Graf A 13 Parametry s_{11} pro vzorek 8



Graf A 14 Parametry s_{12} pro vzorek 8

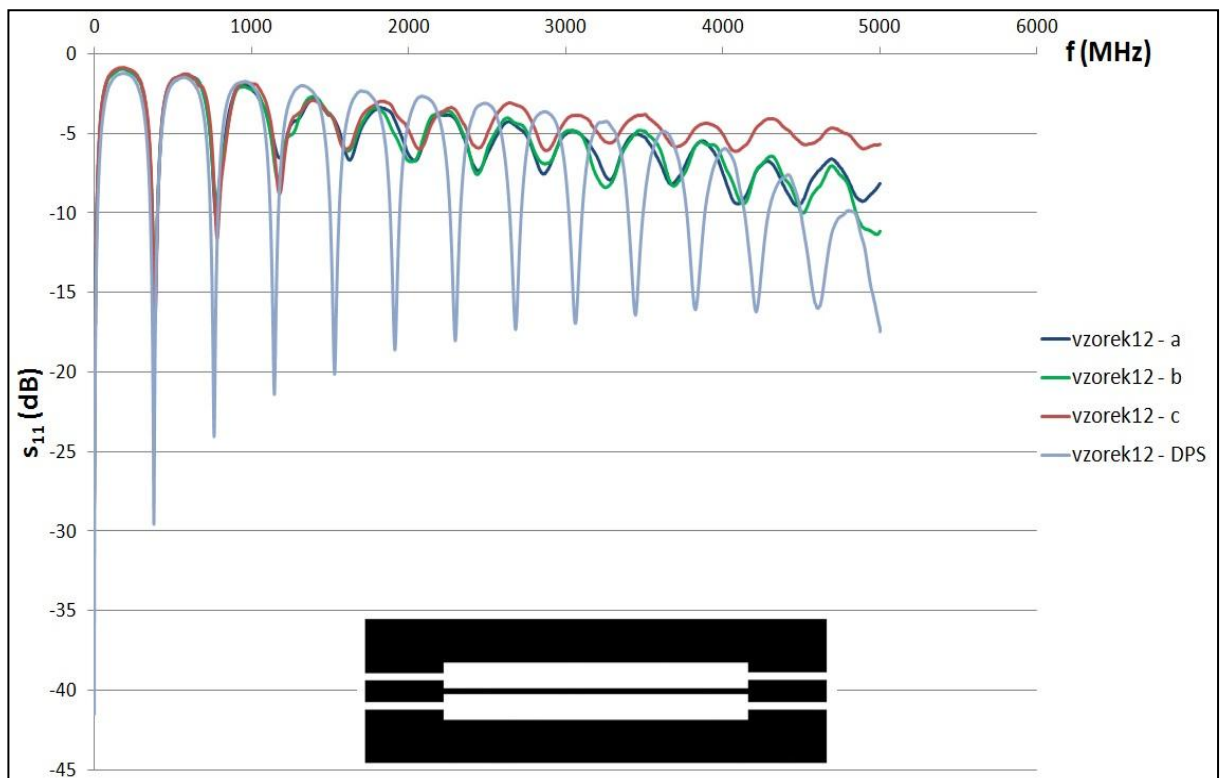


Graf A 15 Parametry s_{11} pro vzorek 9

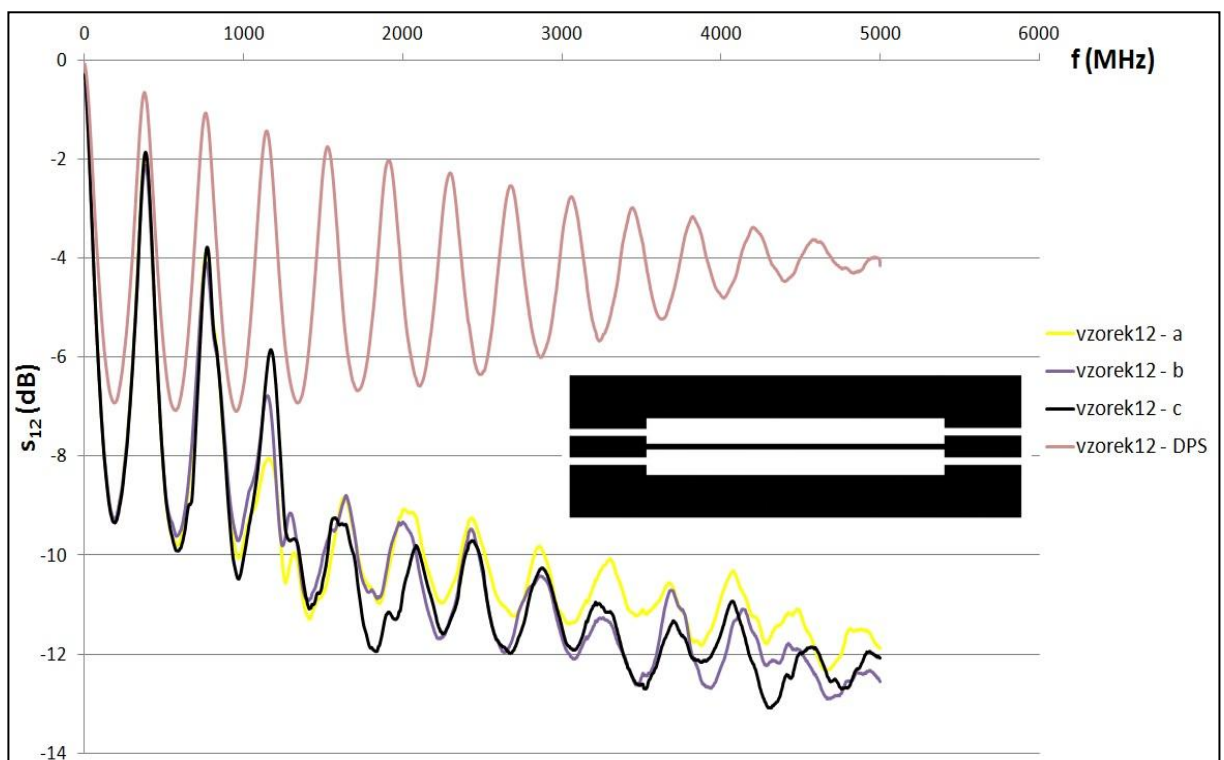


Graf A 16 Parametry s_{12} pro vzorek 9

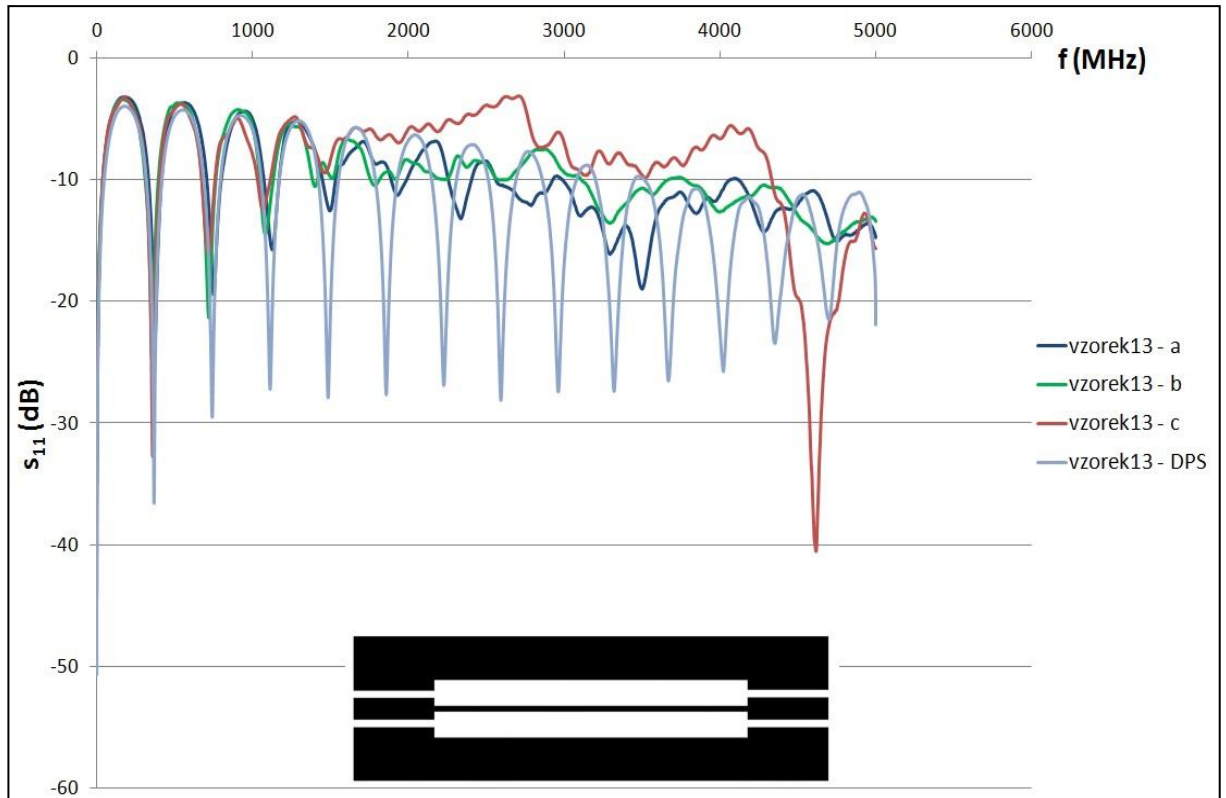
Příloha B – Grafy S-parametrů pro porovnávané koplanární vlnovody



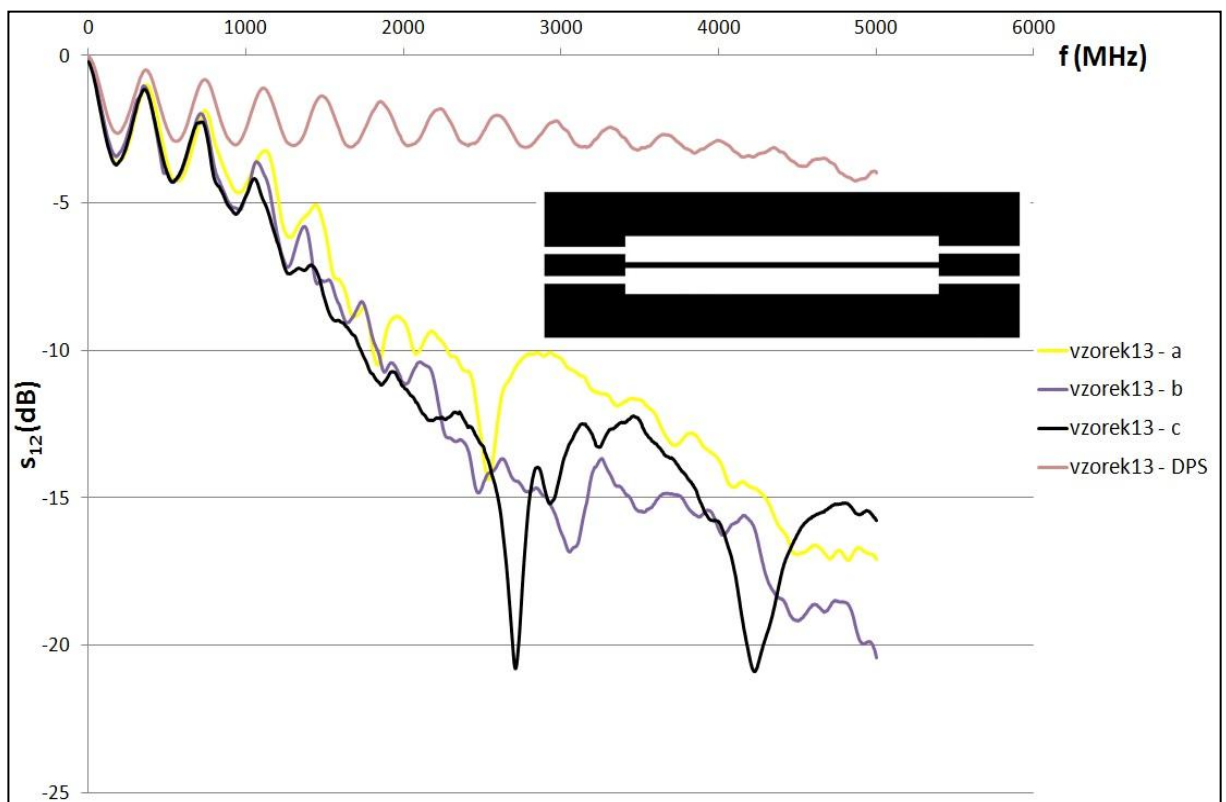
Graf B 1 Parametry s_{11} pro vzorek 12



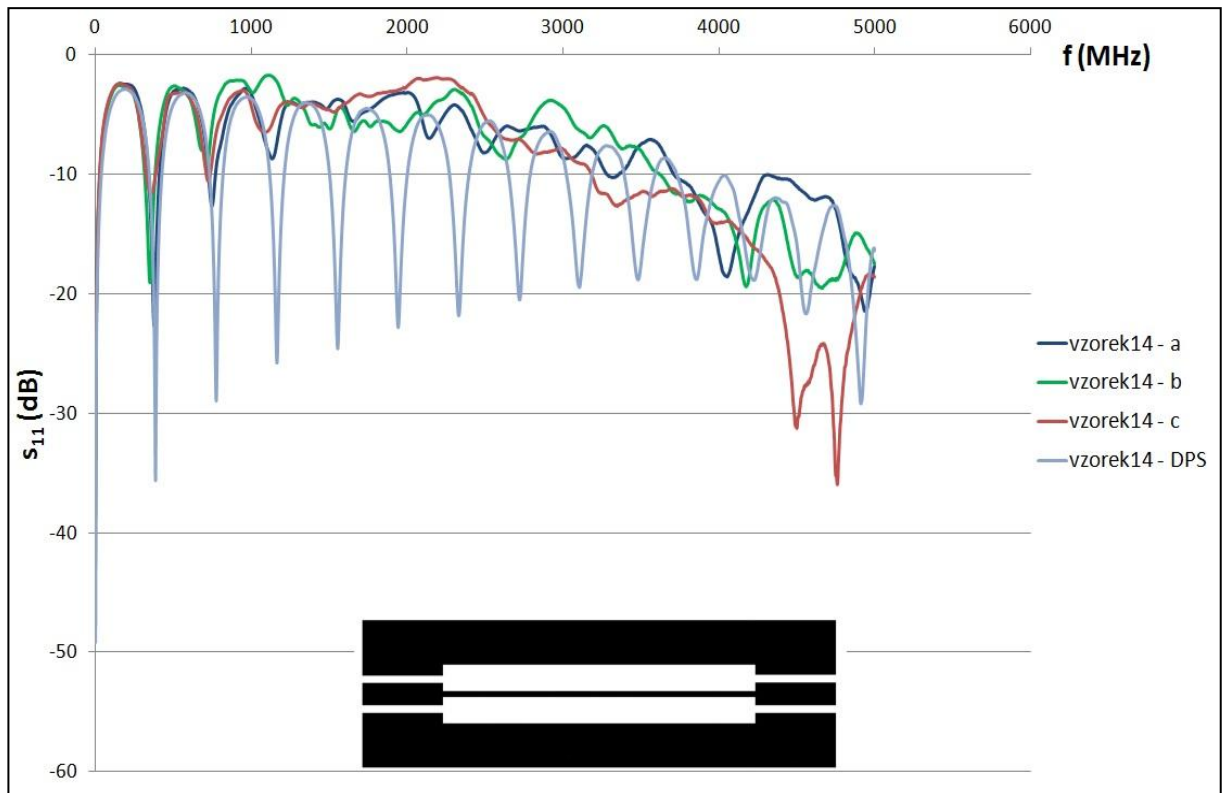
Graf B 2 Parametry s_{12} pro vzorek 12



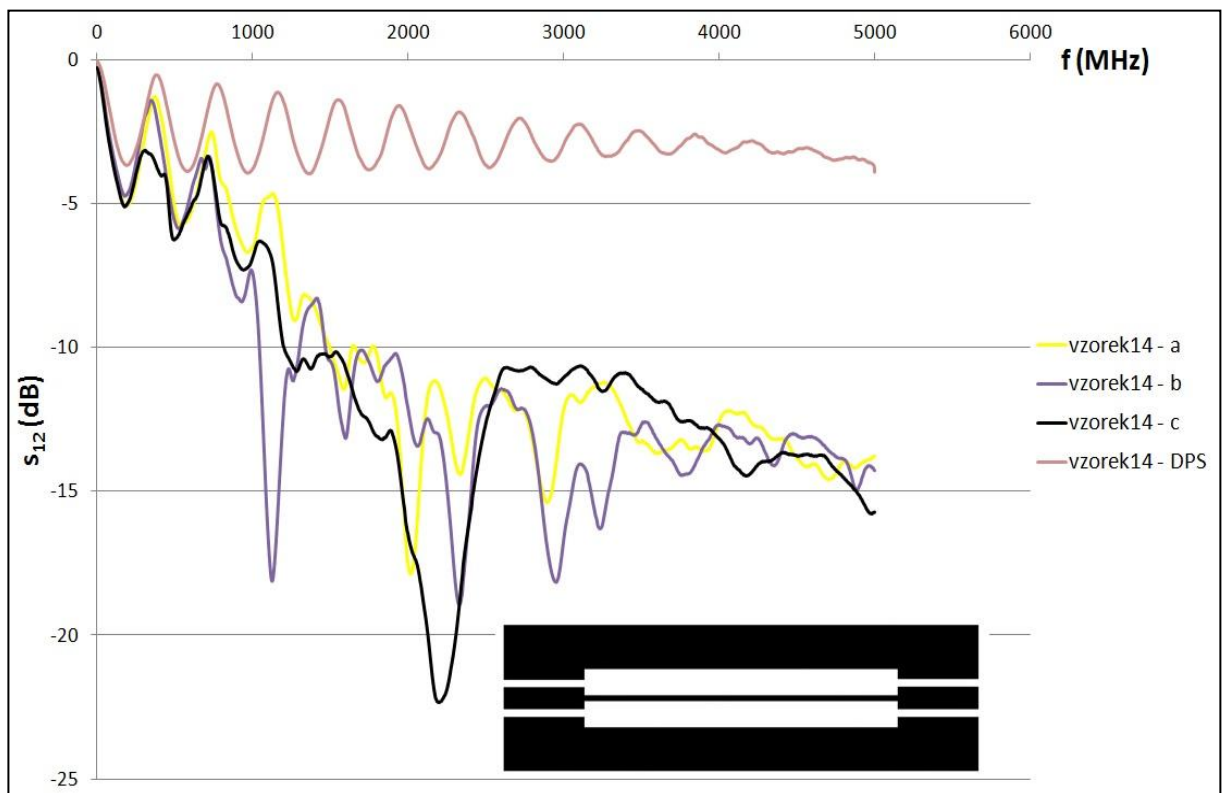
Graf B 3 Parametry s_{11} pro vzorek 13



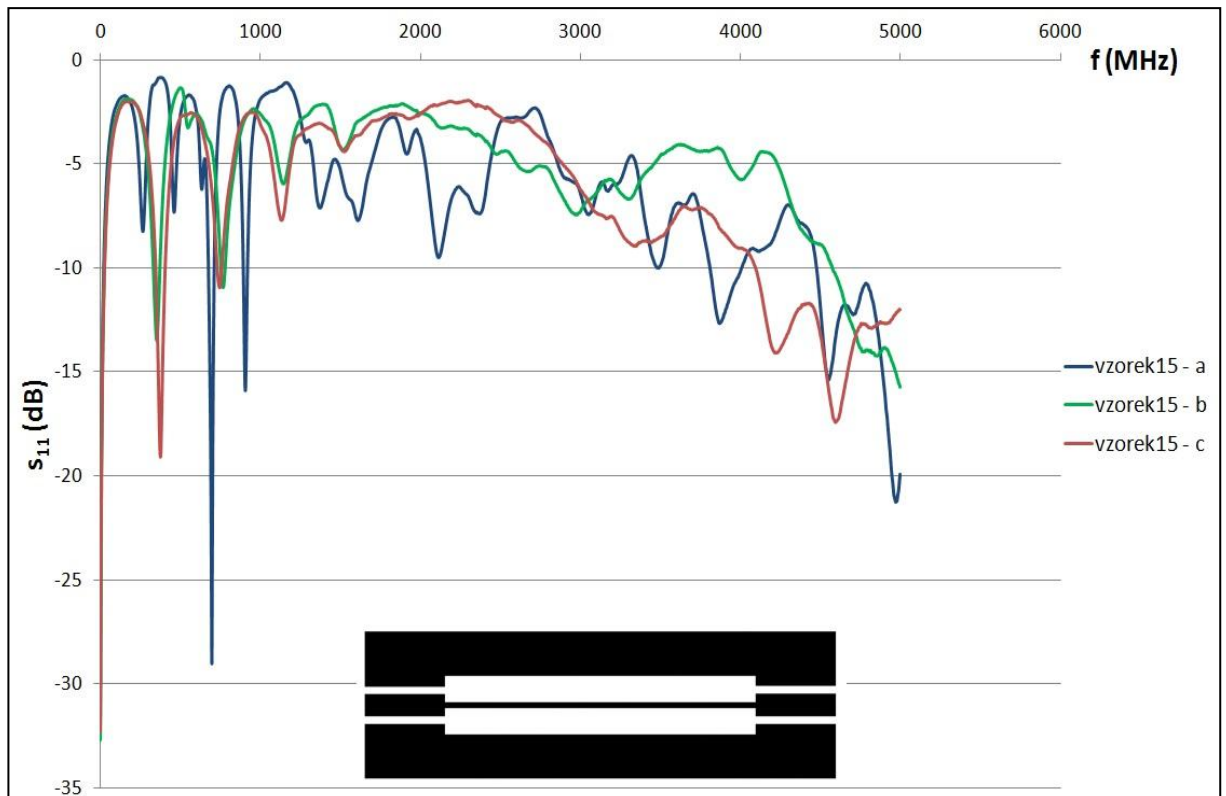
Graf B 4 Parametry s_{12} pro vzorek 13



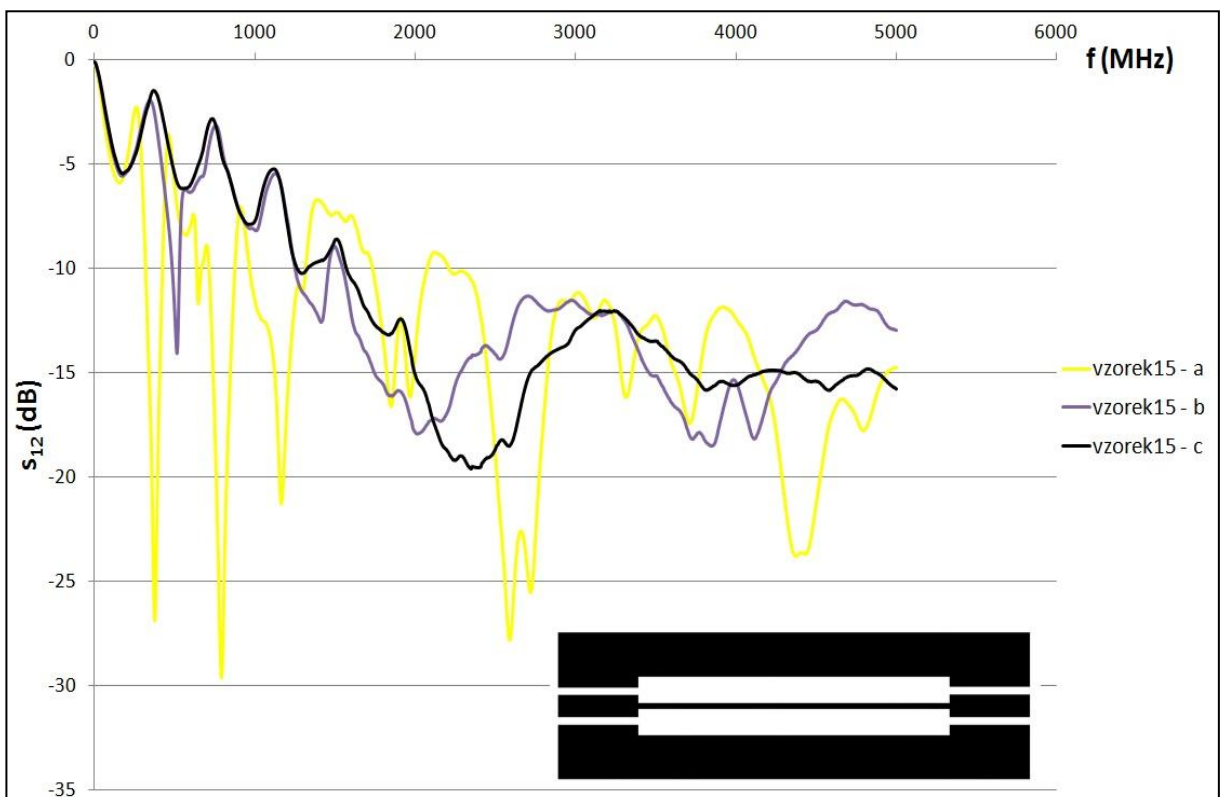
Graf B 5 Parametry s_{11} pro vzorek 14



Graf B 6 Parametry s_{12} pro vzorek 14

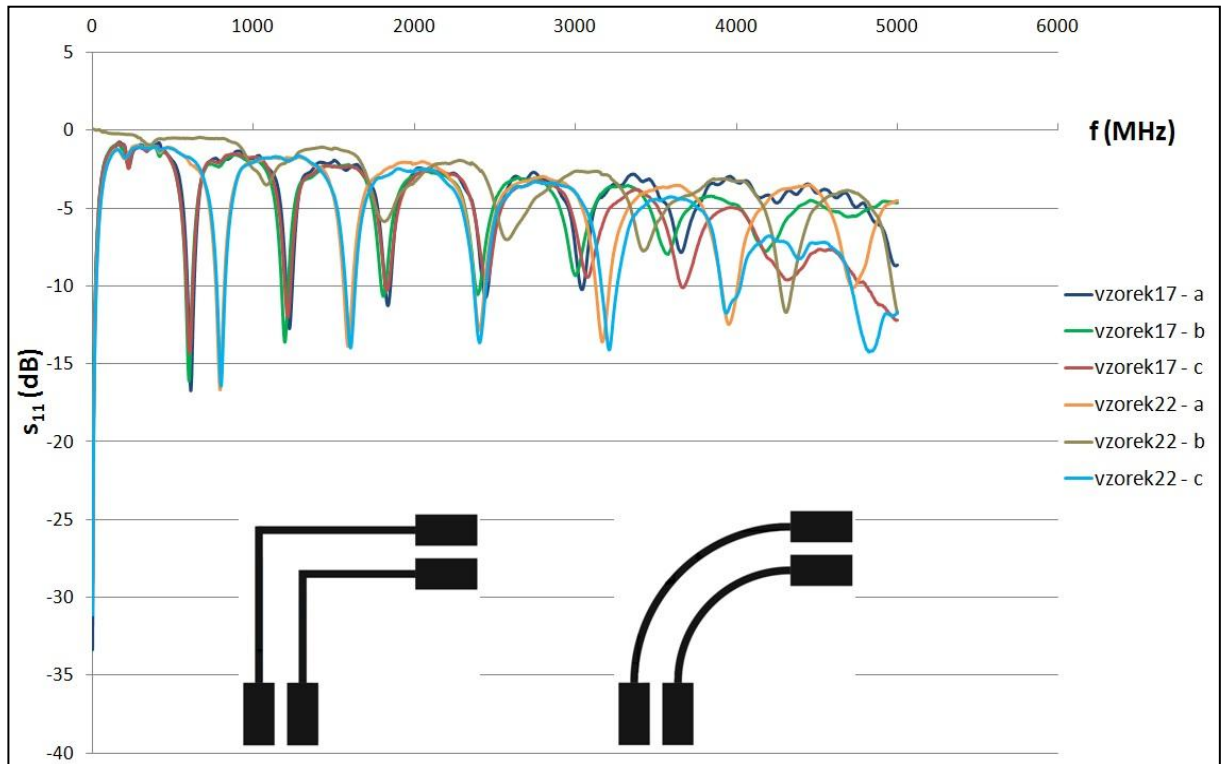


Graf B 7 Parametry s_{11} pro vzorek 15

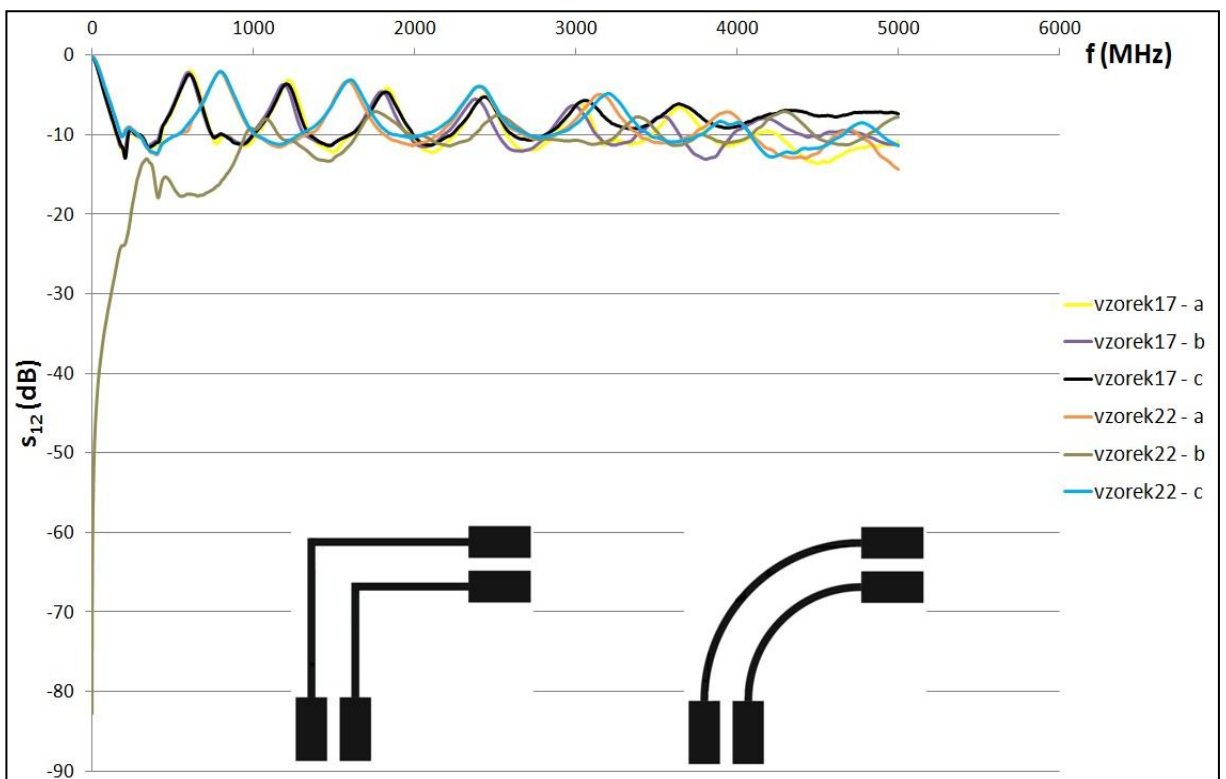


Graf B 8 Parametry s_{12} pro vzorek 15

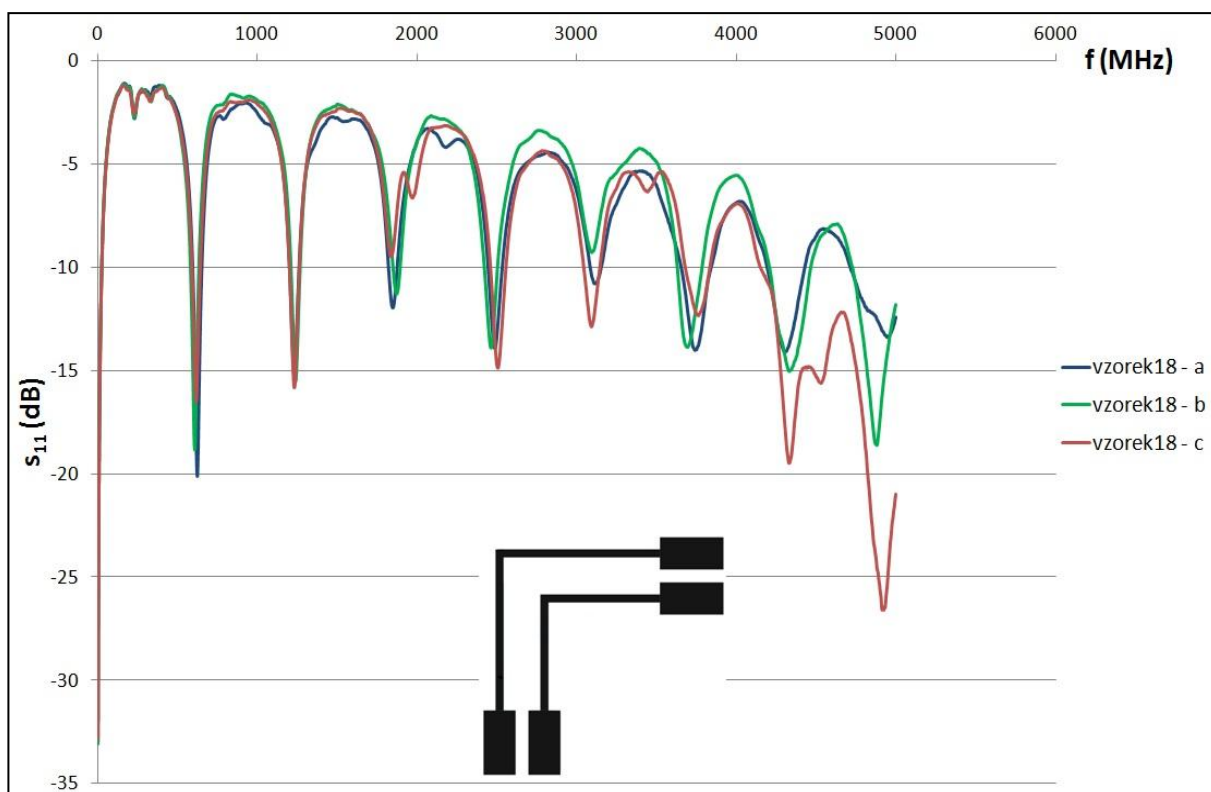
Příloha C – Grafy S-parametrů pro porovnávání koplanární vedení se zahnutými koplanárními vedeními a pro porovnávání zahnutá koplanární vedení mezi sebou



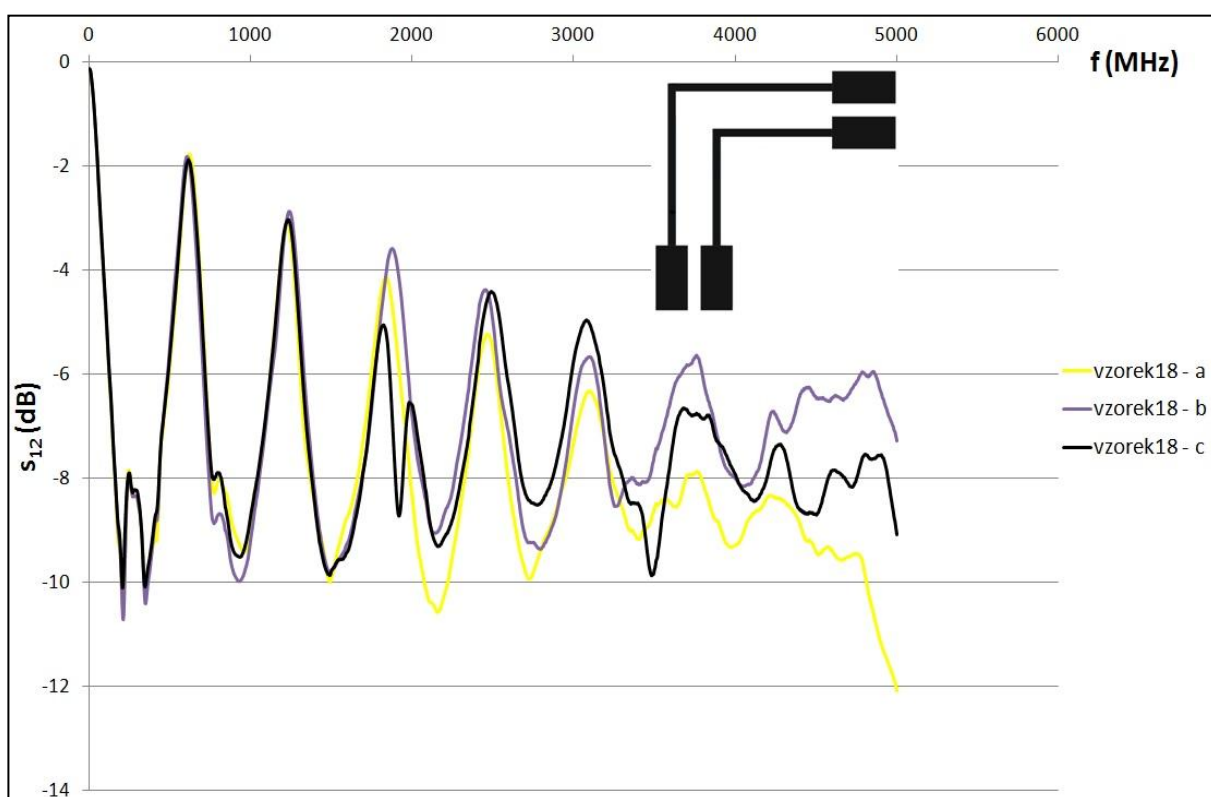
Graf C 1 Parametry s_{11} pro vzorek 17 a 22



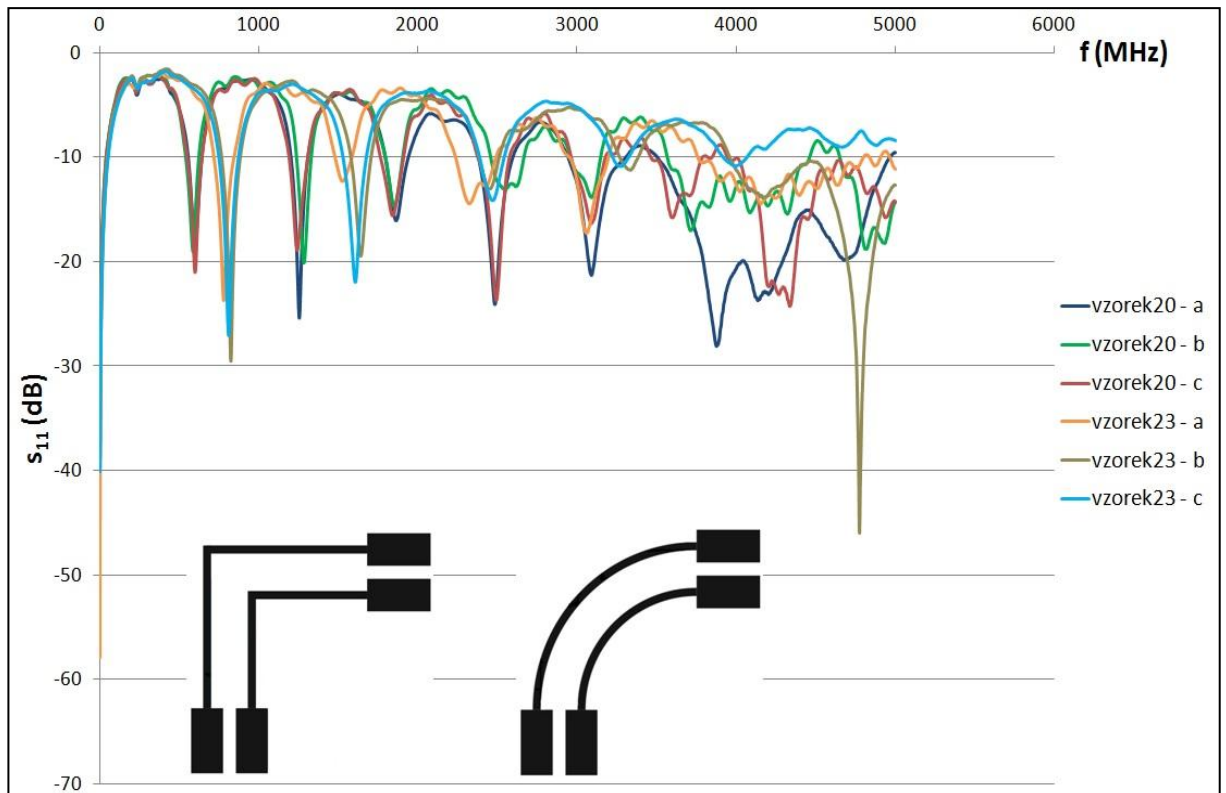
Graf C 2 Parametry s_{12} pro vzorek 17 a 22



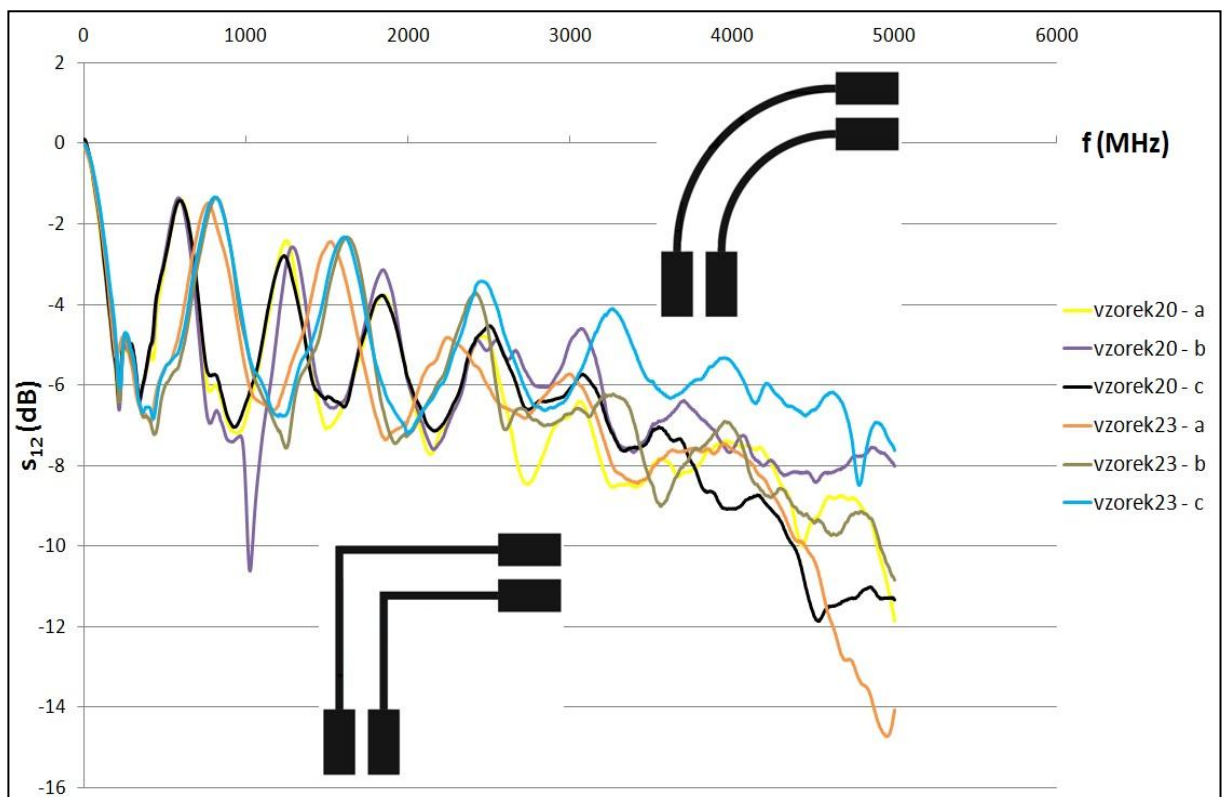
Graf C 3 Parametry s_{11} pro vzorek 18



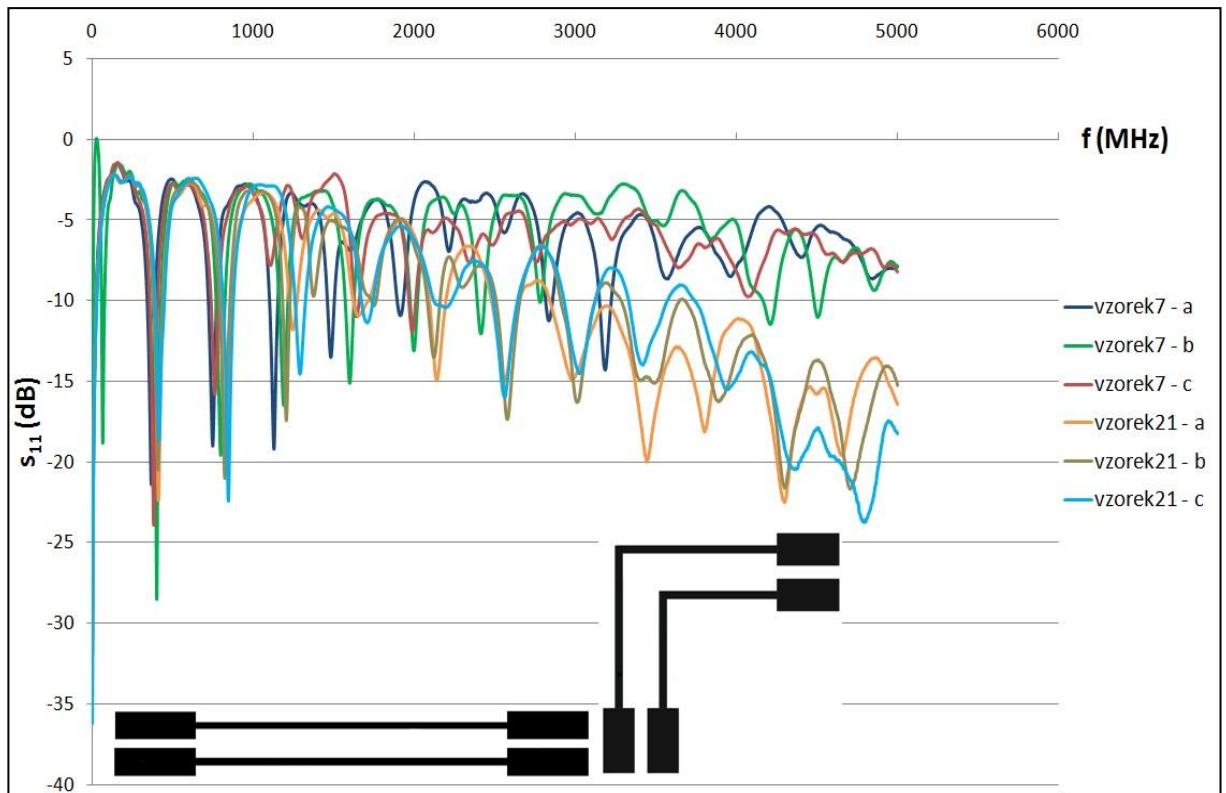
Graf C 4 Parametry s_{12} pro vzorek 18



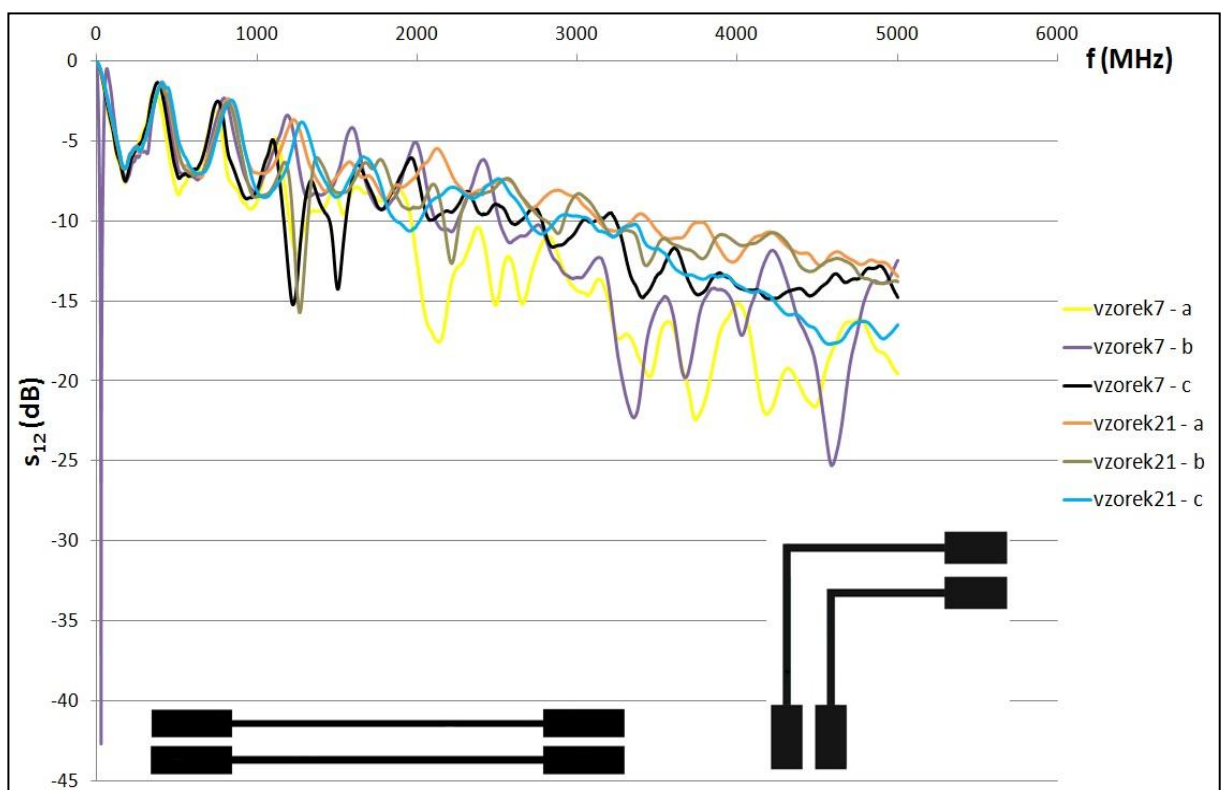
Graf C 5 Parametry s_{11} pro vzorek 20 a 23



Graf C 6 Parametry s_{12} pro vzorek 20 a 23



Graf C 7 Parametry s_{11} pro vzorek 7 a 21



Graf C 8 Parametry s_{12} pro vzorek 7 a 21