

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv prostředí na parametry vysokofrekvenčních
propojovacích struktur**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav HLAVÁČEK**
Osobní číslo: **E14N0008P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vliv prostředí na parametry vysokofrekvenčních 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. Seznamte se s problematikou návrhu vysokofrekvenčních propojovacích struktur na deskách plošných spojů.
2. Navrhněte testovací vzorky propojovacích struktur s ohledem na měření jejich elektrických parametrů.
3. Navrhněte postup a metody testování vlivu prostředí na propojovací struktury.
4. Proměřte elektrické parametry vysokofrekvenčních propojovacích struktur v závislosti na parametrech okolního prostředí.
5. Proveďte vyhodnocení naměřených údajů.

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

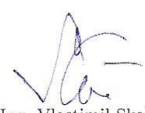
1. Hoffmann K.: Planární mikrovlnné obvody
2. Záhlava V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů
3. Internetové zdroje

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

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

• V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce „Vliv prostředí na parametry vysokofrekvenčních propojovacích struktur“ je zaměřena na řešení vlivu konstantního vlhkého tepla na měřené S – parametry páskových vedení využívaných ve vysokofrekvenční oblasti. Teorie mikrovlnných integrovaných obvodů je popsána v úvodní části této práce. Dále jsou uvedeny výrobní technologie páskových vodivých cest a parametry, které mohou být vlivem prostředí ovlivněny. Poté je práce zaměřena na praktický návrh mikropáskových a koplanárních vedení, mikropáskových filtrů a jejich testování za působení vlhkého konstantního tepla.

Klíčová slova

mikropáskové vedení, koplanární vedení, S – parametry, filtry, Čebyševova dolní propust, okolní prostředí, konstantní vlhké teplo, testování, návrh, analyzátor síťové integrity, mikrovlnná technika

Abstract

This diploma thesis „Influence of ambient conditions on parameters of high frequency interconnection structures“ is focused on solving the influence of the constant moist heat on the measured S – parameters of strip lines used in high frequency range. Theory of microwave integrated circuits is described in the opening of this thesis. Next part of the thesis describes manufacturing technologies of conductive strip lines and the parameters that can be affected the influence of ambient conditions. Finally, the diploma thesis is aimed at design of microstrip and coplanar lines, microstrip filters and their testing under the influence of a constant moist heat.

Key words

microstrip lines, coplanar lines, S – parameters, filters, Chebyshev lowpass, ambient conditions, constant moist heat, testing, network integrity analyser, microwave technology

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 13.5.2016

Bc. Miroslav Hlaváček

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 MIKROVLNNÁ TECHNIKA	12
2 MIKROVLNNÝ INTEGROVANÝ OBVOD	13
2.1 HYBRIDNÍ MIKROVLNNÉ INTEGROVANÉ OBVODY	14
2.2 SUBSTRÁTY	15
2.3 KONEKTORY A VODIČE.....	15
3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	17
3.1 TENKOVRSŤVÁ TECHNOLOGIE.....	17
3.2 TLUSTOVRSŤVÁ TECHNOLOGIE	17
3.3 SUBTRAKTIVNÍ TECHNOLOGIE.....	18
4 RLC PARAMETRY PŘENOSOVÉHO VEDENÍ	19
4.1 ODPOR VEDENÍ.....	19
4.1.1 <i>Skin efekt</i>	19
4.2 KAPACITA VEDENÍ.....	20
4.2.1 <i>Koplanární vedení</i>	20
4.2.2 <i>Vázané mikropáskové vedení</i>	21
4.2.3 <i>Mikropáskové vedení - nesymetrické</i>	22
4.3 INDUKČNOST VEDENÍ	22
4.3.1 <i>Koplanární vedení</i>	22
4.3.2 <i>Vázané mikropáskové vedení</i>	23
4.3.3 <i>Mikropáskové vedení - nesymetrické</i>	23
5 ROZPTYLOVÉ PARAMETRY	25
6 NÁVRH TESTOVANÝCH VZORKŮ	27
6.1 MIKROPÁSKOVÉ VEDENÍ	27
6.2 KOPLANÁRNÍ VEDENÍ	33
6.3 MIKROVLNNÝ FILTR.....	36
7 TESTOVÁNÍ VZORKŮ	41
7.1 POSTUP TESTOVÁNÍ.....	42
7.2 VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ.....	43
7.2.1 <i>Vliv zahnutí mikropáskových vedení</i>	43
7.2.2 <i>Mikropáskové dlouhé vedení</i>	43
7.2.3 <i>Mikropáskové vedení – ostrý úhel zkosení hran</i>	45
7.2.4 <i>Mikropáskové vedení – zaoblené hrany</i>	46
7.2.5 <i>Mikropáskové vedení – větší zaoblení hran</i>	47
7.2.6 <i>Mikropáskové vedení – zkosené hrany</i>	48
7.2.7 <i>Mikropáskové vedení – větší zkosení hran</i>	49
7.2.8 <i>Koplanární vedení – 67 Ω</i>	50
7.2.9 <i>Koplanární vedení – 100 Ω</i>	50
7.2.10 <i>Filtr 2,4 GHz – dolní propust</i>	51
7.2.11 <i>Filtr 5,0 GHz – dolní propust</i>	51
ZÁVĚR	52

SEZNAM LITERATURY	53
PŘÍLOHY	1

Úvod

Hlavním cílem diplomové práce je stanovení vlivu prostředí na parametry vysokofrekvenčních propojovacích struktur. Pod pojmem vysokofrekvenční propojovací struktury se rozumí vodivé cesty na deskách plošných spojů, které jsou využívány v mikrovlnné frekvenční oblasti.

V první části je práce zaměřena na teoretickou podstatu mikrovlnné techniky, používaných výrobních technologií pro vytváření vodivých páskových vedení a na parametry, které mohou být ovlivněny vlivem prostředí. Pokud jsou uvedené parametry ovlivněny příliš, dochází ke značným změnám, jež ovlivňují chování celého prvku. Dále jsou zde popsány rozptylové parametry, díky kterým lze analyzovat chování obvodů, které pracují ve vysokofrekvenční oblasti.

Druhá část je zaměřena na popis jednotlivých vybraných páskových vedení. Popsány jsou nejen teoretické aspekty, ale také matematické výpočty, díky kterým lze stanovit jejich parametry. Za použití těchto výpočtů je následně navrženo několik typů mikropáskových a koplanárních vedení. Dále je zde uvedena teorie pro návrh mikropáskových filtrů. Teoretické poznatky byly poté využity při samotném návrhu šablon vzorků, které byly následně vyrobeny subtraktivní technologií a následně testovány.

Třetí částí této práce je testování navržených vzorků. Samotné testování je založeno na zrychlené zkoušce vlivu prostředí dle normy ČSN EN 60068 – 2 – 78 ed. 2. Uvedená norma je zaměřena na působení konstantního vlhkého tepla. Navržené vzorky byly vystavovány tomuto prostředí pomocí zkušební komory v cyklických časových intervalech zvolených dle výše uvedené normy. Na jednotlivých navržených vzorcích byly poté měřeny pomocí analyzátoru síťové integrity (SPARQ – 3002E) S – parametry, které mohou být díky vlivu prostředí značně ovlivněny. Následné vyhotovení grafů změřené závislosti rozptylových parametrů napomohlo k analýze vlivu prostředí na testované vzorky a celkového zhodnocení.

Seznam symbolů a zkratk

<i>MIO</i>	Mikrovlnný integrovaný obvod
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>SMA</i>	SubMiniature version A
ε_r	Relativní permitivita substrátu [-]
ε_0	Relativní permitivita vakua [-]
$tg\delta$	Činitel dielektrických ztrát [-]
<i>R</i>	Elektrický odpor [Ω]
<i>L</i>	Indukčnost [<i>H</i>]
<i>C</i>	Kapacita [<i>F</i>]
<i>l</i>	délka [<i>mm</i>]
<i>f</i>	frekvence [<i>GHz</i>]
Z_0	Vlnová impedance [Ω]
<i>w</i>	Šířka vodivého pásku [<i>mm</i>]
<i>h</i>	Výška substrátu [<i>mm</i>]
<i>a</i>	Šířka mezery [<i>mm</i>]

1 Mikrovlnná technika

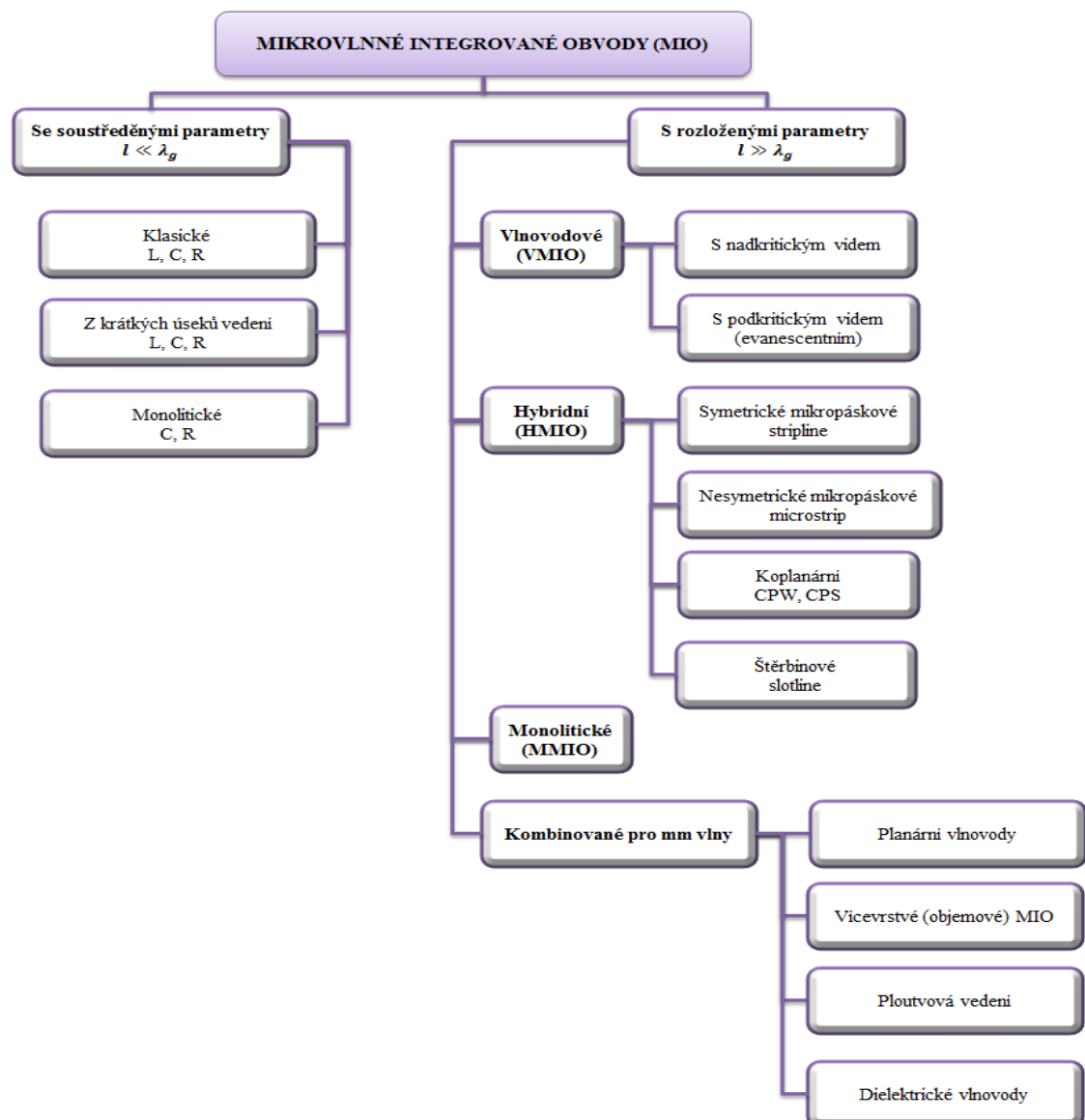
Během 2. světové války docházelo k rozvoji radiolokace a tím také k rozvoji klasické vlnododové a koaxiální techniky. Ta měla jednu velkou nevýhodu, kterou bylo omezené kmitočtové pásmo. Mezi další nevýhody patřily také velké rozměry, nekompatibilita s miniaturními aktivními prvky a cena. To vše vedlo k menší technické revoluci v této oblasti. Počátkem 50. let došlo k přechodu od koaxiální struktury k symetrickému páskovému vedení se vzduchovým dielektrikem. Další vývoj nastal počátkem 60. let, kdy se začaly používat nízkoztrátové dielektrické materiály s vysokou permitivitou. V této době začaly vznikat mikrovlnné integrované obvody (MIO). Nejen, že docházelo k vývoji nových materiálů, ale také se rozvíjely nové výrobní technologie, které umožňovaly vyšší stupně mikrovlnné integrace. Mikrovlnná technika obvykle pracuje ve frekvenčním pásmu, které je od 300 MHz do 3 THz a vlnová délka se pohybuje v rozmezí od 1 m do 0,1 mm. Celé rozdělení frekvenčního pásma je uvedeno v tabulce (Tab. 1.1), které je doporučeno IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Řádky, které jsou podbarveny, označují mikrovlnné frekvenční spektrum. [1]

Tab. 1.1 Značení kmitočtových pásem dle IEEE [2]

Pásmo	Označení frekvenčního pásma	Frekvence	Vlnová délka
2	ELF (Extreme Low Frequency)	30 - 300 Hz	10 - 1 Mm
3	VF (Voice Frequency)	300 - 3000 Hz	1 - 0,1 Mm
4	VLF (Very Low Frequency)	3 - 30 kHz	100 - 10 km
5	LF (Low Frequency)	30 - 300 kHz	10 - 1 km
6	MF (Medium Frequency)	300 - 3000 kHz	1 - 0,1 km
7	HF (High Frequency)	3 - 30 MHz	100 - 10 Mm
8	VHF (Very High Frequency)	30 - 300 MHz	10 - 1 Mm
9	UHF (Ultra High Frequency)	300 - 3000 MHz	100 - 10 cm
10	SHF (Super High Frequency)	3 - 30 GHz	10 - 1 cm
11	EHF (Extreme High Frequency)	30 - 300 GHz	1 - 0,1 cm
12	Decimilimeter	300 - 3000 GHz	1 - 0,1 mm

2 Mikrovlnný integrovaný obvod

Mikrovlnné integrované obvody jsou obvody, jak již samotný název napovídá, které pracují v mikrovlnné frekvenční oblasti. Se snahou o vyšší stupeň integrace se stávají mikrovlnné integrované obvody složitější a tím je i složitější jejich samotný návrh. Obvod přinesl spousty výhod, ale také i nevýhod. Mezi hlavní výhody patří malé rozměry, které jsou v dnešní době při vyšším stupni integrace velice příznivé, tak i malá hmotnost s větší šířkou pásma. Na druhou stranu, mezi hlavní nevýhody patří již zmíněný složitější návrh celého obvodu, ale také horší odvod tepla a větší měrný útlum. Rozdělení mikrovlnných integrovaných obvodů je znázorněno níže (Obr. 2.1). [1]

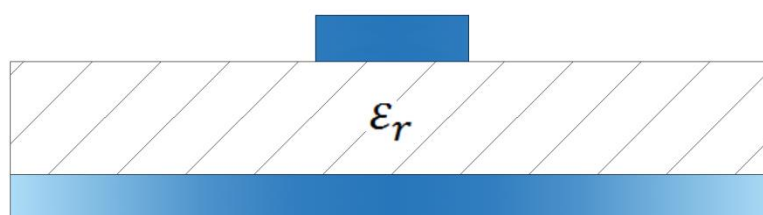


Obr. 2.1 Základní členění MIO

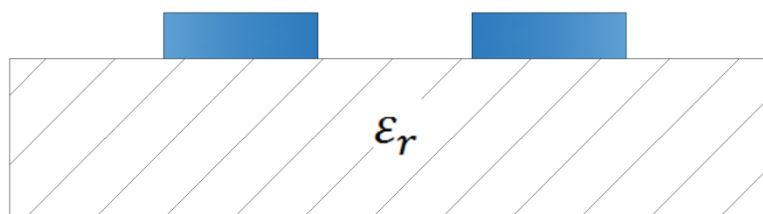
Základním dělícím znakem je, zdali je obvod s rozloženými parametry nebo se soustředěnými parametry. Obvody se soustředěnými parametry by měly mít své rozměry nejméně o dva řády menší, než je délka vlny, která těmito obvody bude procházet. To znamená, že hodnota signálu v celém obvodu je ve stejném čase shodná. Při řešení takových obvodů jsou základními parametry napětí a proud. Naopak obvody s rozloženými parametry mají délku procházející vlny srovnatelnou s délkou obvodu, jedná se o obvody, které pracují v pásmu velmi vysokých frekvencí. [3]

2.1 Hybridní mikrovlnné integrované obvody

Hybridní mikrovlnné integrované obvody jsou vytvářeny nanesením vodivých pásků na pevný dielektrický substrát. Tvar a cesta pásků je dána vodivým motivem. Osazování součástek zde probíhá vsazováním, kdy polovodičové součástky tvoří diskrétní prvky, tzv. čipy. Vše je přichyceno pomocí pájení nebo ultrazvukového sváření. Provedení páskových vedení používané pro hybridní mikrovlnné obvody, které budou dále v této diplomové práci popsány, navrženy a testovány jsou znázorněny pomocí nákrešů pod tímto odstavcem (*Obr. 2.2 a Obr. 2.3*). Jelikož existují i jiná provedení, která ale nebudou dále v diplomové práci více zkoumána, jsou pro ukázkou v příloze (*Příloha A*) uvedeny nejběžněji se vyskytující typy páskových vedení. [1, 2]



Obr. 2.2 Otevřené nesymetrické mikropáskové vedení **microstrip**



Obr. 2.3 Koplanární vedení **coplanar strips (CPS)** - symetrické

2.2 Substráty

Nejčastěji používané dielektrické substráty jsou vyráběny na bázi korundu nebo teflonu, tím je zajištěna vysoká relativní permitivita ϵ_r . Jelikož obvod pracuje v určitém kmitočtovém pásmu a za určitých teplotních podmínek, je nutné, aby hodnota této permitivity byla konstantní i za předem určených pracovních podmínek. Neméně důležitým parametrem substrátu je činitel dielektrických ztrát $\text{tg } \delta$, který by měl nabývat co nejmenších hodnot. U tohoto činitele jde zejména o jeho teplotní stálost, která je závislá na frekvenci. Dále je také kladen nárok na vysokou tepelnou vodivost a dobré fyzikální a chemické vlastnosti, jako je pružnost, opracovatelnost, křehkost a pevnost. Vlastnosti, které bude mít zvolený dielektrický substrát, budou významně působit na výkonové a útlumové parametry hybridních mikrovlnných obvodů. V následující tabulce (*Tab. 2.1*) je uveden seznam nejčastěji se vyskytujících používaných materiálů pro dielektrický substrát. [1, 2]

Tab. 2.1 Tabulka vybraných substrátů [4]

Materiál	ϵ_r	$\text{tg } \delta$	Teplotní roztažnost	Teplotní vodivost	E_{\max}
	10 GHz	10 GHz	$[10^{-7}/^{\circ}\text{C}]$	$[\text{W}/\text{cm}/^{\circ}\text{C}]$	$[\text{kV}/\text{cm}]$
Safír (monokrystal Al_2O_3)	11,7	0,0001	80	0,25	$4 \cdot 10^3$
Korund, Al_2O_3 , 99,5%	9,7	0,0002	67	0,29	$4 \cdot 10^3$
Beryliová keramika, BeO 99,5%	6,6	0,0001	60	1,68	100
Si, $\rho=10^7 \Omega \text{ cm}$	11,7	0,0050	30 - 40	0,84	300
Teflon	2,1	0,0018	900	0,0025	500
Tavený křemen, SiO_2	3,8	0,0001			$10 \cdot 10^3$
Cuprextit	4,2	0,0100			

Z výše uvedené tabulky nelze zcela jasně říci, který materiál je tím nejlepším pro dielektrický substrát. Vždy záleží, v jakých podmínkách bude daný obvod pracovat a dle těchto podmínek je potřeba vybrat kompromis mezi těmito materiály.

2.3 Konektory a vodiče

Při výběru materiálu, který bude použit na vodivé cesty, je potřebné znát některé jeho důležité vlastnosti. V tabulce (*Tab. 2.2*) je uvedeno několik materiálů, které se nejčastěji používají pro vodivé cesty, včetně hodnot některých vybraných vlastností. [4]

Tab. 2.2 Vodiče pro MIO [4]

Materiál	Ag	Cu	Au	Al	Ni	Cr	Ta
Měrná vodivost $\sigma \cdot 10^{-7}$ [S/m]	6,17	5,8	4,1	3,7	1,14	0,77	0,64
Hloubka vniku / 10 GHz δ [μ m]	0,641	0,661	0,786	0,825	1,491	1,814	1,989
Povrch. odpor / 10 GHz [m Ω /■]	25,3	26,1	31	32,6	58,9	71,6	78,5

Konektory, které se využívají pro mikrovlnné obvody, mají hodnotu impedance obvykle 50 Ω . Přehled různých používaných konektorů je uveden v následující tabulce (Tab. 2.3) a pro praktickou ukázkou je pod samotnou tabulkou umístěn obrázek, na kterém je vyobrazen konektor, jak se s ním můžeme setkat v praxi. (Obr. 2.4). [4]

Tab. 2.3 Konektory pro MIO [4]

Typ konektoru	Rozměry vnější / vnitřní [mm]	Frekvence [GHz]	Poznámky
N (NAVY)	7 / X	18	Dielektrikum: vzduch
APC 7	7 / 3,04	18	Dielektrikum: vzduch
SMA	4,05 / 1,35	26	Dielektrikum: teflon
Typy konektorů dle rozměrů a použité frekvence		Frekvence [GHz]	
3,5 mm konektory		36	
2,92 mm konektory		40	
2,4 mm konektory		50	
1,85 mm konektory		65	



Obr. 2.4 SMA Konektor pro DPS [5]

3 Výrobní technologie

Pro výrobu mikrovlnných obvodů je využito různých výrobních technologií. Každá z uvedených technologií má své výhody a nevýhody a pro správný výběr je důležité znát výrobní vlastnosti dané technologie.

3.1 Tenkovrstvá technologie

Tato technologie se vyznačuje vysokou přesností a nízkým útlumem obvodu. Na druhé straně je potřebné cenově nákladné technologické vybavení a pracuje se s jedovatými chemikáliemi. [4]

Zde je uveden postup výroby dle [4]:

- Samotná fotomatrix je vyhotovena jako zvětšená předloha s následným fotografickým zmenšením na film či skleněnou desku nebo je použito přímé zhotovení v měřítku 1 : 1 pomocí generátorů obrazců.
- Kontrola povrchu substrátu a jeho čištění.
- Vakuové napaření tenké (10 – 30 nm) vrstvy adhezního kovu (Cr, Ta, Ti, Mb, Va) na keramický substrát. Vznikne chemická vazba, kov je oxidován ohřátým substrátem.
- Napaření tenké vrstvy vysoce vodivého kovu (Cu, Ag, Au, Al).
- Fotolitografické zamaskování substrátu v místech, kde není požadována vodivá plocha. (Nanesení fotorezistu, expozice přes masku, vyvolání.)
- Galvanické zesílení odkrytých ploch na 3 až 5-ti násobek hloubky vniku (3 – 10 μm).
- Odstranění fotorezistu a odleptání pouze tenké napařené vrstvy.

3.2 Tlustovrstvá technologie

Tato metoda výroby je příznivá svou jednoduchostí a není potřeba drahého technologického vybavení. Avšak nepříznivě se vyznačuje větším útlumem obvodu při vyšších kmitočtech a zvýšenou drsností povrchu vodičů. S touto metodou také nelze docílit ostrého ohraničení okrajů. [4]

Postup výrobního procesu dle [4]:

- Využití sítotisku.
- Vytvoření potřebného motivu na sítu pomocí masky a fotorezistu.
- Pomocí sítotiskové techniky se na keramický substrát nanese do požadovaných míst vodivá pasta. (Au, Ag, Pa-Au, Ag-Pd, Pt-Au, Ag-Pd v práškové podobě smíchané se skleněným práškem a pojivem.)
- Vpalování pasty za vysoké teploty do substrátu (až 800 °C).

3.3 Subtraktivní technologie

Jedná se o metodu, při které se používají levné měkké substráty, a používá se velmi cenově příznivé technologické vybavení. Nedostatkem této technologie je přesnost pohybující se max. $\pm 0,05$ mm. Další nevýhodou je podleptávání okrajů a odleptávání ostrých rohů. [4]

Postup výroby dle [4]:

- Používají se většinou měkké substráty oboustranně plátované Al nebo Cu vrstvou.
- Fotomatrix je vyhotovena pomocí zvětšené předlohy s následným fotografickým zmenšením na film či skleněnou desku.
- Přímé zhotovení v měřítku 1 : 1 pomocí fotoplotru.
- Nanesení fotorezistu na substrát a jeho sušení.
- Expozice přes masku ultrafialovým světlem.
- Vyvolání (v roztoku NaOH).
- Zakrytí opačné strany substrátu.
- Odleptání nežádoucích vodivých ploch (chlorid železitý).

4 RLC parametry přenosového vedení

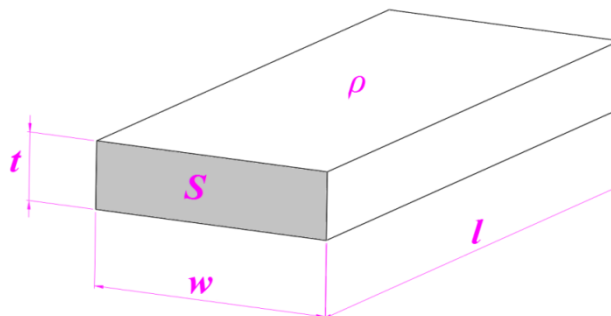
Zde jsou popsány vybrané důležité parametry pro plošné spoje. Vybranými parametry, jak již samotný název kapitoly napovídá, jsou odpor, kapacita a indukčnost. Důvodem nastínění RLC parametrů je fakt, že jsou klimaticky závislé, tedy klimatické prostředí může parametry ovlivnit a tím dochází ke změnám parametrů elektronického zařízení. V diplomové práci nejsou zmíněné parametry měřeny, nicméně znalost této problematiky má dopad při pohledu na následné testování navržených vzorků. [9]

4.1 Odpor vedení

Základní vztah pro odpor vodiče je dle [9] dán následovně:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot w}, \quad [\Omega] \quad (4.1.1)$$

kde ρ je zde měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$], l zastupuje samotnou délku vodiče [m] a S jeho průřez [m^2]. Symboly t a w jsou rozměry vedení, které odpovídají kótování dle obrázku vodiče (Obr. 4.1).



Obr. 4.4.1 Páskové vedení

4.1.1 Skin efekt

Při vysokých kmitočtech, které jsou v mikrovlnných obvodech používány, dochází k tzv. skin efektu. Skin efekt znamená, že proudová hustota blíže ke středu vodiče klesá. Je tedy nutné definovat hloubku vniku δ , která definuje vzdálenost od povrchu vodiče, kdy proudová hustota klesne k hodnotě $1/e \approx 37\%$. [9]

Vztah pro hloubku vniku je definován takto [9]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}}, \quad [\text{m}] \quad (4.1.2)$$

kdy μ_0 je permeabilita vakua, μ_r relativní permeabilita, ρ měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot \text{m}$] a f je zde frekvence. Odpor páskového vodiče lze díky tomuto vztahu (4.1.2) a za předpokladu $2 \cdot \delta \leq t$ zapsat následovně [9]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{\delta \cdot 2 \cdot (w + t)}, \quad [\Omega] \quad (4.1.3)$$

4.2 Kapacita vedení

Základní vztah, ze kterého dále výpočty vycházejí je pro kapacitu mezi dvěma deskovými elektrodami dán následovně [9]:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{h}, \quad [\text{F}] \quad (4.2.1)$$

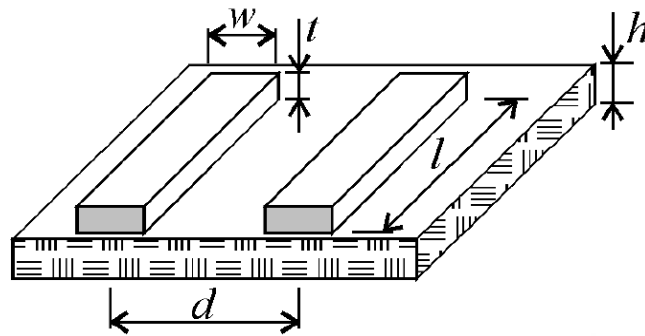
kde ε_r je relativní permitivita substrátu, ε_0 permitivita vakua, S plocha desek [m^2] a h je jejich vzdálenost.

4.2.1 Koplanární vedení

V důsledku toho, že jsou vodiče umístěny na rozhraní dvou různých prostředí s různou hodnotou permitivity ε_r a ε_0 je v následujícím vztahu počítáno s efektivní permitivitou ε_{ef} . Vztah je dán takto [9]:

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ef}}{\ln\left(\frac{\pi \cdot (d - w)}{w + t} + 1\right)}, \quad [\text{F/m}] \quad (4.2.2)$$

Na obrázku (Obr. 4.2) je vyobrazeno koplanární vedení s okótováním, které umožní správné dosazení do rovnice (4.2.2).



Obr. 4.2 Koplanární vedení [9]

4.2.2 Vázané mikropáskové vedení

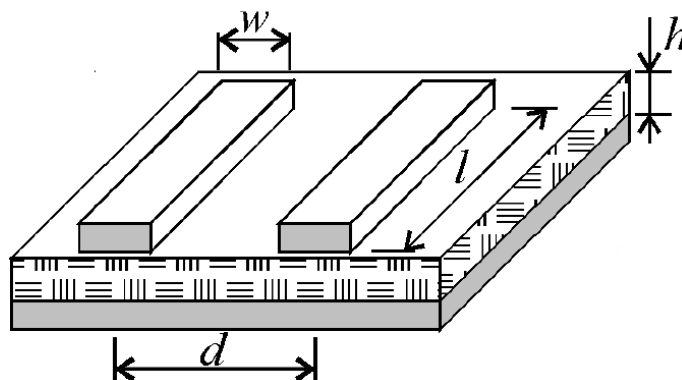
Výpočet vzájemné kapacity vázaného mikropáskového vedení (Obr. 4.3) je dán vztahem [9]:

$$\frac{C_m}{l} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{4 \cdot \pi} \cdot K_{C2} \cdot K_{L2} \left(\frac{w}{h}\right)^2 \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{d}\right)^2 \right]. \quad [\text{F/m}] \quad (4.2.3)$$

Koeficienty K_{C2} a K_{L2} jsou zde zavedeny, aby byla zohledněna nehomogenita elektrického pole na hranách plošného spoje. Definovány jsou následovně [9]:

$$K_{C2} \approx 1 + \frac{h}{w}, \quad (4.2.4)$$

$$K_{L2} \approx 1 + 1,5 \cdot \frac{h}{w}. \quad (4.2.5)$$



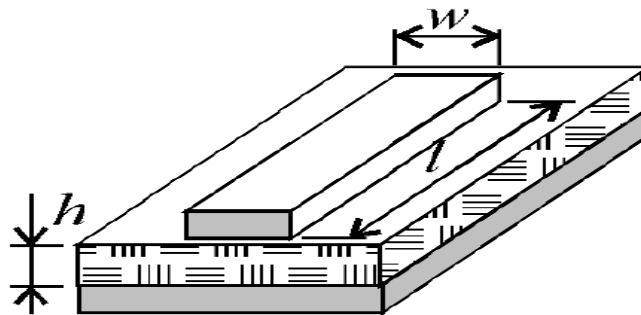
Obr. 4.3 Vázané mikropáskové vedení [9]

4.2.3 Mikropáskové vedení - nesymetrické

Samotná kapacita mikropáskového vedení (*Obr. 4.4*) je odvozena ze základní rovnice (4.2.1), pouze je zde opět zaveden koeficient K_{C2} pro zohlednění nehomogenity elektrického pole. Výpočet kapacity je možný díky tomuto vztahu [9]:

$$\frac{C}{l} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot K_{C2} \cdot \frac{w}{h}, \quad [\text{F/m}] \quad (4.2.6)$$

$$K_{C2} \approx 1 + \frac{h}{w} \text{ a pro } \frac{h}{w} \ll 1 \text{ je } K_{C2} = 1. \quad (4.2.7)$$



Obr. 4.4 Mikropáskové vedení - nesymetrické [9]

4.3 Indukčnost vedení

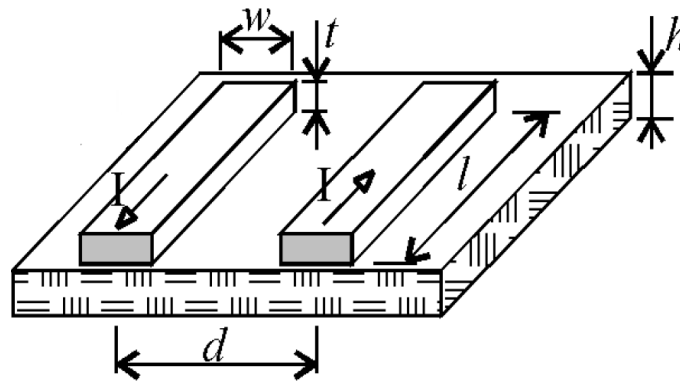
Zde jsou dále popsány výpočty indukčnosti pro různé typy páskových vedení, které jsou shodné s těmi, které byly použity pro výpočet kapacit v kapitole 4.2.

4.3.1 Koplanární vedení

Výpočet indukčnosti s takto uspořádaným vedením lze provést pomocí vztahu [9]:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{\pi \cdot (d - w)}{w + t} + 1 \right], \quad [\text{H/m}] \quad (4.3.1)$$

kde l, d, w a t jsou rozměry, které odpovídají okótování naznačeného na obrázku (*Obr. 4.5*).

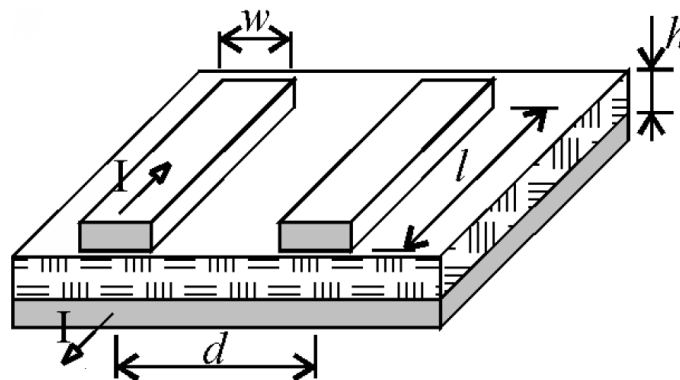


Obr. 4.5 Koplanární vedení [9]

4.3.2 Vázané mikropáskové vedení

Výpočet vzájemné indukčnosti pro tento typ uspořádání mikropáskového vedení (Obr. 4.6) se realizuje pomocí následujícího vztahu [9]:

$$\frac{L_m}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{d} \right)^2 \right]. \quad [\text{H/m}] \quad (4.3.2)$$



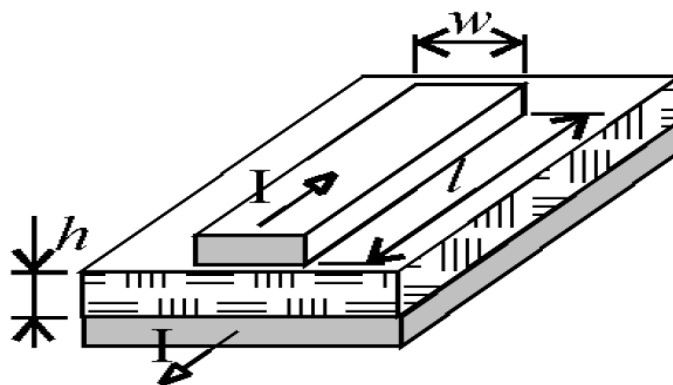
Obr. 4.6 Vázané mikropáskové vedení [9]

4.3.3 Mikropáskové vedení - nesymetrické

Tento typ mikropáskového vedení je vyobrazen na obrázku (Obr. 4.7). Výpočet indukčnosti je dán vztahem [9]:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{K_{L2}} \cdot \left(\frac{h}{w} \right), \quad [\text{H/m}] \quad (4.3.3)$$

za předpokladu, že K_{L2} je dán následovně $K_{L2} \approx 1 + 1,5 \cdot h/w$.

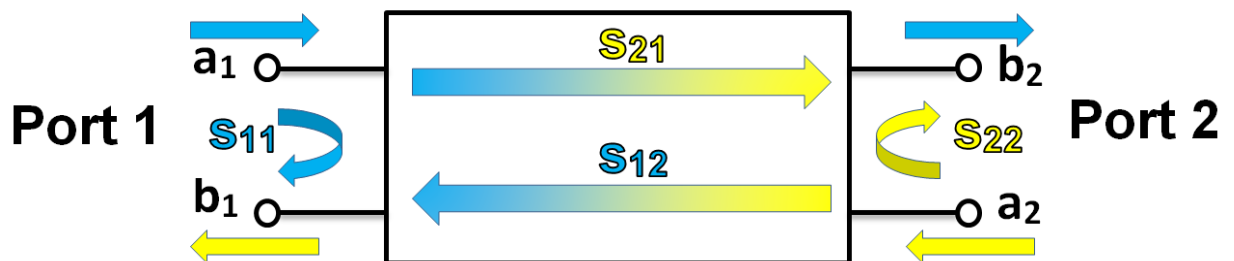


Obr. 4.7 Mikropáskové vedení - nesymetrické [9]

5 Rozptylové parametry

Pomocí S – parametrů lze s velkou přesností popsat vlastnosti zařízení, které pracuje na vyšších frekvencích. Aplikací řídicího signálu je sledována odražená a průchozí složka tohoto signálu. Matematicky se jedná o matici, která je složená z jednotlivých S - parametrů. Matice kvantifikuje, jak se signál šíří v n – branu. Díky těmto parametrům budou sledovány změny v testovaných vzorcích, které budou předmětem následujících kapitol. Bude zkoumán vliv prostředí a také tvar navržených vzorků pomocí měření S – parametrů na jednotlivých vzorcích. [10]

S – parametry mohou být zapsány jako komplexní čísla se svou reálnou a imaginární složkou nebo jako velikost a fázový posun. Tyto parametry jsou kmitočtově závislé, tedy liší se v závislosti na frekvenci. Obvykle se parametry zobrazují pomocí matice, jak již bylo výše zmíněno. Počet řádků a sloupců matice je dán počtem portů n – branu. Parametry obsažené v samotné matici mají indexy, z nichž každý představuje možnou vstupní – výstupní cestu signálu. Pro parametr S_{ij} je vstupní port (tzv. buzený port) zastoupen indexem i a výstupní port indexem j . V diplomové práci jsou popsány S – parametry pro dvojbran (Obr. 5.1), jelikož testované vzorky budou taktéž dvojbrany. Signál na vstupním portu je superponován do dvou vln, které procházejí obvodem v opačných směrech. Aby bylo možné jednotlivé zmíněné S - parametry lehce odvodit, jsou porty rozděleny do dvou uzlů, z nichž každý odpovídá normalizované komplexní napěťové vlně. Uzly a_i zde představují vlnu působící na port i a uzly b_j představují vlnu odraženou od portu j . Velikost a_i a b_j je dána napětím, které je normalizováno pomocí zadané referenční impedance Z_0 . [10]



Obr. 5.1 S – parametry dvojbranu

Za předpokladu, že každý port je zatížen referenční impedancí Z_0 , můžeme definovat jednotlivé S – parametry dvojbranu následovně dle [10]:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \text{vstupní koeficient odrazu (výstup zatížen } Z_0),$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} = \text{zpětný přenosový koeficient (vstup zatížen } Z_0),$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} = \text{přenosový koeficient (výstup zatížen } Z_0),$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} = \text{výstupní koeficient odrazu (vstup zatížen } Z_0). \quad (5.1)$$

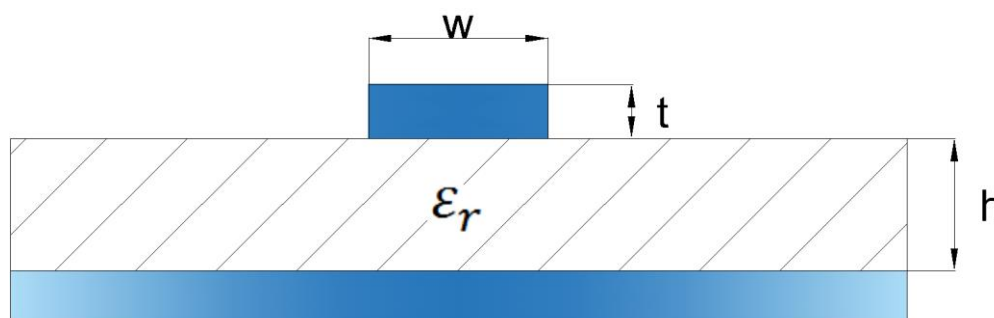
Rovnice (5.1) jsou pro S_{11} a S_{21} odvozeny z analýzy nebo měření za předpokladu, kdy hodnota dopadajícího signálu je $a_2 = 0$ a obdobně S_{12} a S_{22} , kdy hodnota $a_1 = 0$. [10]

6 Návrh testovaných vzorků

Praktická část diplomové práce je zaměřena na návrh a následné testování a měření rozptylových S – parametrů navržených vzorků. Vzorky byly navrženy dle matematických výpočtů a následně vyrobeny pomocí subtraktivní technologie (*kapitola 3.3*). Po vyhotovení bylo možné vzorky osadit SMA konektory, díky kterým lze realizovat měření jednotlivých rozptylových parametrů a sledovat tak změny způsobené vlivem prostředí.

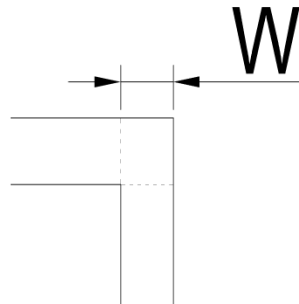
6.1 Mikropáskové vedení

Základním prvkem mikropáskového vedení je substrát, který je tvořen nízkoztrátovým dielektrikem. Výška substrátu h se pohybuje v intervalu od 0,2 až 1 mm. Hodnota relativní permitivity ϵ_r substrátu závisí na zvoleném materiálu. Nejčastěji používané materiály s hodnotami důležitých parametrů jsou uvedeny v tabulce v *kapitole 2 (Tab. 2.1)*. Spodní část substrátu je tvořena vodivým materiálem a horní část je tvořena samotným páskovým vedením. Mikropáskové vedení je znázorněno v níže uvedeném obrázku včetně okótování, které je využíváno při stanovení parametrů (*Obr. 6.1*). [2]

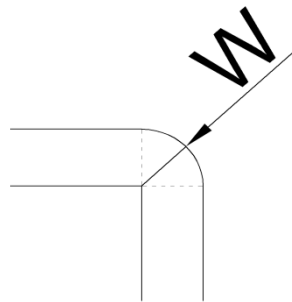


Obr. 6.1 Mikropáskové vedení

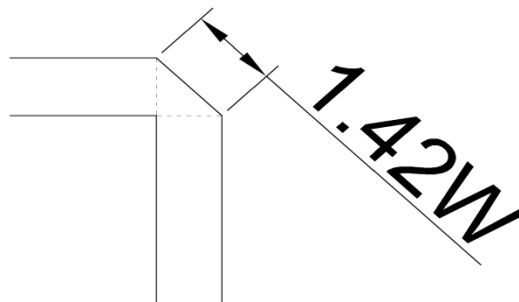
Mikropáskové vedení za účelem testování pro diplomovou práci bylo navrženo jako dlouhé rovné vedení a dále také s různými typy ohybu vodivé cesty. Konkrétně se jedná o pravouhlý ohyb (*Obr. 6.2*), pravouhlý zaoblený ohyb (*Obr. 6.3*) a pravouhlý zkosený ohyb (*Obr. 6.4*). Z těchto nákresů je také zřetelné okótování zkosení a ohybu u mikropáskového vedení, jak je uvedeno v [7]. Mikropásková vedení s ohybem vodivé cesty jsou navržena z důvodu sledování vlivu ohybu vodivé cesty na měřené parametry. Navržené vzorky byly realizovány na substrátu FR-4.



Obr. 6.2 Pravoúhlý ohyb



Obr. 6.3 Pravoúhlý zaoblený ohyb



Obr. 6.4 Pravoúhlý zkosený ohyb

Parametry mikropáskového vedení lze určit z jeho komfortně sruženého obrazu. Jelikož se procházející signál na mikropáskovém vedení šíří ve dvou různých prostředích, která mají odlišnou permitivitu (ϵ_r a ϵ_{vzduch}), nicméně se stejnou rychlostí, chová se vedení tak, jako by zde bylo pouze jedno dielektrikum o jedné permitivitě a tou je efektivní permitivita ϵ_{ef} . Výpočet efektivní permitivity je dle [4]:

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{w}}} + 0,04 \cdot \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 \right] - \frac{\epsilon_r - 1}{4,6} \cdot \frac{t/h}{\sqrt{w/h}}, \quad \text{pro } w/h \leq 1$$

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{w}}} - \frac{\varepsilon_r - 1}{4,6} \cdot \frac{t/h}{\sqrt{w/h}} \quad \text{pro } w/h \geq 1$$

(6.1.1)

Výpočet efektivní permitivity ε_{ef} je s maximální chybou 1% pro $t = 0$. Dále se určuje efektivní šířka mikropáskového vedení, která je dána dle [4] následovně:

$$w_f = \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right)}, \quad [m] \quad \text{pro } w/h \leq 1$$

$$w_f = w + 2,42h - 0,44 \cdot \frac{h^2}{w} + h \cdot \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6 \quad [m] \quad \text{pro } w/h \geq 1 \quad (6.1.2)$$

Tyto vztahy platí za předpokladu, že šířka pokovení $t = 0$. Chyba aproximace se pohybuje max. 0,25% pro $w/h < 10$ a max. 1% pro $w/h > 10$.

Ve výše zmíněných rovnicích jsou uvedeny konstanty, jež je třeba popsat. Výška substrátu je zde označena jako h a šířka mikropásku jako w . Samotná výška pokovení, tedy výška mikropásku, je zde zastoupena jako t a relativní permitivita substrátu je označena ε_r . Další podstatný parametr je délka vlny λ_g , která je dána vztahem [4]:

$$\lambda_g = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef}}}, \quad [m] \quad (6.1.3)$$

$$\text{kde } c \text{ je rychlost světla ve vakuu } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}}, \quad (6.1.4)$$

a pracovní frekvence obvodu je označena f . Konstanty, potřebné k výpočtu rychlosti světla jsou relativní permitivita vakua $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} [Fm^{-1}]$ a permeabilita vakua $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} [Hm^{-1}]$. Výpočet vlnové impedance Z_0 je určen vztahem [4]

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \cdot \frac{h}{w_f}, \quad [\Omega] \quad (6.1.5)$$

kdy je vliv tloušťky pokovení zanedbatelný pro $t/h \leq 0,005$; $2 \leq \varepsilon_r \leq 10$; $w/h \geq 0,1$. Dále je možné vlnovou impedanci vypočítat díky vzorcům, které uvedl Pozar v [6]:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_e}} \cdot \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right), \quad [\Omega] \quad \text{pro } w/h \leq 1$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_e \left[\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln\left(\frac{w}{h} + 1,444\right) \right]}}, \quad [\Omega] \quad \text{pro } w/h \geq 1 \quad (6.1.6)$$

kde efektivní permitivita substrátu mikropáskového vedení je dána vzorcem [6]:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{w}}} \quad (6.1.7)$$

Pokud máme zadanou vlnovou impedanci a hodnotu relativní permitivity materiálu substrátu, je možné vypočítat poměr w/h dle [6] následujícím způsobem:

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, \quad \text{pro } w/h < 2$$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right\} \right], \quad \text{pro } w/h > 2 \quad (6.1.8)$$

$$\text{kde, } A = \frac{Z_0}{60} + \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \cdot \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right), \quad (6.1.9)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}. \quad (6.1.10)$$

Návrh mikropáskového vedení vychází z výše uvedených rovnic. Základní podmínkou pro samotný návrh je dodržení vlnové impedance mikropáskového vedení $Z_0 = 50 \Omega$. Při samotném výpočtu rozměrů byl použit software Matlab a skript, který je součástí příloh (*Příloha B*). Před samotným návrhem vedení, je nutné stanovit si některé ze základních parametrů, které byly dosazeny do vzorců:

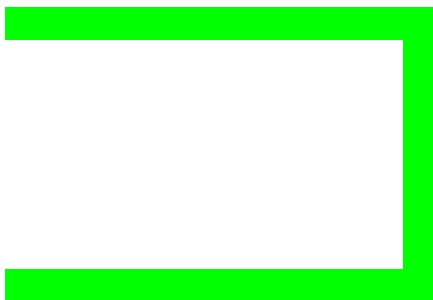
- Vlnová impedance $Z_0 = 50 \Omega$
- Relativní permitivita substrátu $\varepsilon_r = 4,2$ jedná se tedy o materiál FR-4
- Výška substrátu $h = 1 \text{ mm}$

Pro výpočet šířky mikropáskového vedení jsou tyto základní parametry dosazeny do rovnic (6.1.8 a 6.1.9) :

$$A = \frac{50}{60} + \sqrt{\frac{4,2 + 1}{2}} + \frac{4,2 - 1}{4,2 + 1} \cdot \left(0,23 + \frac{0,11}{4,2}\right) = 1,5014, \quad (6.1.9)$$

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^{1,5014}}{e^{2 \cdot 1,5014} - 2} = 1,9791, \quad (6.1.8)$$

Výsledná šířka pásku je $w = h \cdot 1,9791 = 1 \cdot 1,9791 \cong \mathbf{1,98 \text{ [mm]}}$. Po stanovení výsledné šířky mikropáskového vedení bylo možné navrhnout pomocí softwaru Ansoft Designer – Student Edition šablony, pomocí kterých jsou vzorky následně vyrobeny. Mikropásková vedení byla také navržena s větší mírou zkosení a zaoblení, aby bylo poté během testování možné pozorovat skutečný vliv tvaru tohoto vedení. Výsledné šablony včetně okótování jsou umístěny v příloze (*Příloha G*). Zde jsou detaily jednotlivých zahnutí navržených a posléze testovaných mikropáskových vedení (*Obr. 6.5 – Obr. 6.9*).



Obr. 6.5 Mikropáskové vedení – ostré hrany



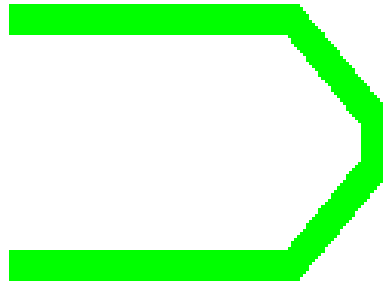
Obr. 6.6 Mikropáskové vedení - zaoblené hrany



Obr. 6.7 Mikropáskové vedení - větší zaoblení hran



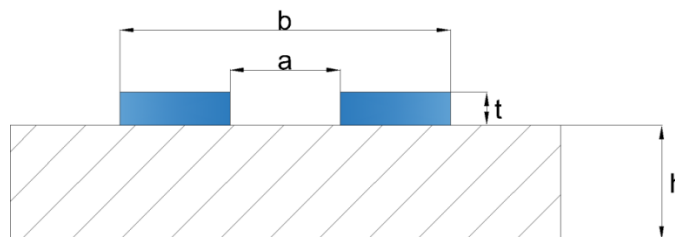
Obr. 6.8 Mikropáskové vedení - zkosené hrany



Obr. 6.9 Mikropáskové vedení - větší zkosení hran

6.2 Koplanární vedení

Tento typ páskového vedení se vyznačuje tím, že jeho vodiče (v tomto případě dva) leží v jedné rovině, respektive na horní straně dielektrického substrátu a dolní strana není pokovena (Obr. 6.10). U koplanárního vedení, oproti mikropáskovému, není potřeba vrtat technologické otvory pro součástky. To lze považovat za velkou přednost, protože vrtání např. do korundového substrátu není snadný úkol. [2]



Obr. 6.10 Koplanární vedení

Zde jsou uvedeny vztahy pro základní parametry koplanárního dvou vodičového vedení, které jsou dle [3]:

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot \frac{K(k)}{K(k')}, \quad [\Omega] \quad (6.2.1)$$

kde, Z_0 je vlnová impedance, η_0 je charakteristická impedance volného prostoru a ϵ_{ef} je efektivní permitivita. Dále je nutné definovat nejen η_0 , ale také zbylé koeficienty, které se v rovnici (6.2.1) vyskytují. Vztahy pro zbylé koeficienty jsou dány [4]:

$$\varepsilon_{ef} = 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{K(k')}{K(k)} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')}, \quad (6.2.2)$$

$$k = \frac{a}{b}, \quad (6.2.3)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad (6.2.4)$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}, \quad (6.2.5)$$

$$k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot a}{4 \cdot h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot b}{4 \cdot h}\right)}, \quad (6.2.6)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \cong 377. \quad [\Omega] \quad (6.2.7)$$

Při známé vlnové impedanci Z_0 je možné pro výpočet parametrů koplanárního vedení použít následující vztahy dle [7]:

$$\frac{a}{b}(k) = \left[1 - \left(\frac{e^x - 2}{e^x + 2} \right)^4 \right]^{1/2}, \quad Z_{0cp} \cdot \sqrt{(\varepsilon_r + 1)/2} \geq 30\pi \quad (6.2.8)$$

$$\frac{a}{b}(k) = \left(\frac{e^{\pi^2/x} - 2}{e^{\pi^2/x} + 2} \right)^2, \quad Z_{0cp} \cdot \sqrt{(\varepsilon_r + 1)/2} \leq 30\pi \quad (6.2.9)$$

$$x = \frac{Z_{0cp}}{30} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}, \quad (6.2.10)$$

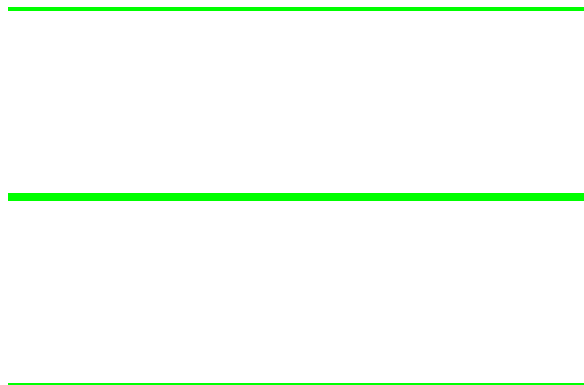
$$Z_{0cp} = \frac{2}{\varepsilon_r + 1} \cdot \frac{(60\pi)^2}{Z_0}. \quad [\Omega] \quad (6.2.11)$$

Tento typ vedení bude navržen pro dvě hodnoty vlnové impedance Z_0 . Při výpočtech byl použit software Matlab, který umožnil výpočet eliptických integrálů, které se vyskytují v rovnicích. V příloze (*Příloha C*) je obsažen skript, který pomocí výše zmíněného programu umožní výpočet parametrů koplanárního vedení. Vhodnou volbou počátečních parametrů je cílem výpočtů se co nejvíce přiblížit k hodnotě vlnové impedance, kterou je potřeba stanovit na začátku celého návrhu.

Parametry koplanárního vedení při $Z_0 = 50 \Omega$:

- Vlnová impedance, které chceme dosáhnout: $Z_0 = 50 \Omega$
- Relativní permitivita substrátu: $\epsilon_r = 4,2$ jedná se tedy o materiál FR-4
- Délka koplanárního vedení: $l = 300 \text{ mm}$
- Šířka mezery: $a = 100 \mu\text{m}$
- Šířka vodivého pásku: $w = 9 \text{ mm}$
- Výška substrátu: $h = 1 \text{ mm}$

Při takto zvolených parametrech je nejbližší možný výsledek vlnové impedance koplanárního vedení vypočten za pomoci programu Matlab na hodnotu $Z_0 = 67,1701 \Omega$ (*Obr. 6.11*). Pokud by se zvolil například jiný materiál substrátu s vyšší relativní permitivitou ϵ_r , byla by hodnota vlnové impedance blíže stanovenému požadavku.

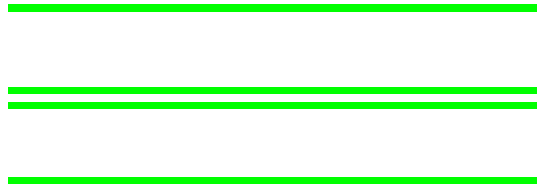


Obr. 6.11 Koplanární vedení 67Ω

Parametry koplanárního vedení při $Z_0 = 100 \Omega$:

- Vlnová impedance, které chceme dosáhnout: $Z_0 = 100 \Omega$
- Relativní permitivita substrátu: $\epsilon_r = 4,2$ jedná se tedy o materiál FR-4
- Délka koplanárního vedení: $l = 300 \text{ mm}$
- Šířka mezery: $a = 400 \mu\text{m}$
- Šířka vodivého pásku: $w = 2 \text{ mm}$
- Výška substrátu: $h = 1 \text{ mm}$

Při takto zvolených parametrech včetně materiálu se podařilo pomocí výpočtů přiblížit k požadované vlnové impedanci s velkou přesností, čili $Z_0 = 100,02 \Omega$ (Obr. 6.12).



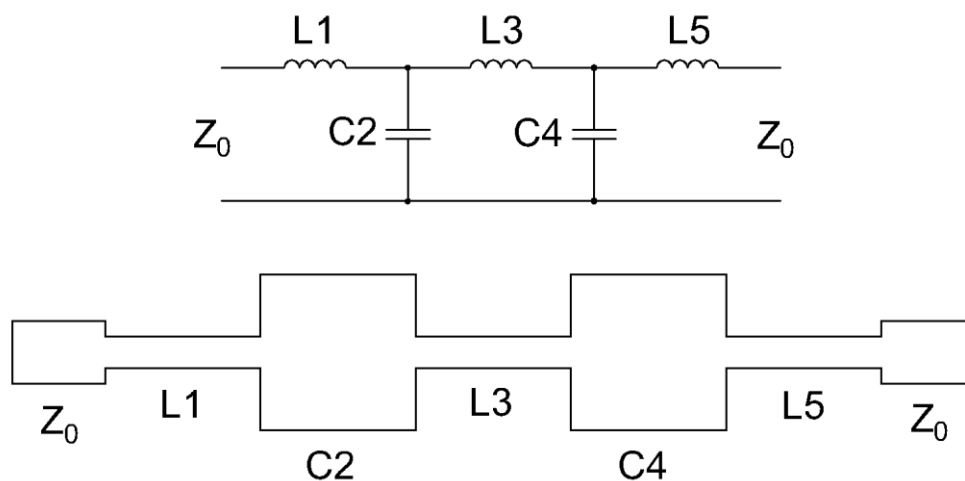
Obr. 6.12 Koplanární vedení 100Ω

Navržené šablony koplanárních vedení včetně okótovaných rozměrů jsou umístěny v příloze (Příloha G).

6.3 Mikrovlnný filtr

Obecně se návrh mikrovlnného filtru a jeho požadovaných parametrů realizuje pomocí klasických postupů, kdy se filtr navrhne pomocí L a C součástek se soustředěnými parametry a poté následuje realizace pomocí prvků, které odpovídají planární struktuře. [4]

Pro návrh byla vybrána Čebyševova dolní propust realizovaná pomocí mikropáskového vedení. V této kapitole jsou popsány vztahy a vzorce, které jsou nutné pro výpočet parametrů daného filtru, ze kterých je poté možné vypočítat fyzické rozměry mikropáskových vodivých cest. Elektrické schéma zvoleného filtru je znázorněno na obrázku (Obr. 6.13), včetně motivu mikropáskového vedení, který vychází z elektrického schématu.



Obr. 6.13 Dolní propust pátého řádu

Kapacita úseku vedení je dle [8] dána takto:

$$C_2 = C_4 = \left(\frac{g_0}{Z_0}\right) \cdot \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f}\right) \cdot g_2, \quad [\text{F}] \quad (6.3.1)$$

kde Z_0 je vlnová impedance vedení, Ω_c je normovaný mezní kmitočet a g_2 hodnota prvku prototypové dolní propusti a f je mezní kmitočet filtru.

Indukčnost úseku vedení je vyjádřena dle [8] následovně:

$$L_1 = L_5 = \left(\frac{Z_0}{g_0}\right) \cdot \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f}\right) \cdot g_1, \quad [\text{H}] \quad (6.3.2)$$

$$L_3 = \left(\frac{Z_0}{g_0}\right) \cdot \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f}\right) \cdot g_3, \quad [\text{H}] \quad (6.3.3)$$

kde g_1 a g_3 jsou hodnoty prvků prototypové dolní propusti.

Výpočet fyzických rozměrů mikropáskového filtru je obdobný jako výpočet mikropáskového vedení. Vzorce použité pro výpočet šířky mikropásku w , efektivní permitivity ε_e a vlnové délky λ_g jsou uvedené v kapitole 6.1. Tyto výše zmíněné parametry jsou důležité pro výpočet fyzické délky mikropáskového vedení filtru. Samotnou délku lze stanovit dle [6]:

$$\beta l_L = (L \cdot Z_0) / Z_{0L}, \quad (6.3.4)$$

$$\beta l_C = (C \cdot Z_{0C}) / Z_0, \quad (6.3.5)$$

kde L a C jsou hodnoty prvků prototypového filtru odpovídající úseku vedení, Z_{0L} je charakteristická impedance úzkého vedení, Z_{0C} je charakteristická impedance širokého vedení a $\beta = \lambda_g / 2\pi$.

Praktický návrh se týká Čebyševova filtru, konkrétně se jedná o dolní propust pátého řádu s hodnotami mezní frekvence $f = 2,4 \text{ GHz}$ a 5 GHz . Zde je popsán výpočet parametrů a také rozměrů daného filtru. Celý návrh vychází z počátečních parametrů, které je potřeba stanovit před samotným začátkem návrhu. Během návrhu mikropáskového vedení filtru je nutné znát charakteristickou vlnovou impedanci. Při pohledu na rovnici vlnové impedance (6.1.5) lze vyzorovat, že úzký úsek filtru má velkou impedanci a široký úsek malou impedanci. Díky této skutečnosti je zvolena vlnová impedance indukčního úseku přibližně dvakrát větší než je vstupní vlnová impedance, čili $Z_{0L} = 93 \Omega$ a kapacitní úsek by měl mít přibližně dvakrát menší impedanci, než je vstupní vlnová impedance, v tomto případě je $Z_{0C} = 24 \Omega$. [8]

Zde jsou uvedeny důležité hodnoty parametrů pro návrh mikrovlnného filtru:

- Vstupní vlnová impedance: $Z_0 = 50 \Omega$
- Relativní permitivita substrátu: $\epsilon_r = 4,2$ jedná se tedy o materiál FR-4
- Výška substrátu: $h = 1 \text{ mm}$
- Zvlnění v propustném pásmu $L_{Ar} = 0,1 \text{ dB}$

Pro výpočty jsou důležité hodnoty prvků prototypové Čebyševovy dolní propusti, které jsou uvedeny v [8]:

$$g_0 = g_6 = 1, \quad [-] \quad (6.3.6)$$

$$g_1 = g_5 = 1,1468, \quad [-] \quad (6.3.7)$$

$$g_2 = g_4 = 1,3712, \quad [-] \quad (6.3.8)$$

$$g_3 = 1,9750, \quad [-] \quad (6.3.9)$$

kdy veškeré hodnoty platí pro normovaný mezní kmitočet $\Omega_C = 1$.

V tabulce (Tab. 6.1 a Tab. 6.2) jsou uvedeny vypočtené hodnoty obou navržených filtrů včetně fyzických rozměrů, které je realizovány pomocí mikropáskových vedení. Pro stanovení těchto hodnot byly použity výpočtové skripty, které lze spustit v programu Matlab (Příloha B, Příloha D, Příloha E, Příloha F).

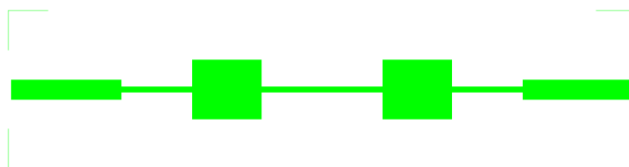
Tab. 6.1 Parametry filtru pro 2,4 GHz

	Šířky vedení		Indukčnost a kapacita vedení		Ef. Permittivita		Vln. délky		Délky vedení	
		[mm]		[H]		[-]		[mm]		[mm]
L1 a L5	0,57	[mm]	3,80E-09	[H]	4,1842	[-]	73	[mm]	7,20	[mm]
C2 a C4	6,00	[mm]	1,82E-12	[F]	3,5238	[-]	67	[mm]	7,00	[mm]
L3	0,57	[mm]	6,55E-09	[H]	4,1842	[-]	73	[mm]	12,30	[mm]
Přívod	1,98	[mm]	1,30E-12	[F]	3,2021	[-]	70	[mm]	11,14	[mm]

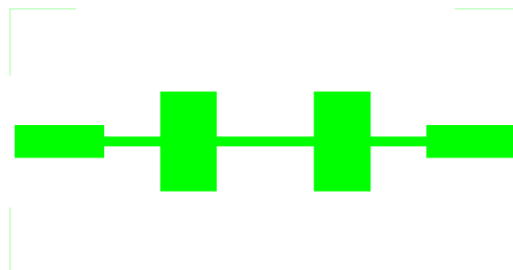
Tab.6.2 Parametry filtru pro 5 GHz

	Šířky vedení		Indukčnost a kapacita vedení		Ef. Permittivita		Vln. délky		Délky vedení	
		[mm]		[H]		[-]		[mm]		[mm]
L1 a L5	0,57	[mm]	1,85E-09	[H]	2,9525	[-]	35	[mm]	3,40	[mm]
C2 a C4	6,00	[mm]	8,70E-13	[F]	3,5238	[-]	32	[mm]	3,40	[mm]
L3	0,57	[mm]	3,14E-09	[H]	2,9525	[-]	35	[mm]	5,90	[mm]
Přívod	1,98	[mm]	6,36E-13	[F]	3,2021	[-]	34	[mm]	5,40	[mm]

Šablony, které byly vyhotoveny pomocí softwaru Ansoft Designer – SE jsou včetně okótování umístěny v příloze (Příloha G). Ukázka vyhotovených testovacích vzorků jsou na dále umístěných obrázcích (Obr. 6.14 a Obr. 6.15).



Obr. 6.14 Mikropáskový filtr - dolní propust 2,4 GHz



Obr. 6.15 Mikropáskový filtr - dolní propust 5,0 GHz

7 Testování vzorků

Zadáním diplomové práce je zkoumání vlivu prostředí na vysokofrekvenční propojovací struktury. Cílem testování bylo zjištění vlivu konstantního vlhkého tepla na S – parametry jednotlivých vzorků. Klimatické prostředí má všeobecně vliv na různé parametry elektronických zařízení. Zkoumání vlivu prostředí na S – parametry bylo zajištěno pomocí zrychlené zkoušky, která vychází z normy ČSN EN 60068 – 2 –78 ed. 2 z roku 2013, jež je zaměřena na zkoušku vlhkého konstantního tepla. Dále pro toto testování byla použita norma ČSN EN 60068 – 1 ed. 2 z roku 2014 pro zkoušení a vliv prostředí, která uvádí obecné informace a návod k měření.

Výše uvedené normy stanovují postupy testování vlivu prostředí včetně podmínek, za kterých má probíhat. V následujících tabulkách (*Tab. 7.1, Tab. 7.2 a Tab. 7.3*) jsou uvedeny podmínky testování, které by se měly během celého průběhu testování dodržet. Vyznačené řádky v tabulkách určují podmínky, za kterých toto testování navržených vzorků probíhalo.

Tab. 7.1 Teplota a relativní vlhkost testovací komory[11]

Teplota °C	Relativní vlhkost % RH
30 ± 2	93 ± 3
30 ± 2	85 ± 3
40 ± 2	93 ± 3
40 ± 2	85 ± 3

Tab. 7.2 Normální podmínky pomocného sušení [12]

Teplota °C	Relativní vlhkost % RH	Tlak vzduchu ^a
55 ± 2	Nejvýše 20	86 kPa až 106 kPa (860 mbar až 1 060 mbar)
^a Včetně krajních hodnot.		

Tab. 7.3 Preferované doby trvání zkoušky [11]

Preferované doby trvání zkoušky						
12 h	16 h	24 h	2 dny	4 dny	21 dní	56 dní

7.1 Postup testování

Testované vzorky byly umísťovány do zkušební komory (*Příloha H*), kde byly vystaveny konstantnímu vlhkému teplu v cyklických časových intervalech (*Tab. 7.3*). Před každým měřením S – parametrů bylo potřeba dle [12] podrobit vzorky pomocnému sušení. Toto pomocné sušení probíhalo v laboratorní peci, která po dobu 6 hodin vzorky sušila za podmínek stanovených normou (*Tab. 7.2*).

Samotné měření S - parametrů probíhalo pomocí přístroje SPARQ – 3002E, což je analyzátor síťové integrity, který je propojen pomocí USB rozhraní k přenosnému počítači. Připojení vzorků je realizováno pomocí stíněných kabelů, které jsou určeny přímo pro používaný typ měřicího přístroje. Kalibrace těchto kabelů probíhá automaticky po celou dobu měření S – parametrů jednotlivých vzorků. Vyhodnocování naměřených parametrů probíhá pomocí softwaru SPARQ Software, který zaznamenává v zadaném frekvenčním rozsahu naměřené S – parametry a následně sestrojí grafy těchto jednotlivých parametrů. Software SPARQ bohužel neumožňuje uložení těchto vykreslených grafů, proto jsou výsledné grafy v diplomové práci sestrojeny pomocí tabulkového editoru Microsoft Excel. Průběh měření S – parametrů lze vidět na obrázku (*Obr. 7.1*).



Obr. 7.1 Testování vzorků

Měření hodnot jednotlivých S – parametrů probíhalo s nastaveným frekvenčním rozsahem od 0 – 20 GHz. Hodnoty byly poté exportovány a upraveny pomocí tabulkového editoru. Následně bylo možné sestavit grafy S – parametrů jednotlivých testovaných vzorků v závislosti na frekvenci. Jelikož testované vzorky jsou dvojbrany, zaznamenávány byly hodnoty parametrů S_{11} , S_{12} , S_{21} a S_{22} . Teorie S - parametrů je uvedena v kapitole 5. Z důvodu obsáhlosti dat jsou tabulky s hodnotami měřených parametrů pro daný frekvenční rozsah pouze součástí příloženého CD k diplomové práci.

7.2 Výsledky testování

Jelikož byly navrženy a testovány vzorky, které představují symetrický dvojbran, neboli naměřené S – parametry $s_{11} = s_{22}$ a $s_{12} = s_{21}$ budou popsány výsledky celého testování na parametrech s_{11} a s_{12} . Drobné rozdíly, které mají zbylé dva parametry, zde nejsou uvažovány.

7.2.1 Vliv zahnutí mikropáskových vedení

Mikropásková vedení, která byla navržena s různými tvary zahnutí (viz kapitola 6.1), byla testována z důvodu zkoumání vlivu těchto zahnutí na naměřené S – parametry. Výsledky tohoto vlivu, je možné pozorovat v grafu (Příloha I). Z grafu pro parametr s_{11} (Příloha I) lze jasně vypočítat, že pro všechna mikropásková vedení dochází k největšímu útlumu přeneseného výkonu vlivem odrazů na vstupním portu ve frekvenčním pásmu přibližně 10 až 15 GHz. Při pohledu na graf (Příloha I) parametru s_{12} je vidět, že nejmenší vliv odrazů na přenos signálu se odehrává na mikropáskovém dlouhém vedení, které nemá žádné zkosení hran. Zbytek navržených vedení má přibližně od 6 GHz přenos silně zatížen odrazy, které jsou při přenosu signálu nežádoucí. Nejen že díky těmto odrazům nejsme schopni přenést stanovený výkon, ale také může dojít ke zničení zařízení. Největší zatížení signálu odrazy – 80 dB dosahuje mikropáskové vedení, které má větší zkosení hran a to přibližně při frekvenci 18 GHz. Závěr testování vlivu zkosení hran je tedy takový, že navržená zkosení mají značný vliv na měřené S – parametry, které se tímto zhoršují.

7.2.2 Mikropáskové dlouhé vedení

Grafy pořízené měřením S – parametrů, kdy byl tento vzorek (Obr. 7.2) vystaven působení vlivu konstantního vlhkého tepla, jsou umístěny v příloze (Příloha J). Z grafu pro parametr s_{11} lze opět vyčíst, že nejvíce odrazů na vstupním portu se odehrává

ve frekvenčním pásmu přibližně 10 až 15 GHz. Graf sestrojený pro parametr s_{12} poukazuje na vliv odrazů na přenesený výkon. Při vyšších frekvencích je mikropáskové dlouhé vedení zatíženo těmito odrazy a dochází ke ztrátě přeneseného výkonu. Po celou dobu testování, kdy byl vzorek opakovaně umisťován do zkušební komory a byly měřeny jeho S – parametry, nedocházelo k razantním změnám parametrů. Pokud bychom uvažovali chybu testovací metody a samotného přístroje, lze říci, že na tento vzorek nemá konstantní vlhké teplo dopad. Ačkoliv nemá prostředí vliv na tento druh navrženého vedení, lze jeho účinky zpozorovat na SMA konektorech. Na obrázku (Obr. 7.3) je vidět oxidace povrchu samotného konektoru způsobená konstantním vlhkým teplem.



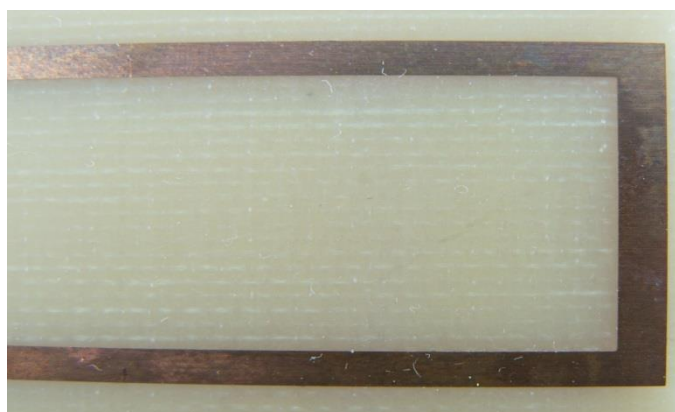
Obr. 7.2 Mikropáskové dlouhé vedení



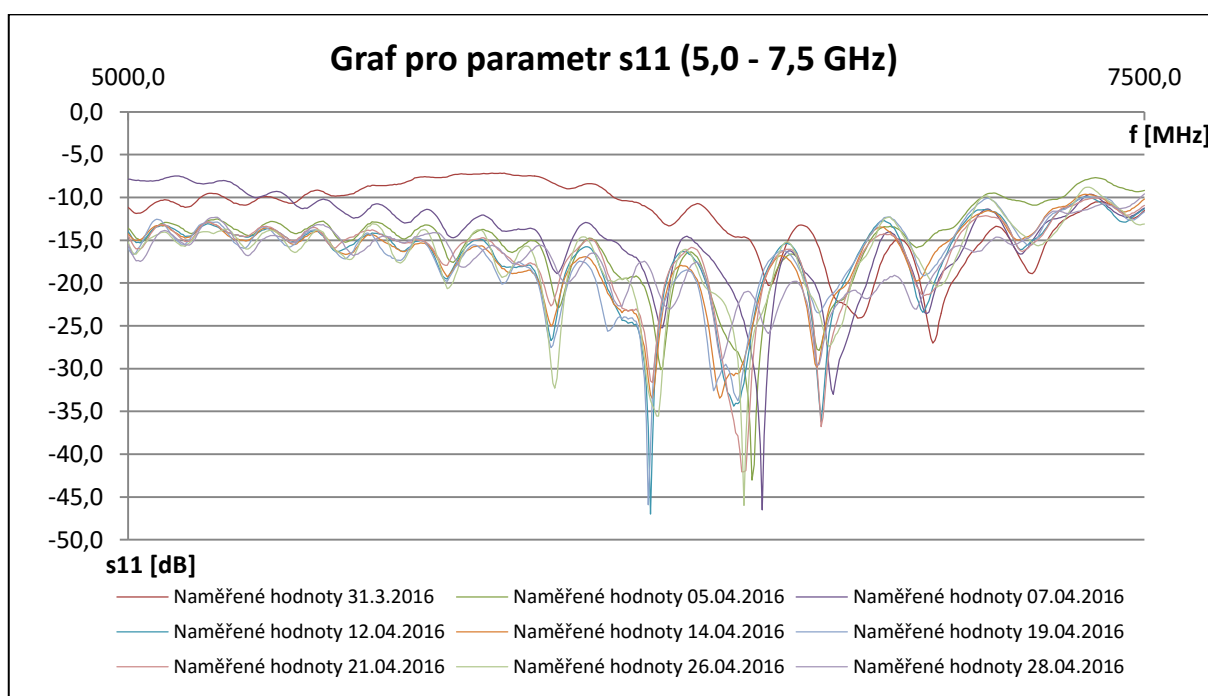
Obr. 7.3 Oxidace SMA konektoru

7.2.3 Mikropáskové vedení – ostrý úhel zkosení hran

Grafy, které zobrazují vliv prostředí na měřené S – parametry tohoto testovaného vzorku jsou umístěny v příloze (Příloha K). Testovaný vzorek (Obr. 7.4) při pohledu na graf parametru s_{11} opět vykazuje ve frekvenčním pásmu 10 až 15 GHz nejvíce odrazů na vstupním portu a přenesený výkon je téměř utlumen. V nižším frekvenčním pásmu dochází k jistým vlastním rezonancím, nicméně je zajištěn přenos výkonu. Při pohledu na graf parametru s_{12} lze vypožorovat, jak je přenesený výkon velmi zatížen odrazy přibližně od 6 GHz. V grafu pro parametr s_{11} (Graf 7.1) nejsou viditelné radikální změny po celou dobu testování. Jisté výchylinky, které jsou v grafu viditelné, jsou způsobeny měřicí metodou a zapojením při samotném měření.



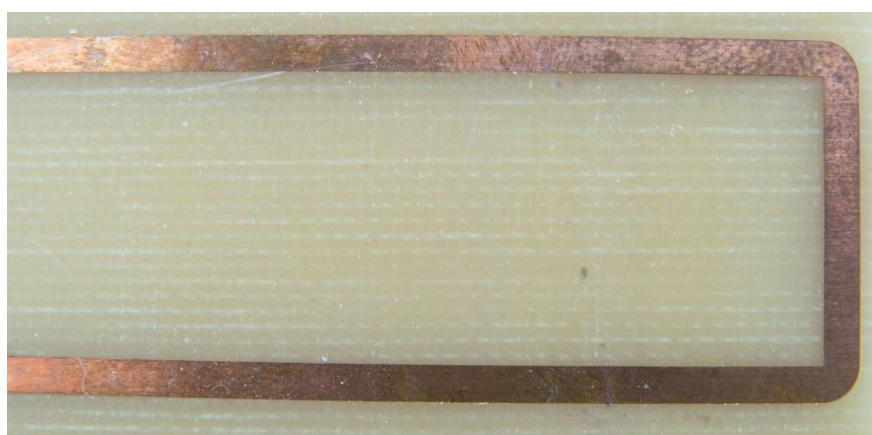
Obr. 7.4 Mikropáskové vedení - ostré hrany



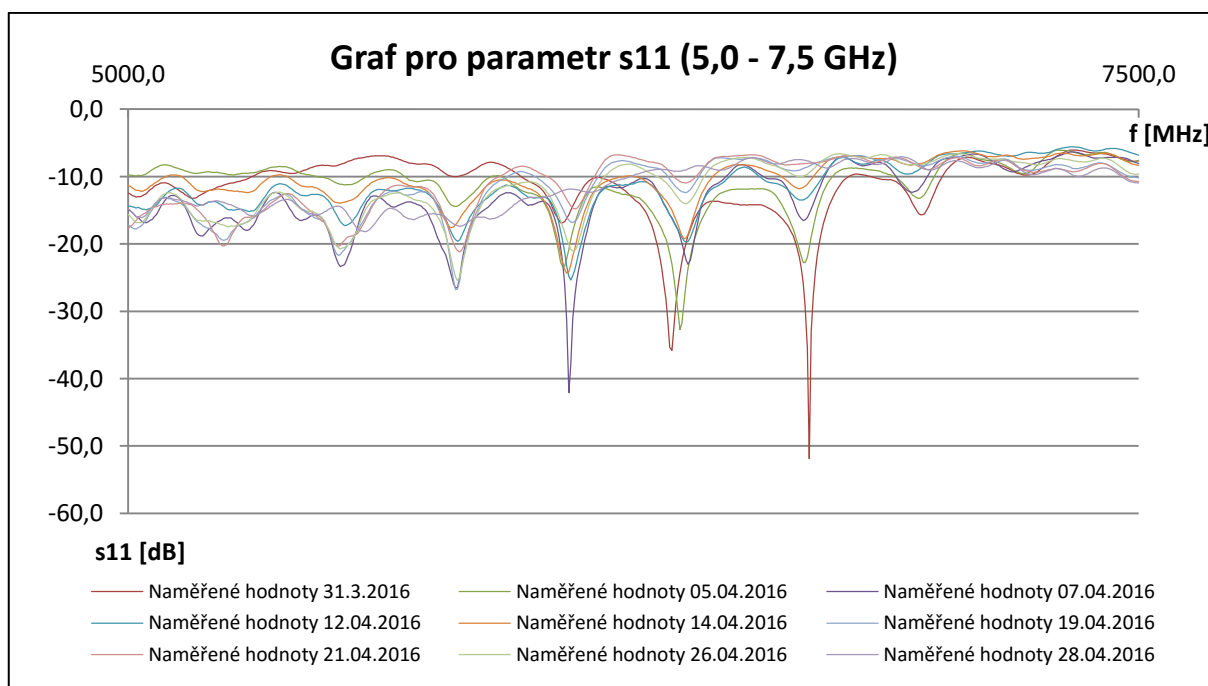
Graf 7.1 Mikropáskové vedení – ostré hrany - vliv prostředí na S_{11}

7.2.4 Mikropáskové vedení – zaoblené hrany

Tento typ mikropáskového vedení je vyobrazen na obrázku (Obr. 7.5). Grafy, které byly sestaveny díky měření S – parametrů jsou umístěny v příloze (Příloha L). Tento vzorek, při pohledu na graf parametru s_{11} , má stále ve frekvenčním pásmu přibližně 10 až 15 GHz utlumený přenos energie díky odrazům na vstupním portu. Z grafu pro parametr s_{12} lze pro tento vzorek stanovit, jak je přenos zatížen odrazy již od necelých 6 GHz. Při prozkoumání grafu (Graf 7.2) s parametrem s_{11} lze vypožorovat, že na tento testovaný vzorek má konstantní vlhké teplo minimální vliv. Viditelné výkyvy v tomto grafu mohou být způsobeny samotným měřením nebo špatným zapojením.



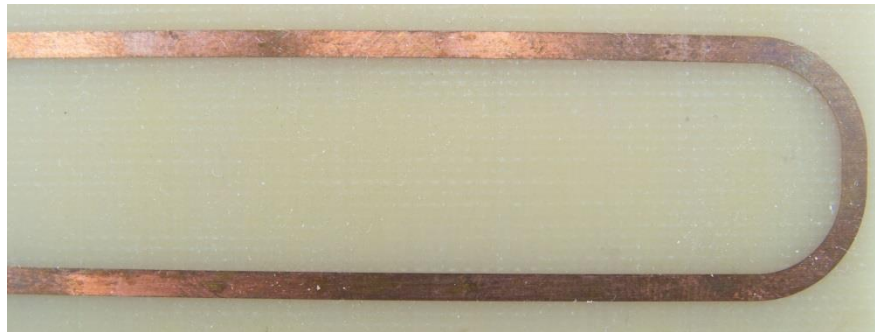
Obr. 7.5 Mikropáskové vedení - zaoblené hrany



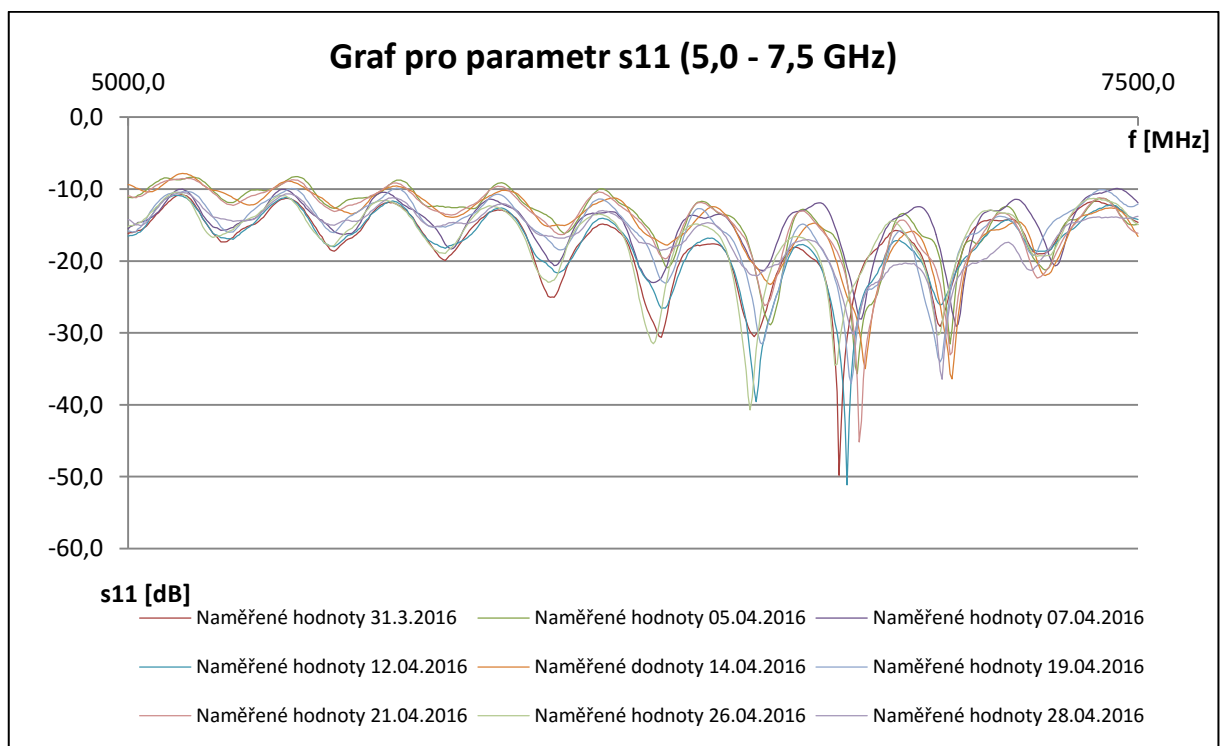
Graf 7.2 Mikropáskové vedení - zaoblené hrany – vliv prostředí na S_{11}

7.2.5 Mikropáskové vedení – větší zaoblení hran

Náhled testovaného vzorku je vyobrazen na obrázku (Obr. 7.6). Grafy potřebné k vyhodnocení testování vlivu prostředí jsou umístěny v příloze (Příloha M). Pohled na graf parametru s_{11} ukazuje, že takto navržený vzorek utlumí nejvíce přenesené energie díky odrazům na vstupním portu přibližně ve frekvenčním pásmu 10 až 15 GHz. Tato hodnota zatím stále odpovídá prvotnímu měření, jak je uvedeno v kapitole 7.2.1. Graf parametru s_{12} ukazuje, že přenos je značně zatížen odrazy cirka od 6 GHz. Graf pro vybrané frekvenční pásmo (Graf 7.3) neproказuje jasný vliv prostředí na tento testovaný vzorek. Dochází zde ke kolísání hodnot parametru S_{11} po celou dobu testování, nicméně nedochází k jednoznačnému zhoršení.



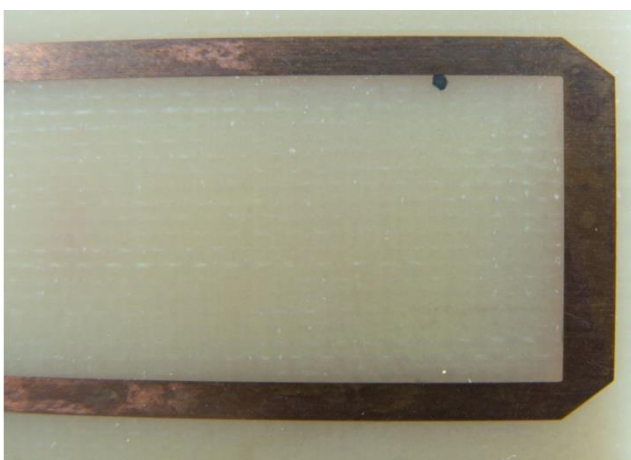
Obr. 7.6 Mikropáskové vedení - větší zaoblení hran



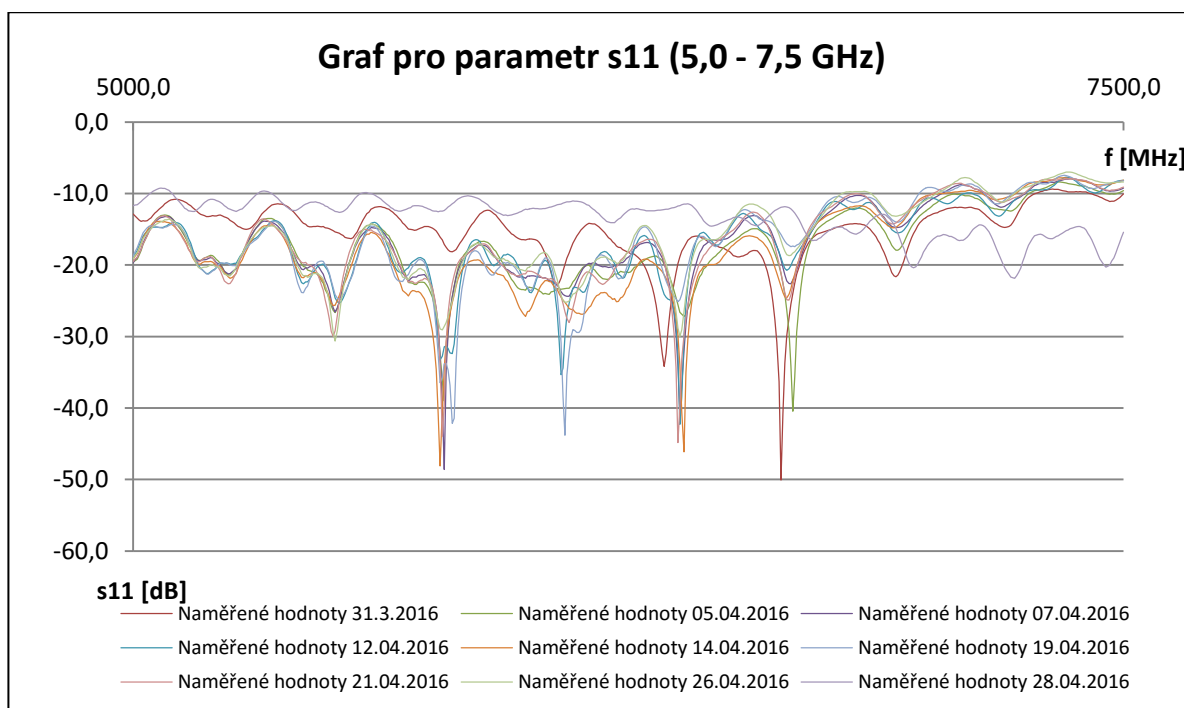
Graf 7.3 Mikropáskové vedení - větší zaoblení hran - vliv prostředí na S_{11}

7.2.6 Mikropáskové vedení – zkosené hrany

Tento testovaný vzorek je vyobrazen na obrázku (Obr. 7.7). Grafy jsou pro lepší viditelnost umístěny v příloze (Příloha N). Graf parametru s_{11} , odpovídá stejnému předpokladu, jako ostatní testovaná mikropásková vedení. Ve frekvenčním pásmu 10 až 15 GHz dochází k utlumení přenesené energie. Graf parametru s_{12} ukazuje, jak je přenos zatížen odrazy od necelých 6 GHz. Graf pro vliv prostředí na parametr S_{11} (Graf 7.4) ukazuje výkyv při posledním měření, kdy se hodnoty tohoto parametru liší od ostatních. Jelikož se jednalo o poslední výsledky testování, nelze jasně říci, zdali má konstantní vlhké teplo vliv na tento druh mikropáskového vedení. Vzorek by musel být podroben dalšímu testování.



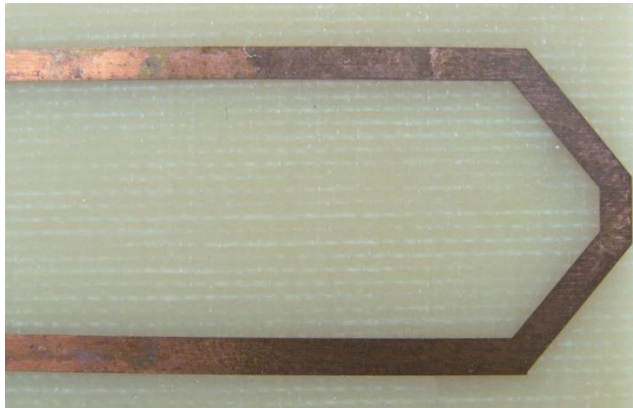
Obr. 7.7 Mikropáskové vedení - zkosené hrany



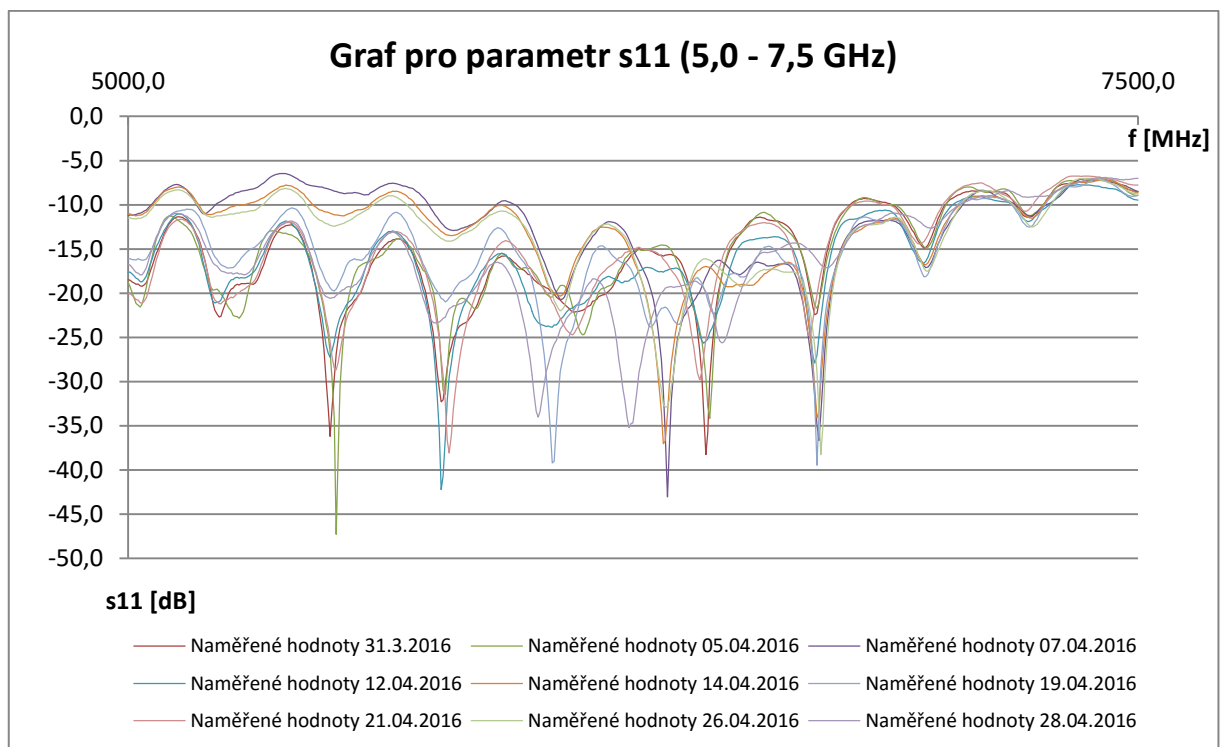
Graf 7.4 Mikropáskové vedení - zkosené hrany - vliv prostředí na S_{11}

7.2.7 Mikropáskové vedení – větší zkosení hran

Poslední zástupce mikropáskových vedení, jako takových je mikropáskové vedení s větším zkosením hran (Obr. 7.8). Grafy S – parametrů jsou umístěny v příloze (Příloha O). Tento testovaný vzorek má při pohledu na graf parametru s_{11} ve frekvenčním pásmu 10 až 15 GHz největší útlum přenesené energie, který je způsoben odrazy na vstupním portu. Při nižších frekvencích lze signál přenášet. Graf parametru s_{12} zobrazuje, jak je přenos zatížen odrazy od 6 GHz, kdy od 12,5 GHz dosahuje tento parametr svých nejzápornějších hodnot. Z grafu pro vliv prostředí na parametr S_{11} (Graf 7.5) nelze jasně stanovit vliv konstantního vlhkého tepla na tento vzorek, jelikož hodnoty tohoto parametru po celou dobu testování vzorku kolísají, ale nedochází ke stálému zhoršování.



Obr. 7.8 Mikropáskové vedení - větší zkosení hran



Graf 7.5 Mikropáskové vedení - větší zkosení hran - vliv prostředí na S_{11}

7.2.8 Koplanární vedení – 67 Ω

Tento testovaný vzorek je vyobrazen níže na obrázku (Obr. 7.9). Grafy sestrojené pro vybrané S -parametry jsou pro přehledné zobrazení umístěny v příloze (Příloha P). Díky grafu parametru s_{11} lze vypočítat, že k největšímu útlumu přenesené energie vlivem odrazů na vstupním portu dochází ve frekvenčním pásmu 12 až 15 GHz. Pro parametr s_{12} lze vypočítat pro zvětšující se frekvenci, jak je přenos zatížen odrazy. Čím je zde frekvence vyšší, tím více odrazy zatěžují přenos. Přenesená energie není zatížena odrazy přibližně do 2,5 GHz. Vliv prostředí na tento typ vedení nelze z grafů těchto S – parametrů vypočítat. Jsou zde viditelné výkyvy, které nelze prokazatelně spojit s vlivem konstantního vlhkého tepla.



Obr. 7.9 Koplanární vedení 67 Ω

7.2.9 Koplanární vedení – 100 Ω

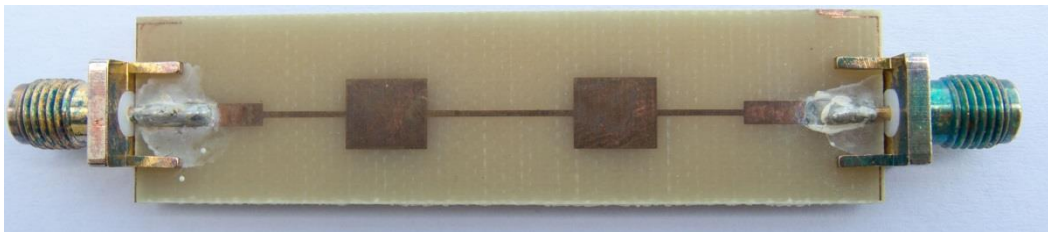
Tento druh vedení je vyobrazen na obrázku (Obr. 7.10). Grafy sestrojené pomocí naměřených hodnot S – parametrů testovaného vzorku jsou umístěny v příloze (Příloha Q). Dle sestrojeného grafu parametru s_{11} lze u tohoto vzorku stanovit frekvenční pásmo, kdy dochází k největšímu útlumu přenesené energie vlivem odrazů na vstupním portu. Jedná se o pásmo 13 až 16 GHz. Při pohledu na graf parametru s_{12} je možné stanovit do jaké frekvence je přenesená energie nezatížena odrazy. Jedná se o frekvenci 2,5 GHz. Pro zbylé frekvence je přenos velmi zatížen odrazy. Vliv prostředí zde není prokazatelně viditelný. V grafech vybraných parametrů jsou jisté rozdíly průběhu testování, ale nic nenasvědčuje k jejich zhoršování.



Obr. 7.10 Koplanární vedení 100 Ω

7.2.10 Filtr 2,4 GHz – dolní propust

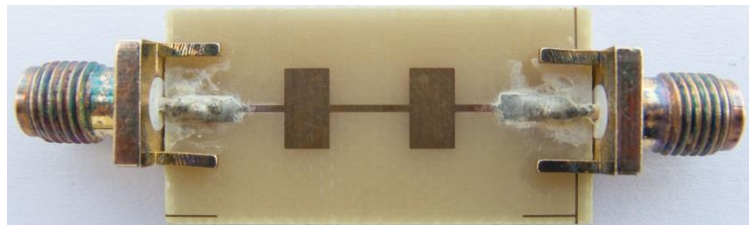
Filtr je vyobrazen na obrázku (Obr. 7.11). Grafy, které zobrazují vybrané S – parametry jsou součástí příloh (Příloha R). Při pohledu na graf parametru s_{11} lze vidět, že do mezní frekvence 2,4 GHz je odraz na vstupním portu pod 10 dB. Lze tedy říci, že desetina výkonu se odrazí. Graf parametru s_{12} udává, že do frekvence 2,4 GHz je téměř nulový útlum, tedy přenos je cca 1, což znamená téměř nulové odrazy na přenosu. Při testování tohoto vzorku se měnil výrazněji parametr s_{11} , ale pouze ve dvou případech a to za vyšších frekvencí. Během testování nebyl prokázán vliv konstantního vlhkého tepla na S – parametry takto navrženého filtru.



Obr. 7.11 Filtr 2,4 GHz - Čebyševova dolní propust

7.2.11 Filtr 5,0 GHz – dolní propust

Tento testovaný filtr je zobrazen na obrázku (Obr. 7.12). Grafy vybraných S – parametrů jsou umístěny v příloze (Příloha S). Při zkoumání grafů, lze vypořadovat, že mezní kmitočet filtru je nižší, než bylo původně navrženo. Tato nepřesnost může být způsobena nepřesným vyleptáním tenkých částí mikropáskového filtru. Z grafu pro parametr s_{11} lze opět vypořadovat, jak do mezní frekvence, přibližně 4,3 GHz, se odraz na vstupním portu pohybuje pod 10 dB. Odrazí se tedy přibližně desetina výkonu. Parametr s_{12} se v grafu do mezního kmitočtu přibližuje nule, což značí přenos téměř 1. Nastávají zde minimální odrazy v přenosu. Z vyhotovených grafů naměřených S - parametrů lze říci, že na takto navržený filtr nemá konstantní vlhké teplo dopad.



Obr. 7.12 Filtr 5,0 GHz - Čebyševova dolní propust

Závěr

Diplomová práce se zabývá vlivem prostředí na parametry vysokofrekvenčních propojovacích struktur. Testované vzorky byly navrženy dle teoretických předpokladů, které jsou v práci popsány v jednotlivých kapitolách. Vzorky byly vystavovány zrychlené zkoušce na konstantní vlhké teplo ve zkušební komoře po dobu, která byla stanovena normou. Měřeny a zaznamenávány byly hodnoty S – parametrů, které umožnily analýzu vzorků. Během celého průběhu testování proběhlo devět měření, ze kterých bylo možné určit, zdali má prostředí na vzorky vliv. Vyhodnocení pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v kapitole 7.2.

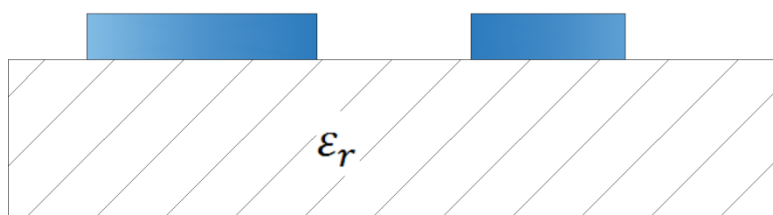
Při testování byl využit analyzátor síťové integrity SPARQ – 3002E, jehož technické parametry lze nalézt v příloze (*Příloha T*). Jelikož navržené vzorky jsou symetrické dvojbrany, jsou v přílohách diplomové práce umístěny pouze grafy pro parametry S_{11} a S_{12} . Tabulky s hodnotami všech měřených S – parametrů včetně zbývajících grafů jsou z důvodu své obsáhlosti pouze součástí přiloženého CD k této DP. Cílem práce bylo stanovit, jaký vliv má prostředí na měřené S – parametry. Ačkoliv byly vzorky vystavovány vlhkému konstantnímu teplu, nebyl z výsledků vyzorován jednoznačný vliv na měřené parametry. Grafy testovaných vzorků vykazují jisté výkyvy hodnot naměřených S – parametrů, ale neprokazuje se výrazné zhoršení těchto parametrů v čase. Tyto výkyvy mohou být způsobeny samotnou měřicí metodou, přístrojem nebo špatným zapojením při měření. U některých vzorků došlo při posledním měření ke zhoršení S - parametrů, nicméně na prokázání vlivu prostředí by musely být vzorky podrobeny dalšímu testování. Vliv prostředí mělo za následek pouze oxidaci SMA konektorů a míst, kde byly tyto konektory pájeny.

Seznam literatury

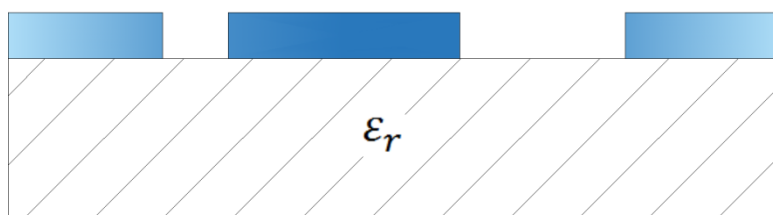
- [1] HANUS, Stanislav a Jiří SVAČINA. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika: přednášky*. Vyd. 2., dopl. Brno: Vysoké učení technické, 2002, 210 s. ISBN 80-214-2222-X.
- [2] VRBA, Jan. *Úvod do mikrovlnné techniky*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 2000, 236 s. ISBN 80-01-02112-2.
- [3] WADELL, Brian C. *Transmission line design handbook*. Boston: Artech House, 1991, xvi, 513 p. ISBN 0890064369.
- [4] HOFFMANN, Karel. *Planární mikrovlnné obvody*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 145 s. ISBN 978-80-01-03705-8.
- [5] SMA KONEKTOR. *SOSELEKTRONIC* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.soselectronic.cz/?str=371&artnum=65231&name=2j-smapcbw-ec>
- [6] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012, xvii, 732 p. ISBN 0470631554.
- [7] GUPTA, K. *Microstrip lines and slotlines*. 2nd ed. Boston: Artech House, 1996, xvi, 535 p. ISBN 0-89006-766-X.
- [8] HONG, Jia-Sheng a M LANCASTER. *Microstrip filters for RF/microwave applications*. New York: Wiley, 2001, xii, 471 p. ISBN 0-471-38877-7.
- [9] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 123 s. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [10] S - PARAMETERS. *Microwaves101* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters>
- [11] ČSN EN 60068 – 2 – 78 ed. 2. *Zkoušení vlivu prostředí – Část 2 – 78: Zkoušky – Zkouška Cab: Vlhké teplo konstantní*
- [12] ČSN EN 60068 – 1 ed. 2. *Zkoušení vlivu prostředí – Část 1: Obecně a návod*
- [13] SPARQ – 3002E. *Základní specifikace*. [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://teledynelecroy.com/options/productdetails.aspx?modelid=6730&categoryid=30&groupid=150#spec>

Přílohy

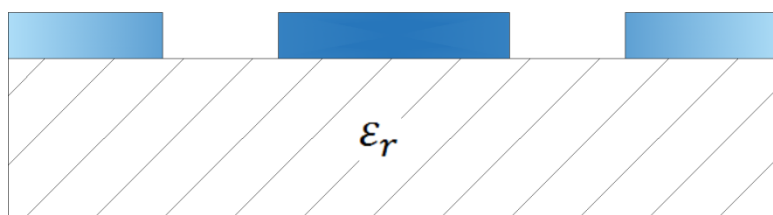
Příloha A – Provedení páskových vedení pro HMIO



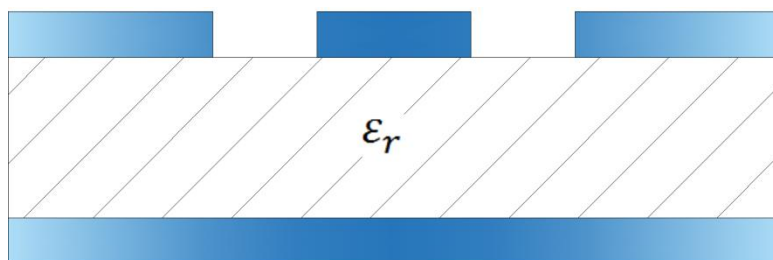
Obrázek 1 Koplanární vedení – nesymetrické



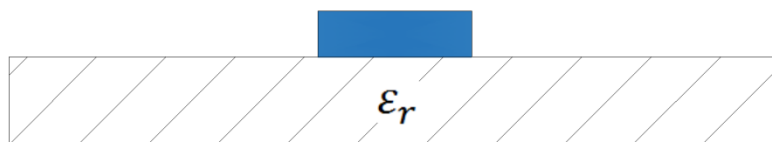
Obrázek 2 Koplanární vlnovod - nesymetrický



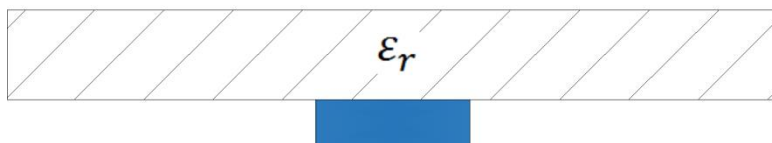
Obrázek 3 Koplanární vlnovod – symetrický



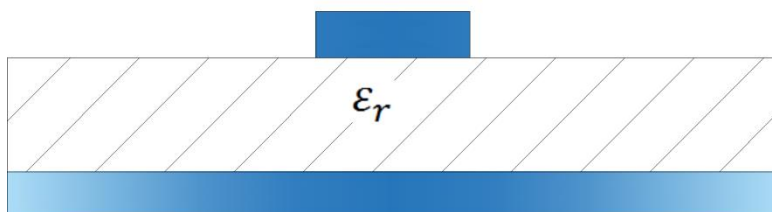
Obrázek 4 Koplanární vlnovod s pokoveným substrátem



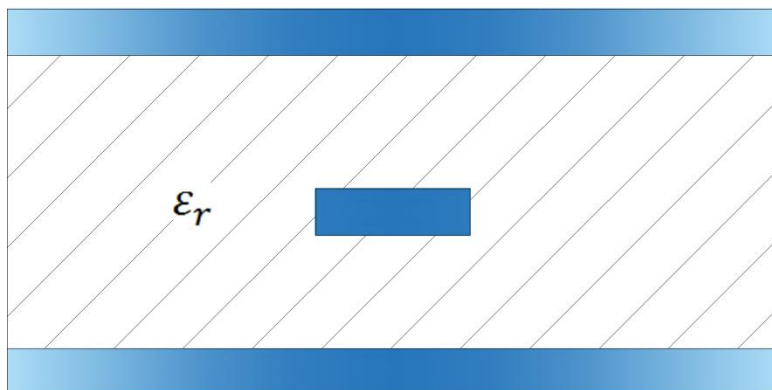
Obrázek 5 Mikropáskové vedení se zavěšeným substrátem



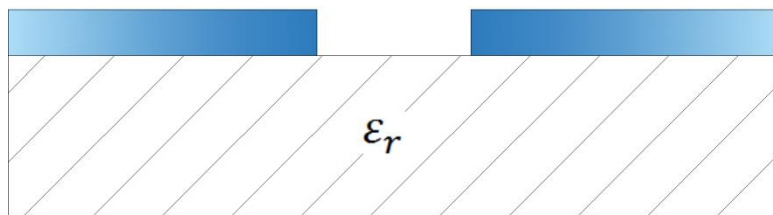
Obrázek 6 Inverzní nesymetrické mikropáskové vedení



Obrázek 7 Stíněné nesymetrické mikropáskové vedení



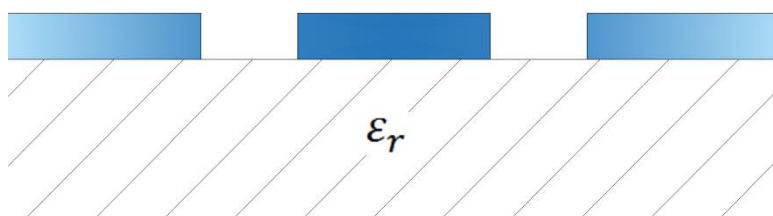
Obrázek 8 Symetrické mikropáskové vedení



Obrázek 9 Štěrbínové vedení



Obrázek 10 Vázané mikropáskové vedení



Obrázek 11 Vázaná šterbinová vedení



Obrázek 12 Vázaný koplanární vlnovod

Příloha B – Skript pro výpočet parametrů mikropáskové vedení

```

%Zadávaní parametru
R = input('Zadat L pro nízku nebo H pro vysokou impedanci ', 's');
E = input('Zadat hodnotu relativní permitivity substrátu: ');
Z = input('Vlnová impedance: ');
h = input('Výška substrátu: ');

%Výpočet
if(R == 'H')
A = (Z/60)*((E+1)/2)^0.5 + ((E-1)/(E+1))*(0.23 + 0.11/E);
X = (8*exp(A)/(exp(2*A)-2));
end
if(R == 'L')
B = (377*pi)./(2*Z*((E)^0.5));
X = ((2/pi)*((B-1)-log(2*B-1)) + ((E-1)/(2*E))*(log(B-1) + 0.39 -
0.61/E));
end

W = X*h;

%Zobrazení výsledku
display('Požadovaná šířka vodivého pásku v mm je: ');
display(W);

```

Příloha C – Skript pro výpočet parametrů koplanárního vedení

```

E = 4.2; % Relativní permitivita substrátu
h = 1; % Výška substrátu [mm]
a = 0.1; % Mezera mezi vodivými pásky [mm]
w = 9; % Šířka vodivého pásku [mm]

%Výpočet
b = a + 2*w;
k = a/b;
kc = sqrt(1-(k*k));
k1 = ((sinh((pi*a)/(4*h)))/(sinh((pi*b)/(4*h))));
k1c = sqrt(1-(k1*k1));

K1= ellipke(k);
K2= ellipke(kc);
K3= ellipke(k1);
K4= ellipke(k1c);

Eef=1+((E-1)/2)*(K2/K1)*(K3/K4);

Z0=((120*pi)/(sqrt(Eef)))*(K1/K2);

display(Z0);
display(k);
display(kc);
display(k1);
display(k1c);

```

Příloha D – Skript pro výpočet indukčností a kapacit prvků (Filtr)

```
f = input('Zadej frekvenci: ');
c = 1; %Normovaný mezní kmitočet
Z0 = 50; %Char. vln. impedance
g0 = 1; %Parametr z [8]
g6 = 1; %Parametr z [8]
g1 = 1.1468; %Parametr z [8]
g5 = 1.1468; %Parametr z [8]
g2 = 1.3712; %Parametr z [8]
g4 = 1.3712; %Parametr z [8]
g3 = 1.9750; %Parametr z [8]
```

```
%Výpočet L1, L5, L3
```

```
L1L5 = (Z0/g0)*(c/(2*pi*f))*g1;
L3 = (Z0/g0)*(c/(2*pi*f))*g3;
```

```
%Výpočet C2, C4
```

```
C2C4 = (g0/Z0)*(c/(2*pi*f))*g2;
```

```
%Výpočet přívodu
```

```
L0L6=(g0/Z0)*(c/(2*pi*f))*g0;
```

```
%Zobrazení výsledků
```

```
display('L1 a L5: ');
display(L1L5);
display('L3: ');
display(L3);
display('C2 a C4: ');
display(C2C4);
display('L0 a L6: ');
display(L0L6);
```

Příloha E – Skript pro výpočet efekt. permitivity (Filtr)

```
%Zadávaní parametru
```

```
w = input('Šířka vedení: '); %Šířka mikropásku
f = input('Pracovní frekvence: '); %Mezní frekvence
E = 4.2; %Relativní permitivita
h = 0.001; %Výška substrátu
u0 = 1.256*(10^(-6)); %Permeabilita vakua
E0 = 8.854*(10^(-12)); %Permitivita vakua
```

```
%Vypočet
```

```
if(w/h >= 1)
Eef=((E+1)/2)+((E-1)/2)*((1/(sqrt(1+(12*(h/w))))));
end
if(w/h <= 1)
Eef=((E+1)/2)+((E-1)/2)*(((1/(sqrt(1+(12*(h/w))))))+0.04*(1-(w/h))^2);
end
```

```
c = 1/sqrt((u0*E0)); %Rychlost světla ve vakuu
d = c/(f*sqrt(Eef)); %Vlnová délka
%Zobrazení výsledků
display('Efektivní permitivita: ');
display(Eef);
display('Vlnová délka: ');
display(d);
```

Příloha F – Skript pro délky mikropáskových vedení (Filtr)

```
%Prototypové hodnoty dolní propusti
L1L5 = 1.1468;           %Parametr z [8]
C2C4 = 1.3712;           %Parametr z [8]
L3 = 1.9750;            %Parametr z [8]
L0L6 = 1;                %Parametr z [8]

%Ostatní hodnoty
Z0 = 50;                 %Char. vln. impedance
Z0L = 93;                %Impedance ind. úseku
Z0C = 24;                %Impedance kap. úseku
d1d3d5 = 35;             %Vlnová délka L1L3L5 úseku pro 5GHz
d2d4 = 32;               %Vlnová délka C2C4 úseku pro 5GHz
d0d6 = 34;               %Vlnová délka pro přívodní vedení

%Výpočet délky přívodního vedení
l0l6 = ((L0L6*Z0)/Z0)/((2*pi)/d0d6);

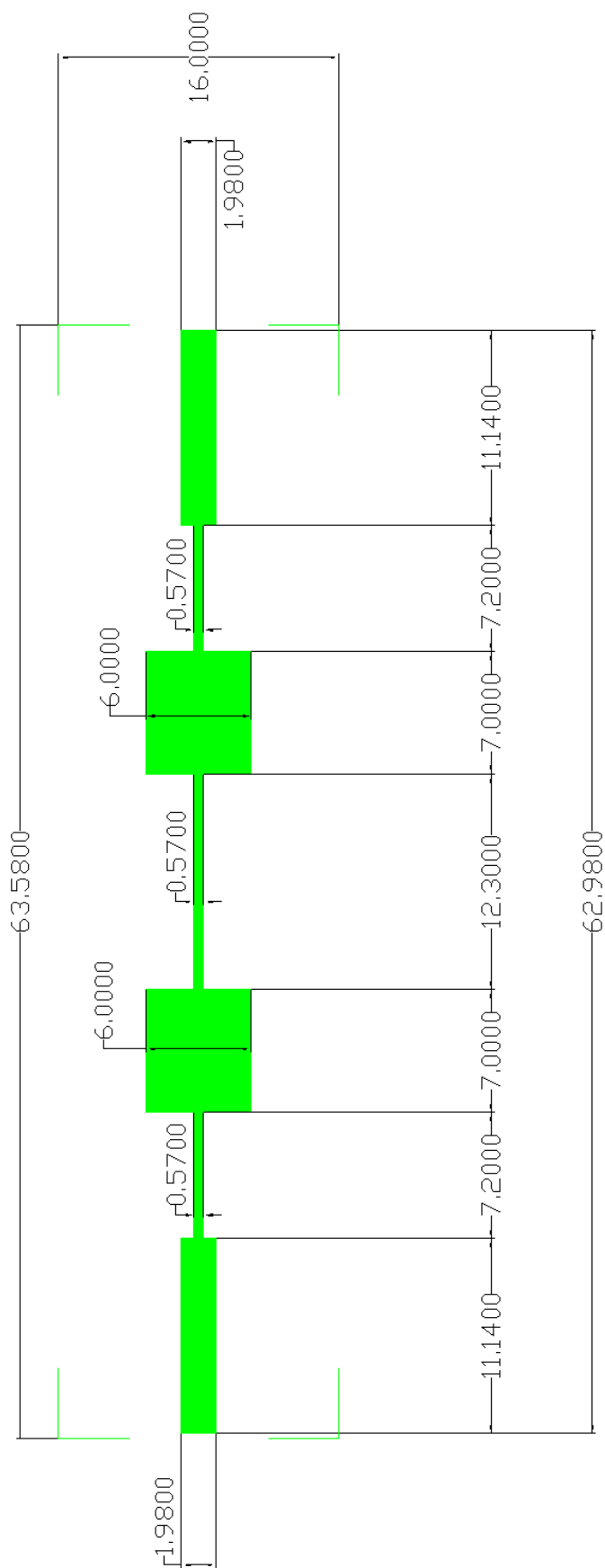
%Výpočet délky L1L5
l1l5 = (((L1L5*Z0)/Z0L)*d1d3d5)/(2*pi);

%Výpočet délky L3
l3 = (((L3*Z0)/Z0L)*d1d3d5)/(2*pi);

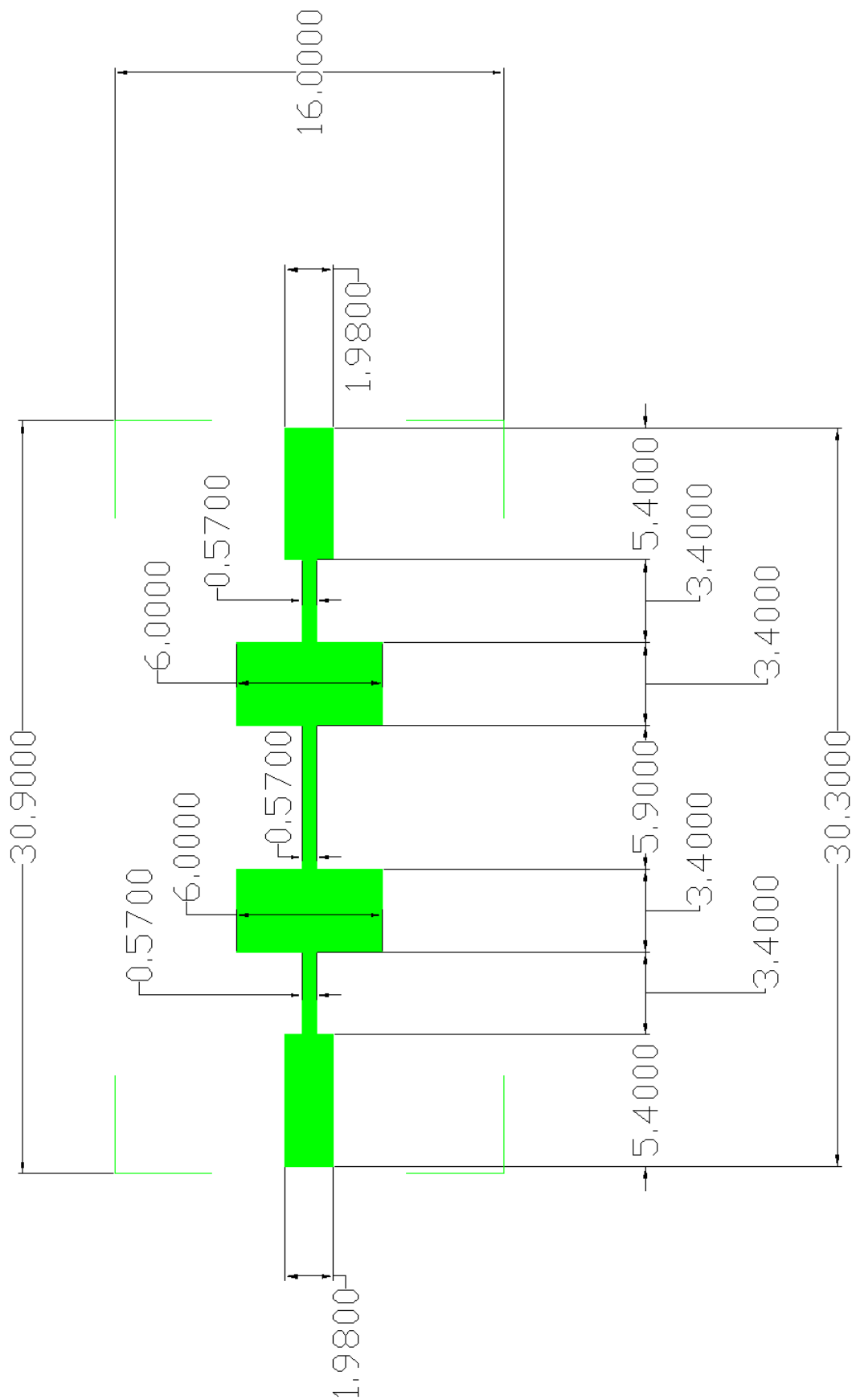
%Výpočet délky C2C4
l2l4 = ((C2C4*Z0C)/Z0)/((2*pi)/d2d4);

%Zobrazení výsledků
display(l1l5);
display(l3);
display(l2l4);
display(l0l6);
```

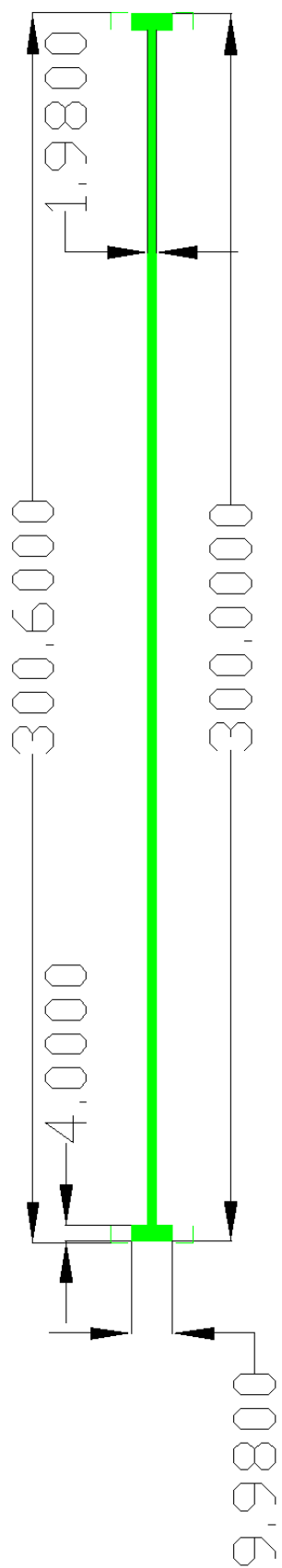
Příloha G – Navržené vzorky – okótované [mm]



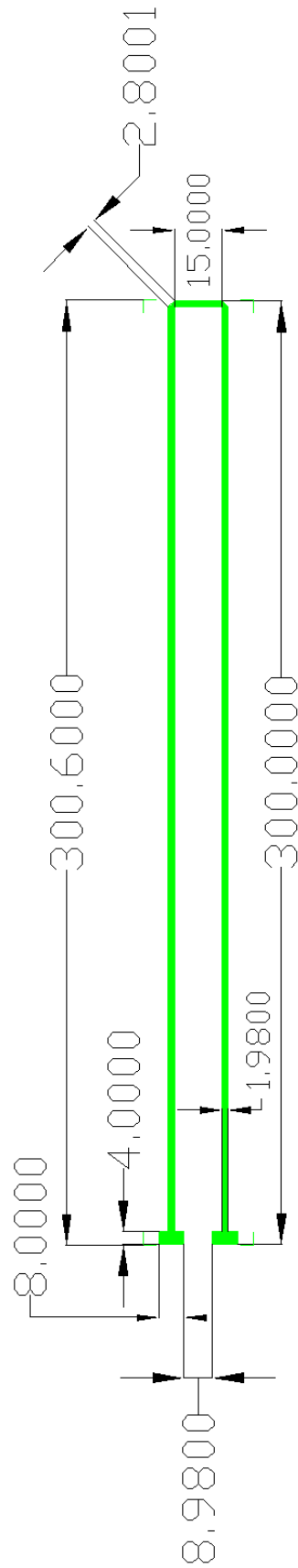
Obrázek 13 Filtr - dolní propust 2,4 GHz



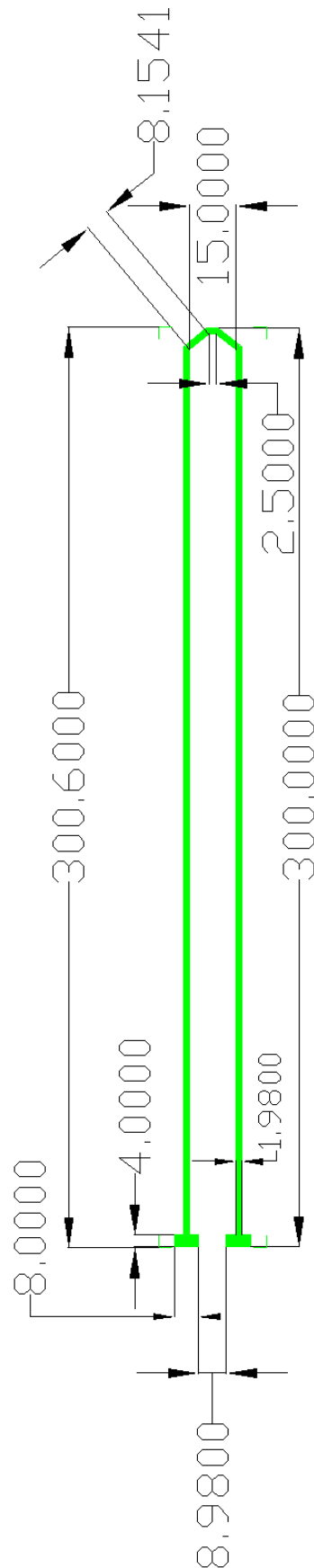
Obrázek 14 Filtr - dolní propust 5,0 GHz



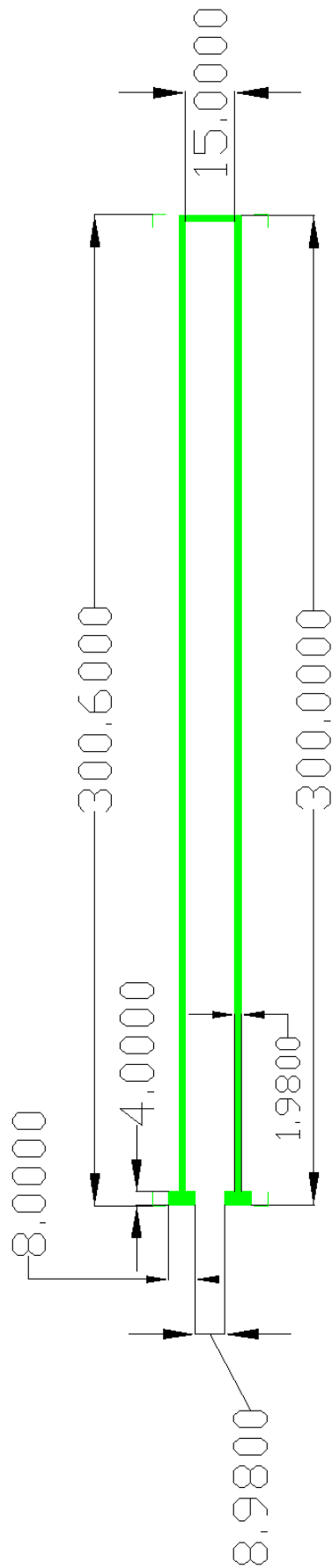
Obrázek 15 Mikropáskové dlouhé vedení



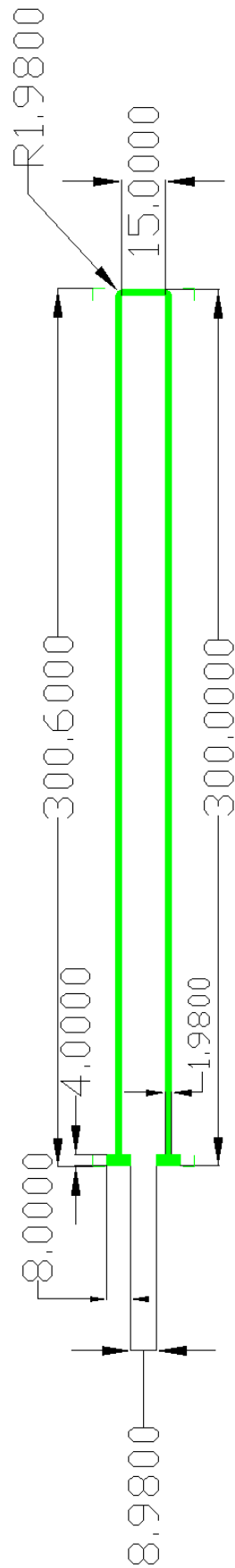
Obrázek 16 Mikropáskové vedení - zkosené hrany



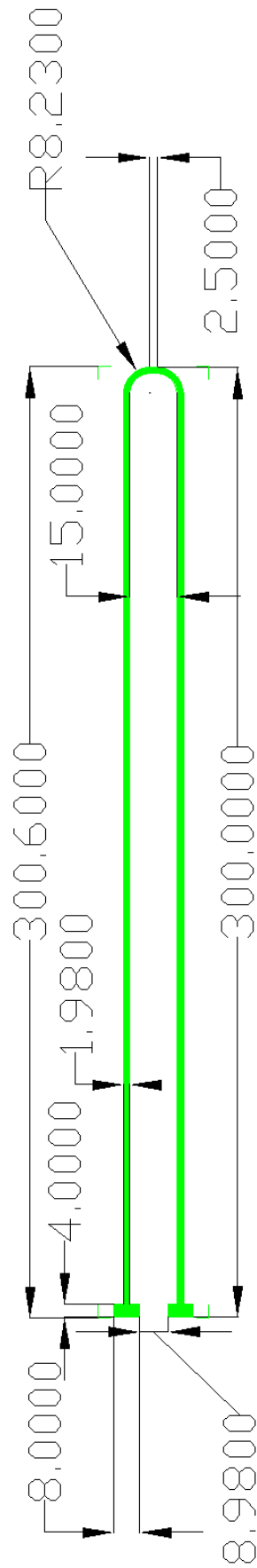
Obrázek 17 Mikropáskové vedení - větší zkosení hran



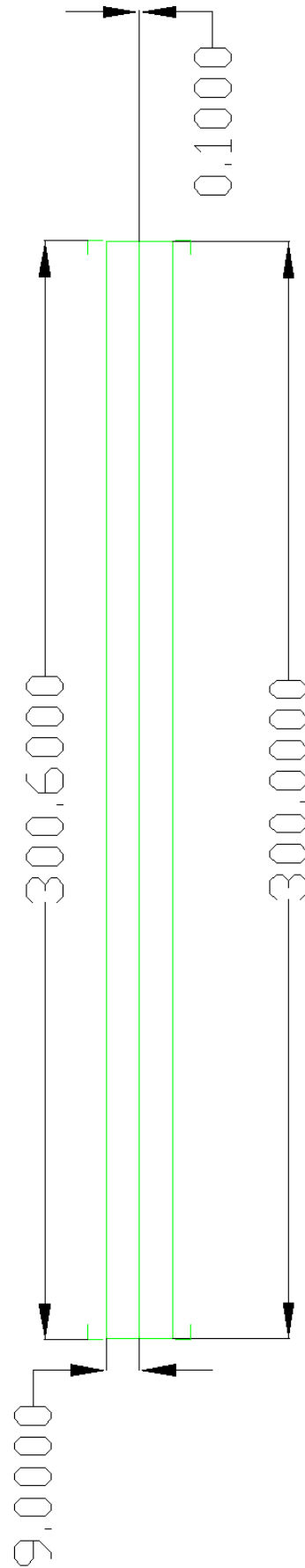
Obrázek 18 Mikropáskové vedení - ostré hrany



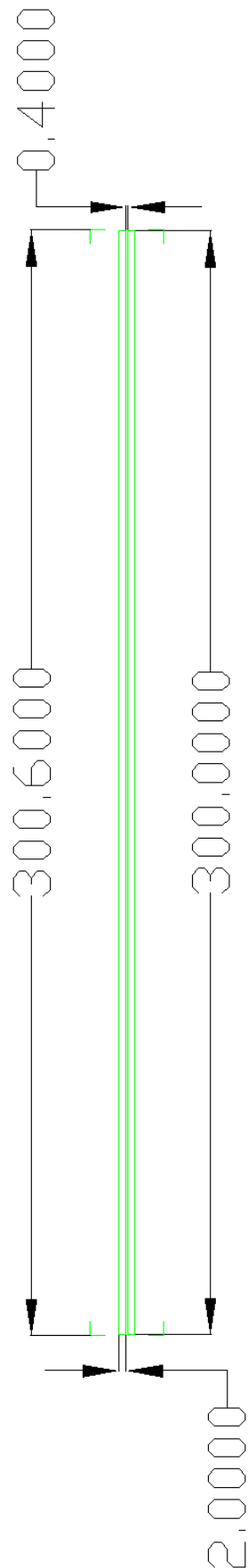
Obrázek 19 - Mikropáskové vedení - zaoblené hrany



Obrázek 20 Mikropáskové vedení - větší zaoblení hran

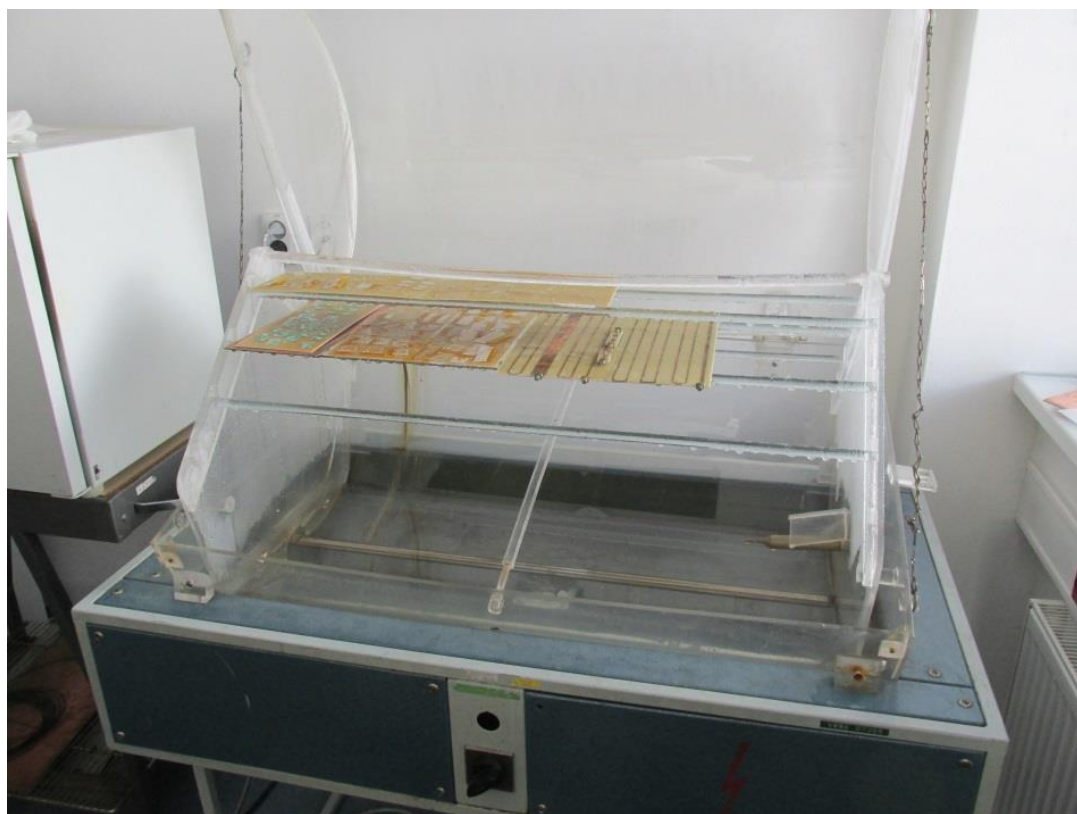


Obrázek 21 Koplanární vedení – 67 Ω

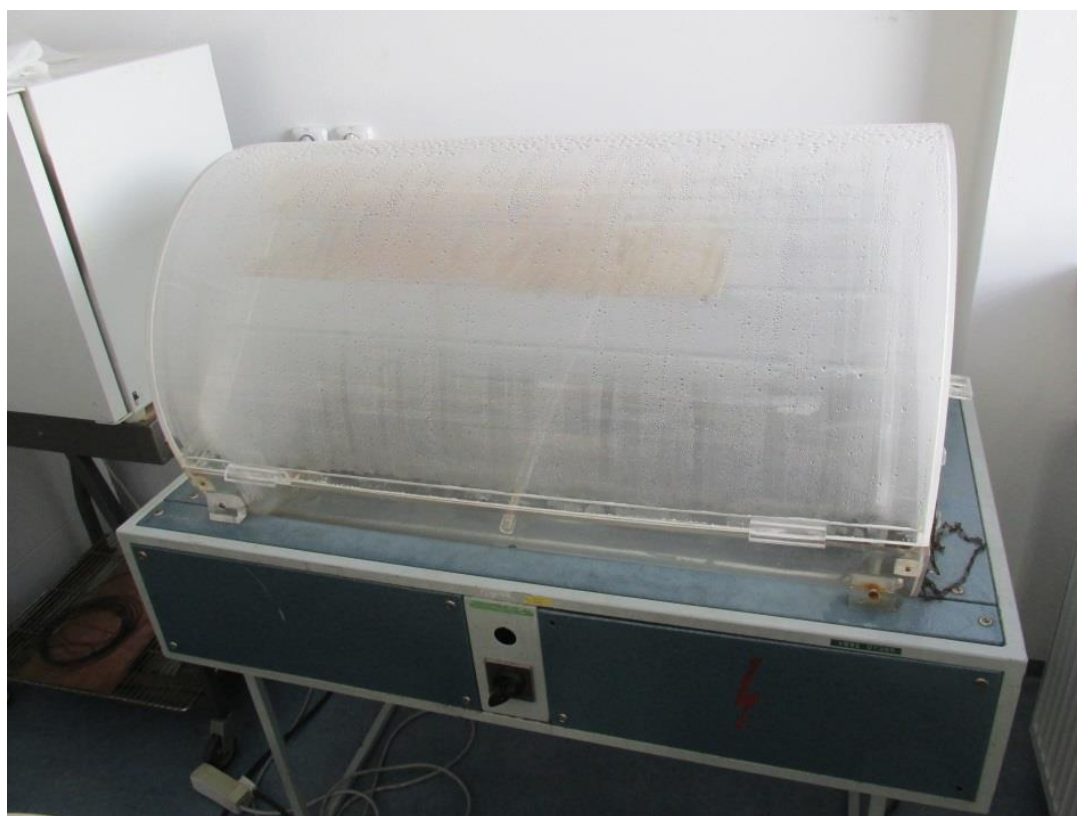


Obrázek 22 Koplanární vedení – 100 Ω

Příloha H – Zkušební komora konstantního vlhkého tepla

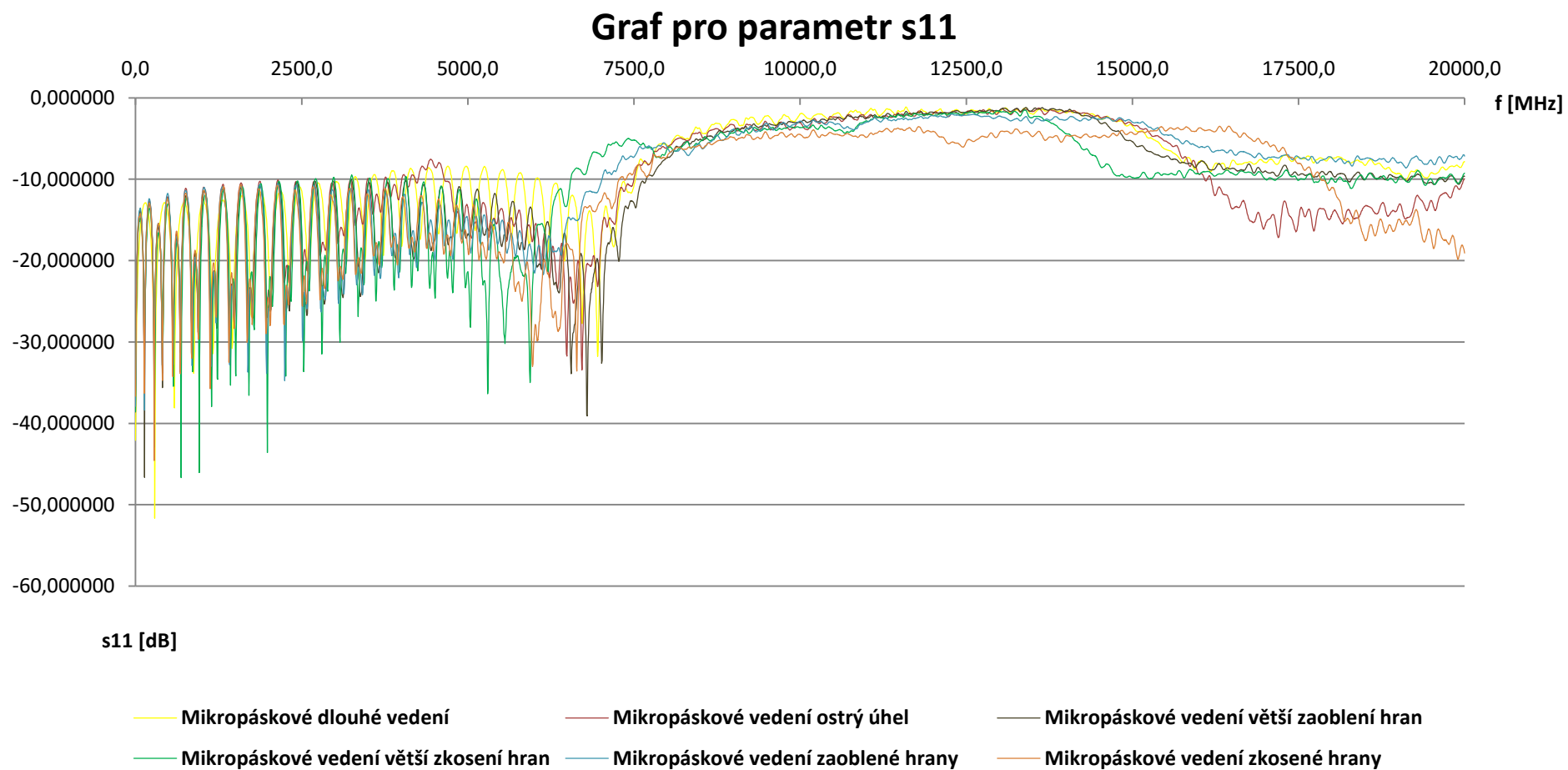


Obrázek 23 Zkušební komora – umístění vzorků

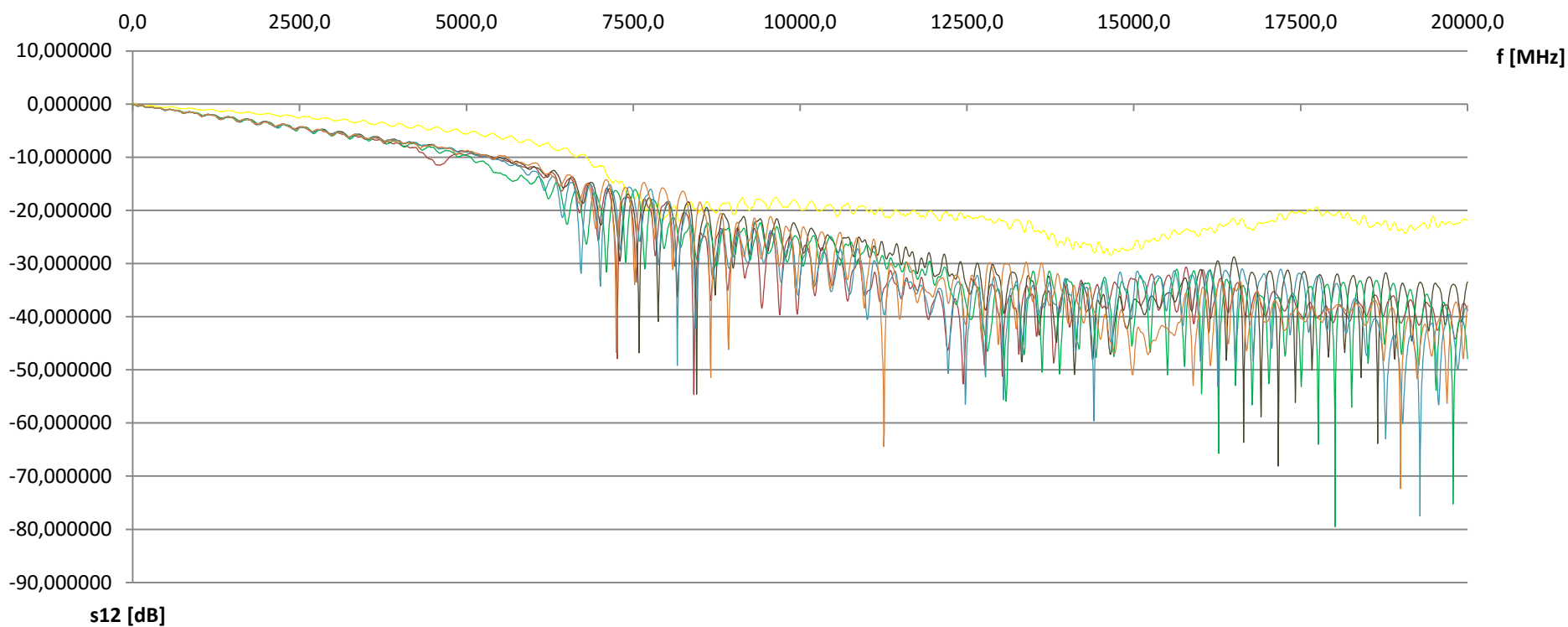


Obrázek 24 Zkušební komora

Příloha I – Grafy - Referenční hodnoty – vliv zahnutí mikropáskového vedení na S - parametry

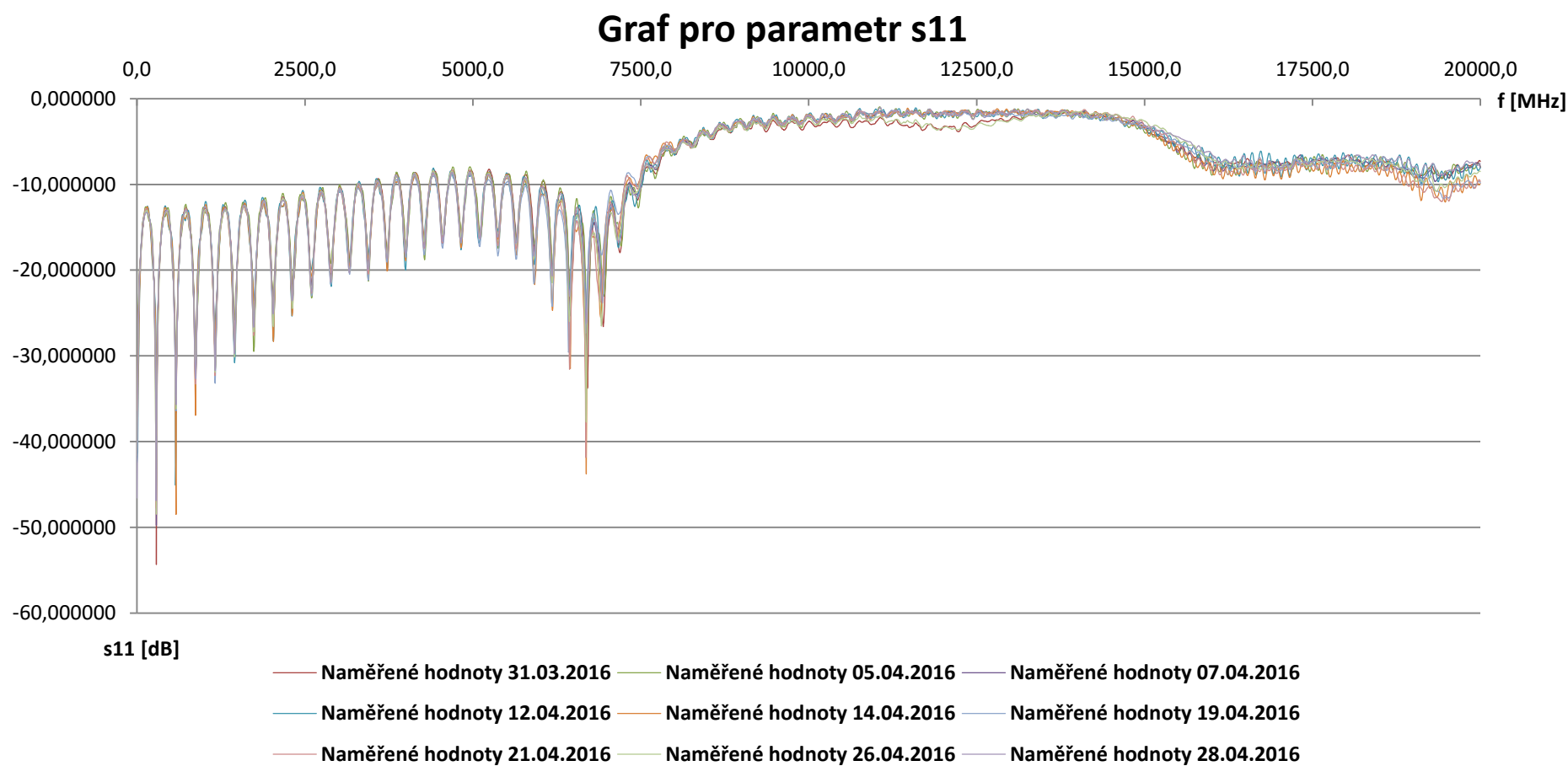


Graf pro parametr s12

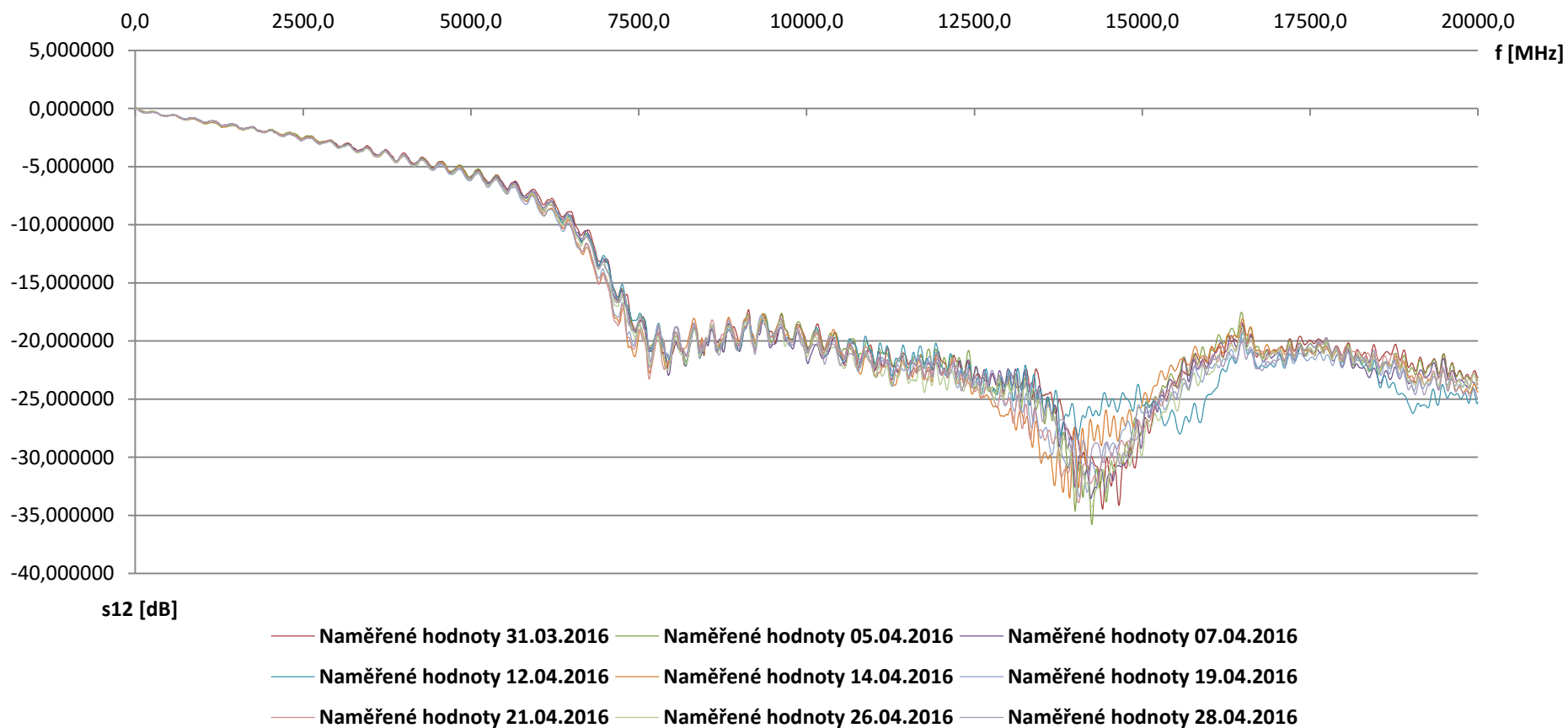


- Mikropáskové dlouhé vedení
- Mikropáskové vedení ostrý úhel
- Mikropáskové vedení větší zaoblení hran
- Mikropáskové vedení větší zkosení hran
- Mikropáskové vedení zaoblené hrany
- Mikropáskové vedení zkosené hrany

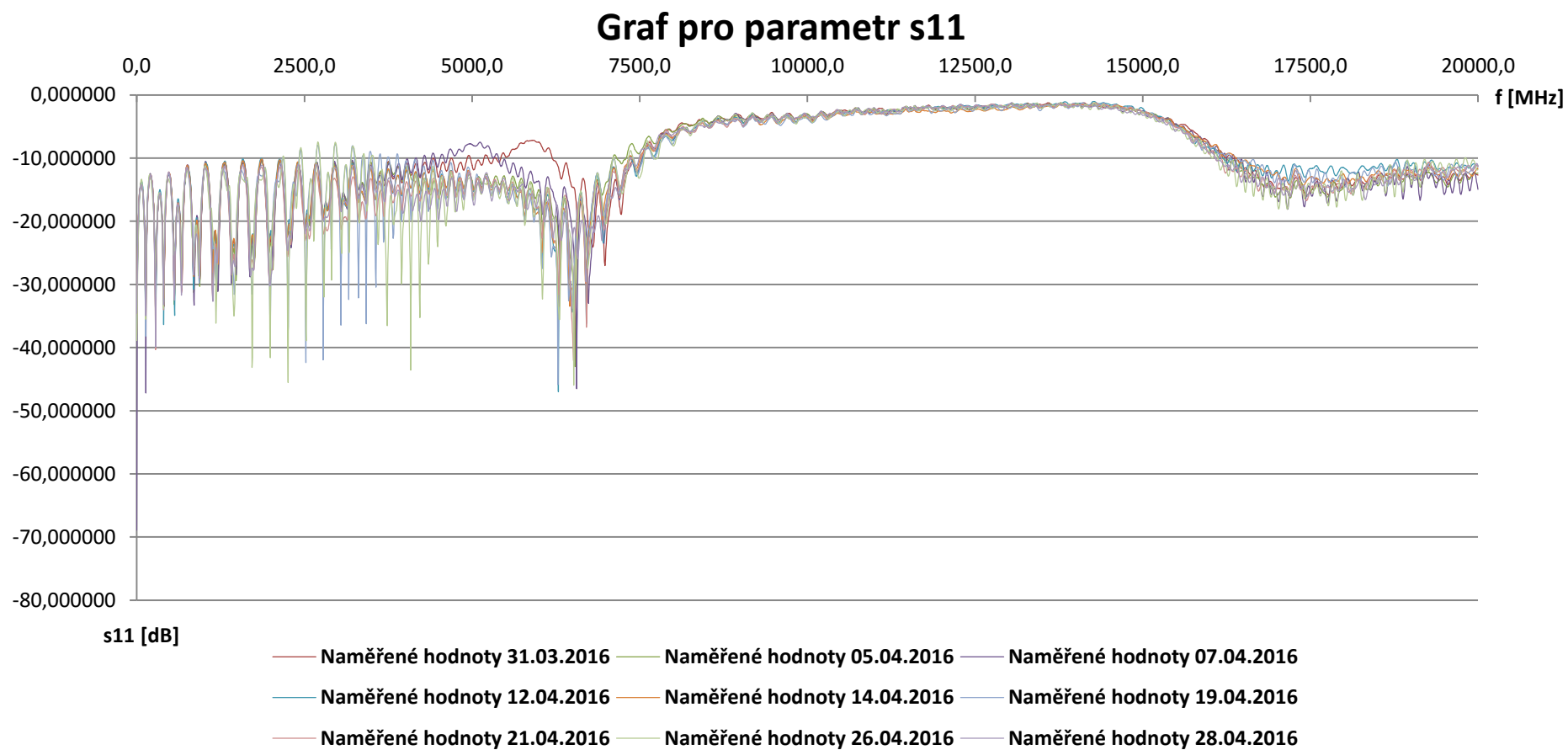
Příloha J – Grafy – Mikropáskové dlouhé vedení – vliv prostředí na S - parametry



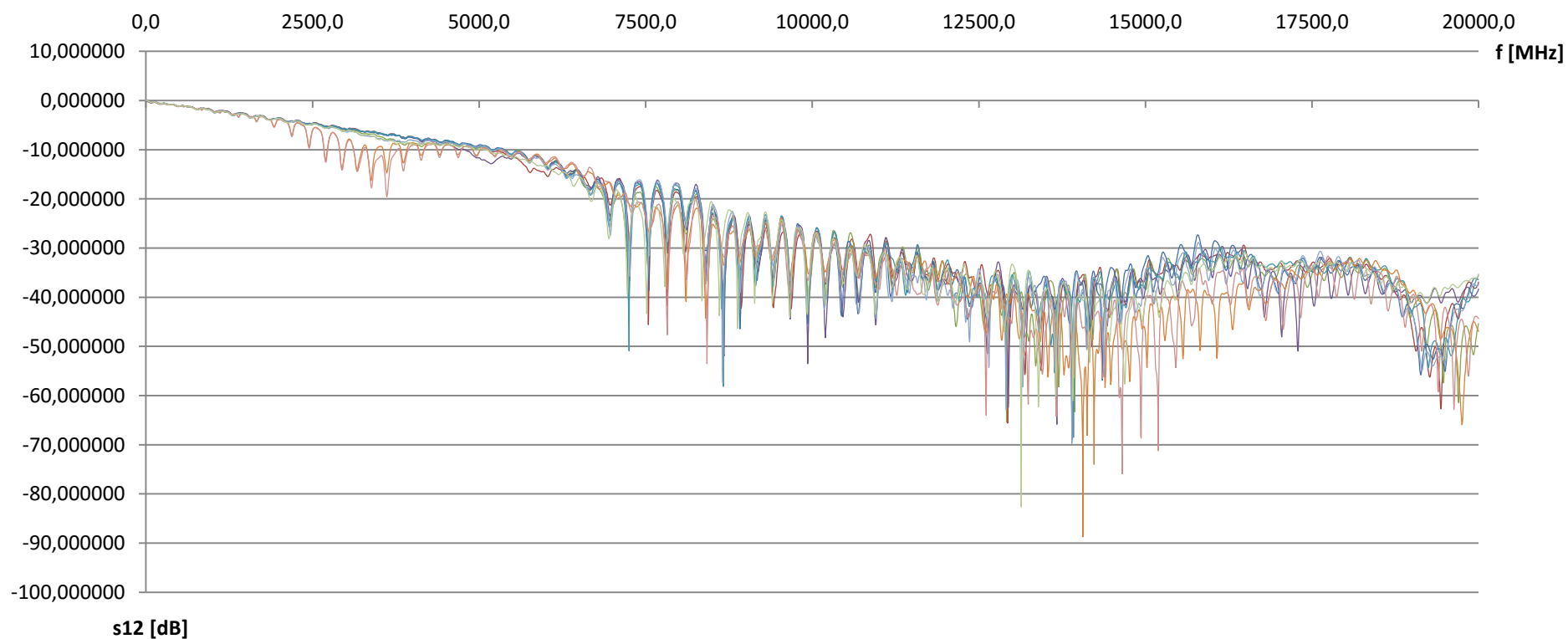
Graf pro parametr s12



Příloha K – Grafy – Mikropáskové vedení – ostré hrany – vliv prostředí na S – parametry

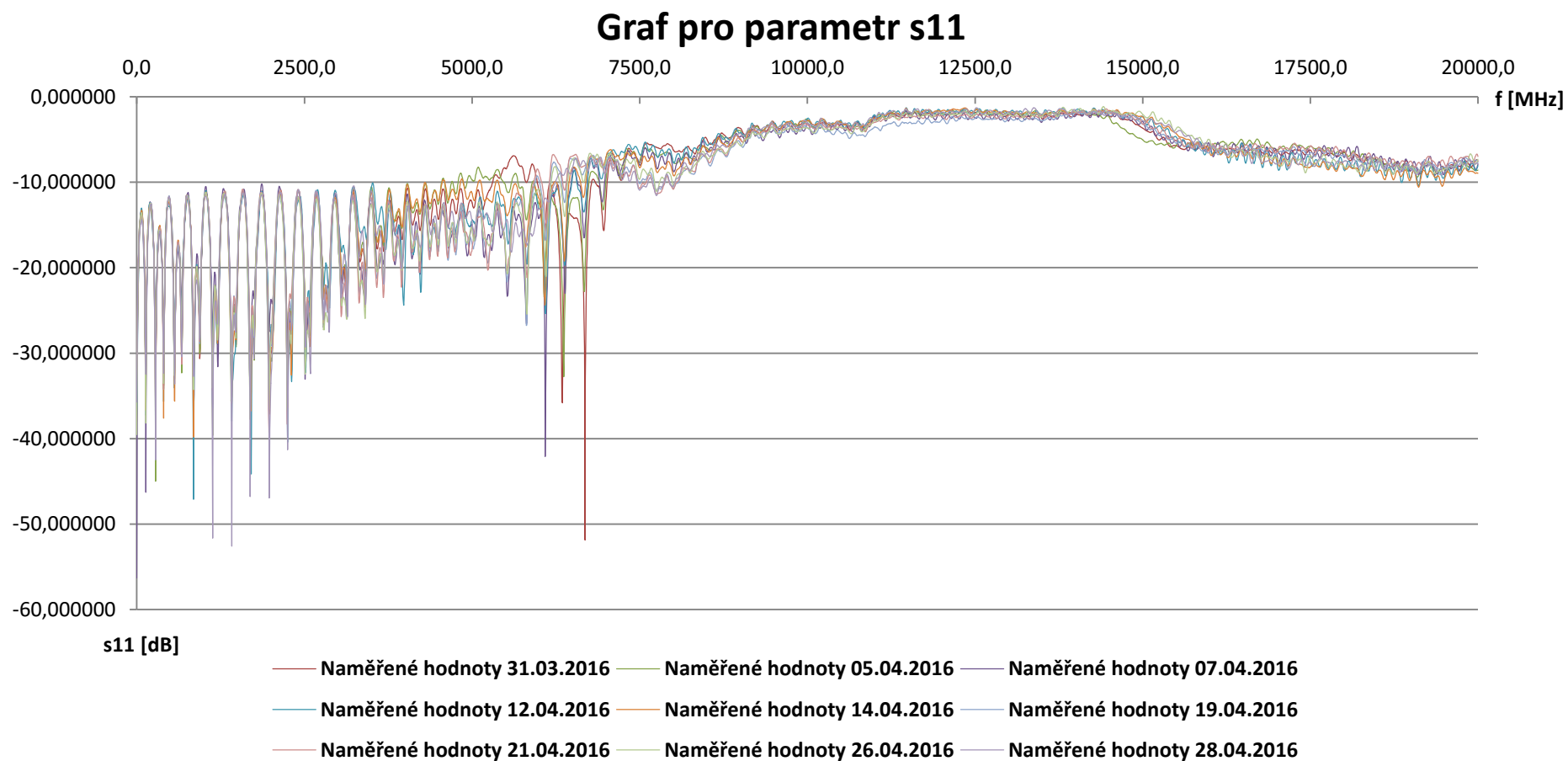


Graf pro parametr s12

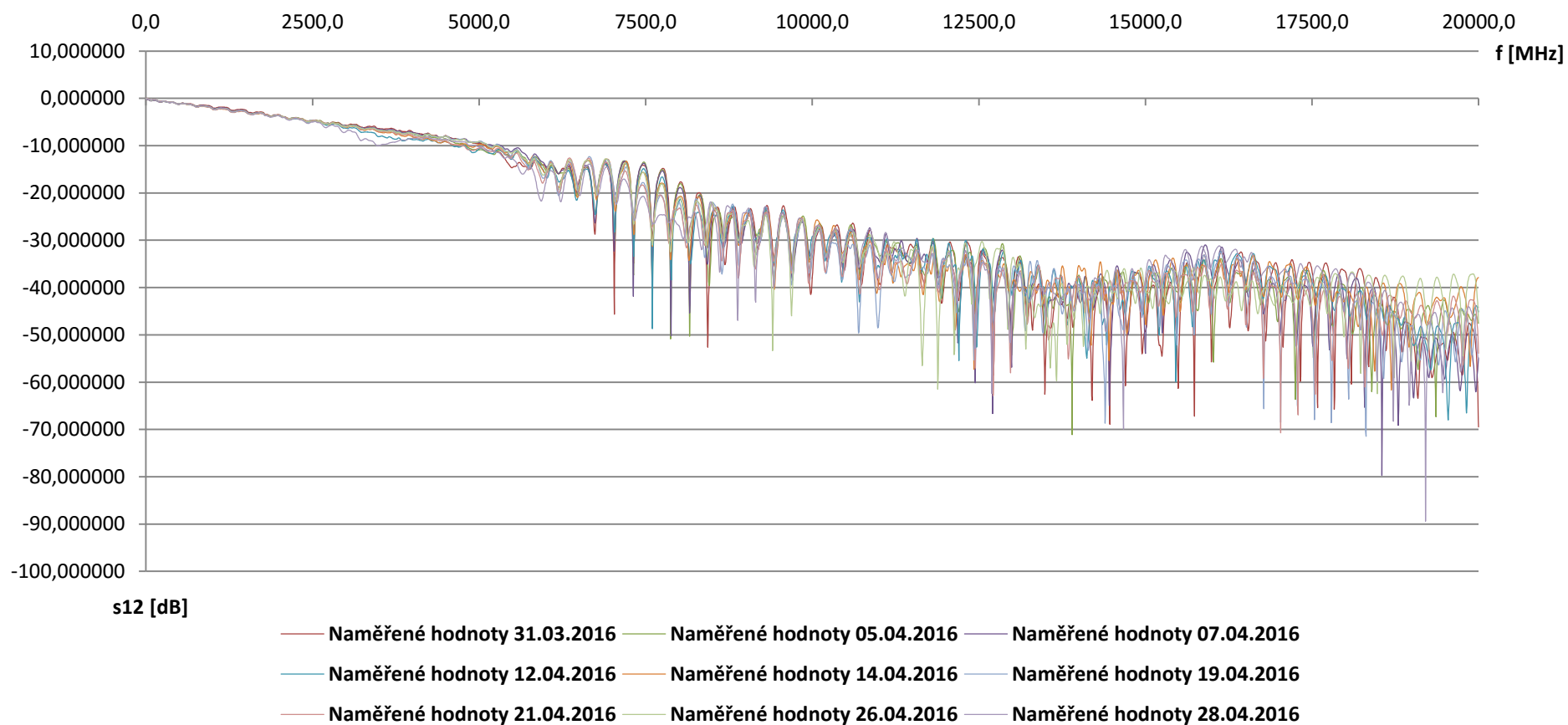


- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

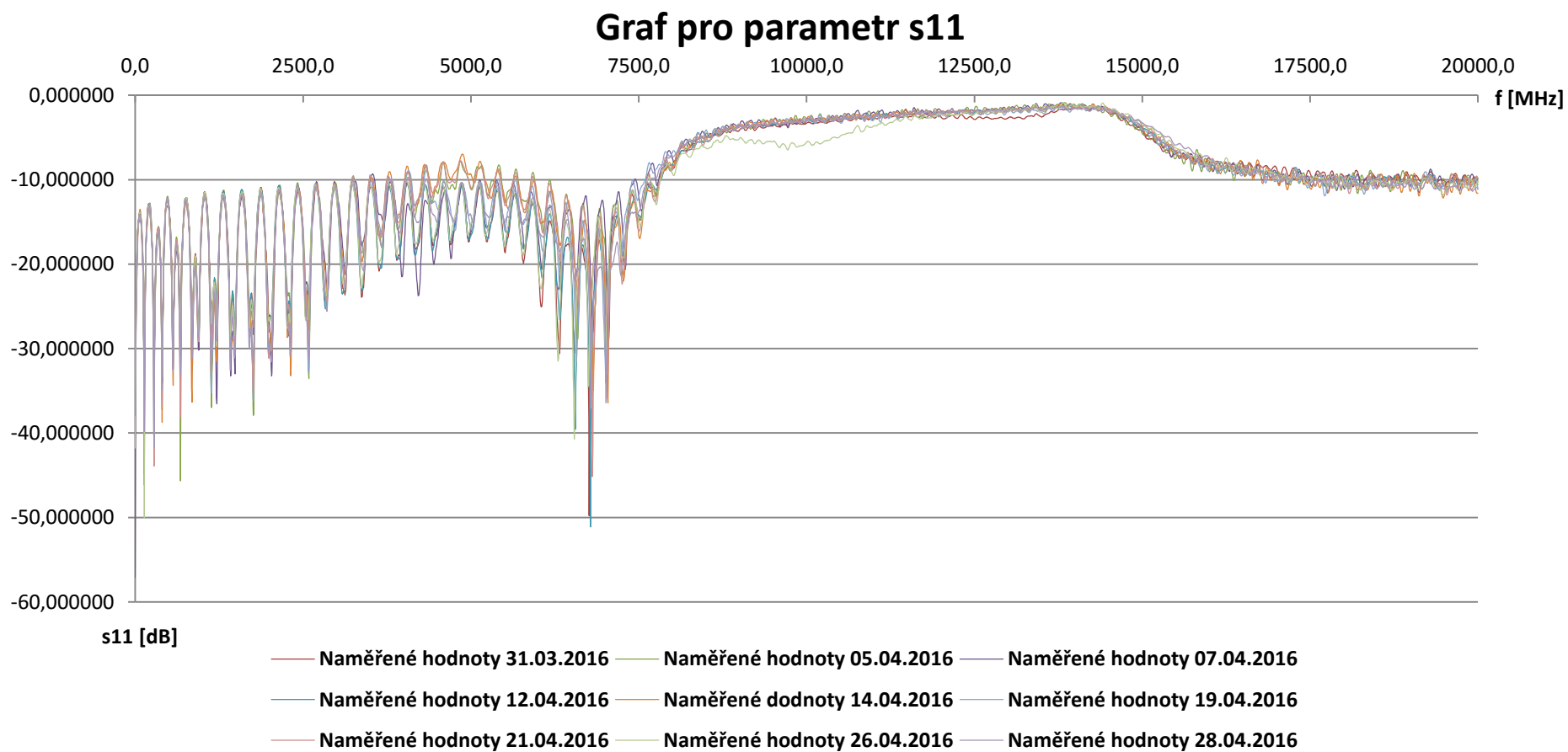
Příloha L – Grafy – Mikropáskové vedení – zaoblené hrany – vliv prostředí na S – parametry



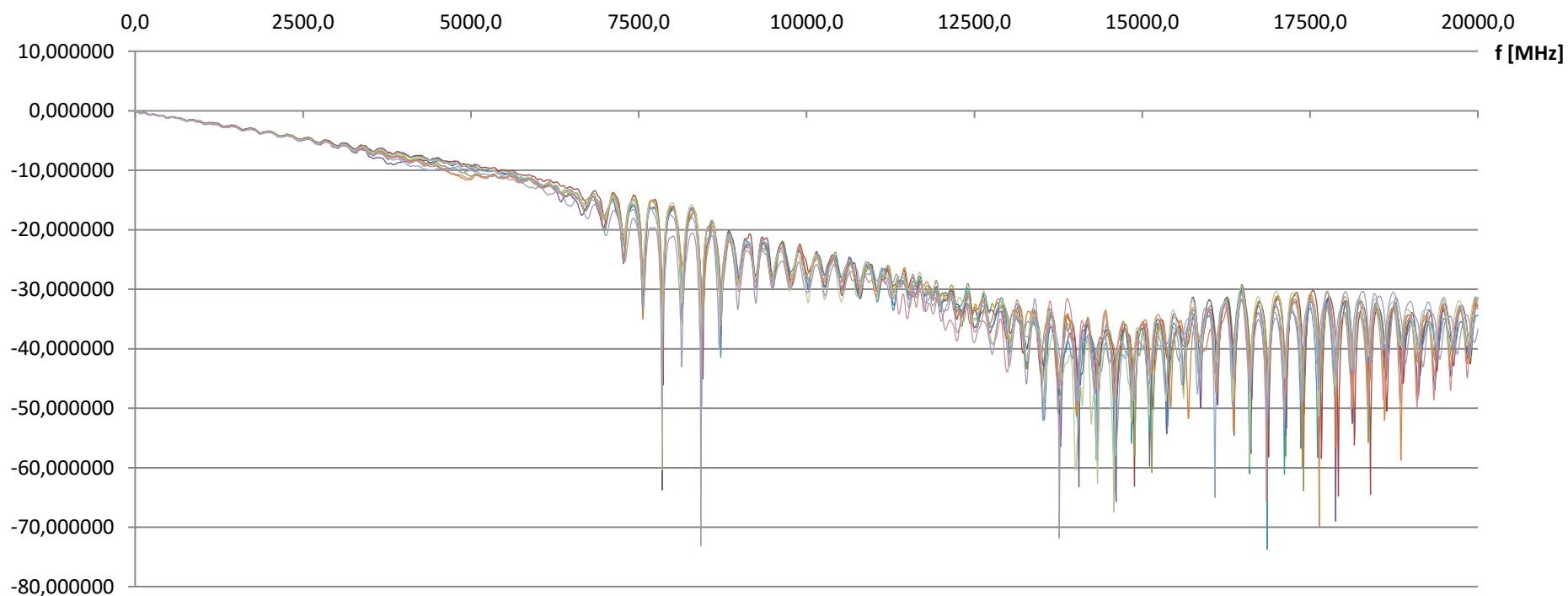
Graf pro parametr s12



Příloha M – Grafy – Mikropáskové vedení – větší zaoblení hran – vliv prostředí na S – parametry



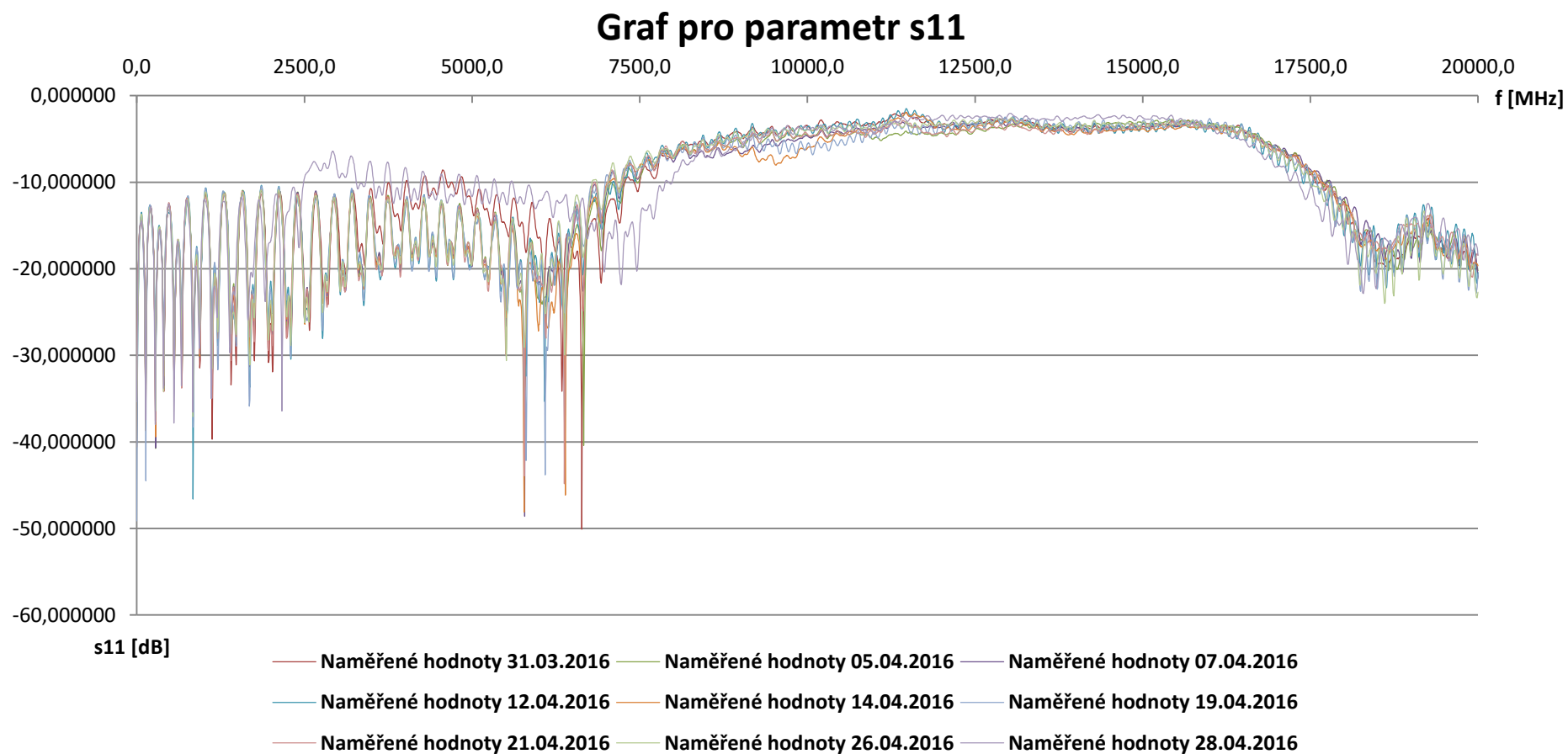
Graf pro parametr s12



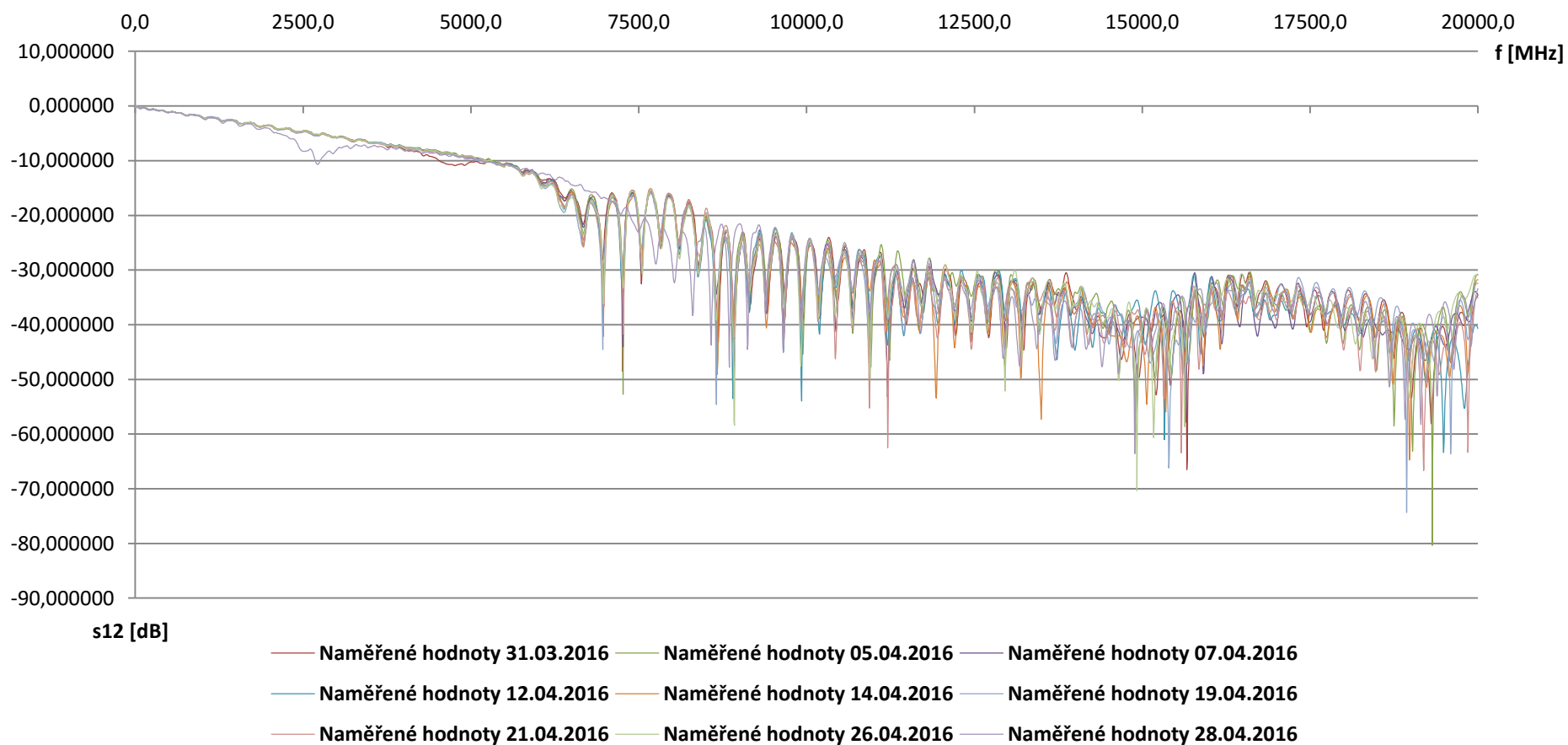
s12 [dB]

- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

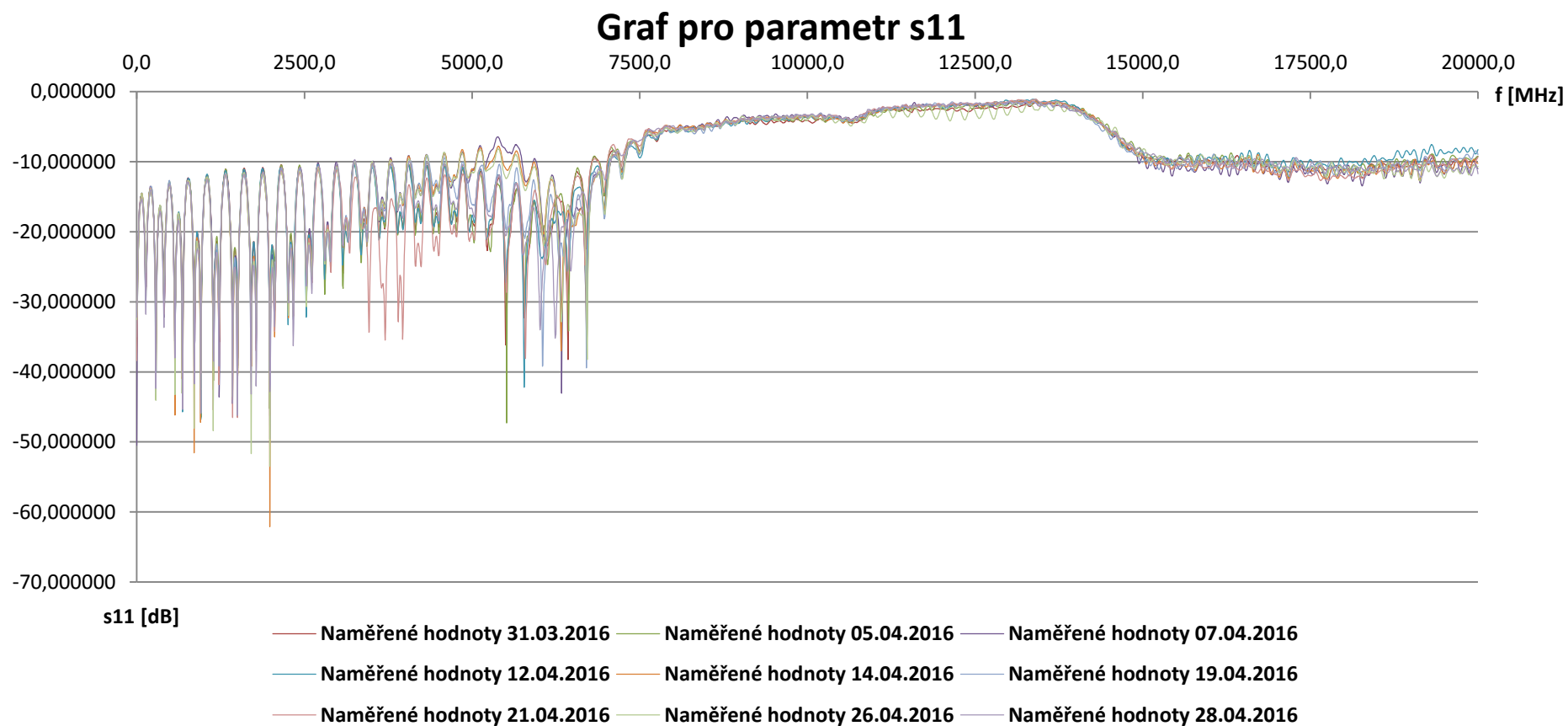
Příloha N – Grafy – Mikropáskové vedení – zkosené hrany – vliv prostředí na S – parametry



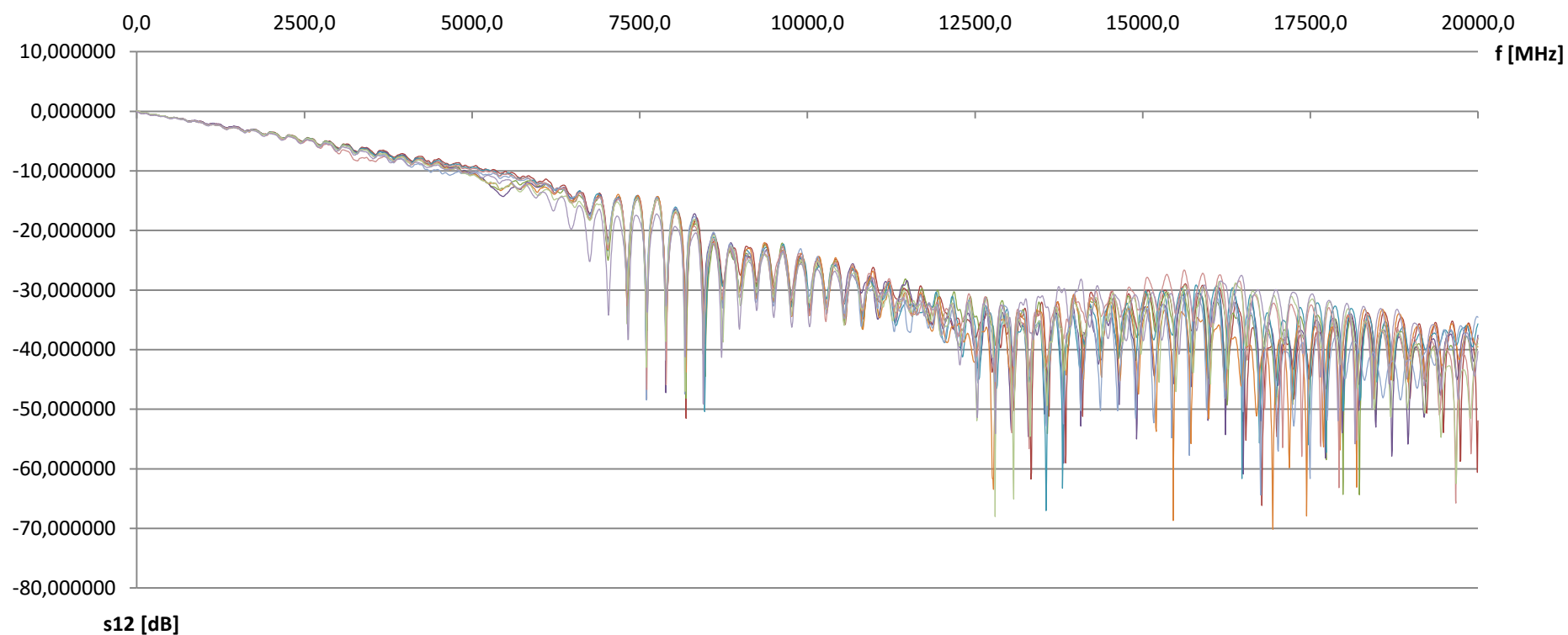
Graf pro parametr s12



Příloha O – Grafy – Mikropáskové vedení – větší zkosení hran – vliv prostředí na S – parametry

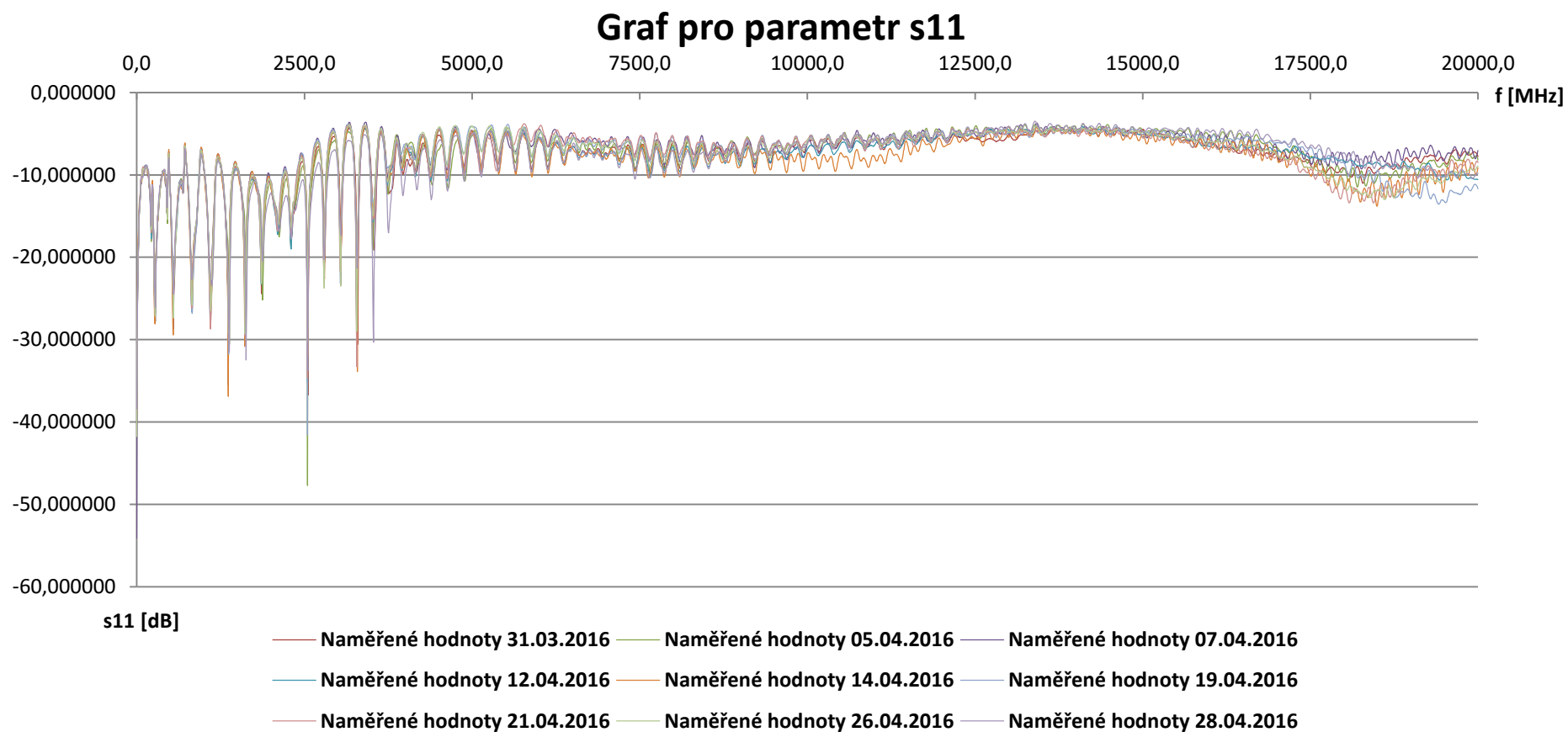


Graf pro parametr s12

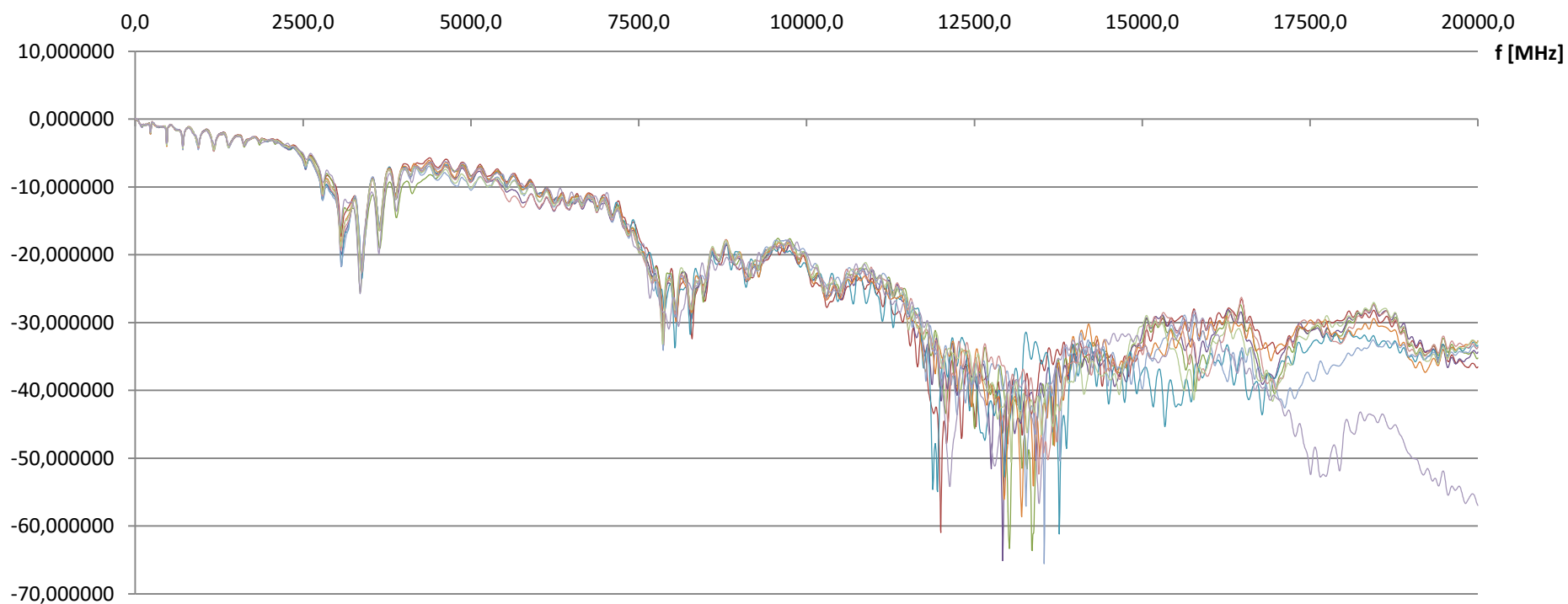


- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

Příloha P – Grafy – Koplanární vedení – 67 Ω – vliv prostředí na S – parametry



Graf pro parametr s12

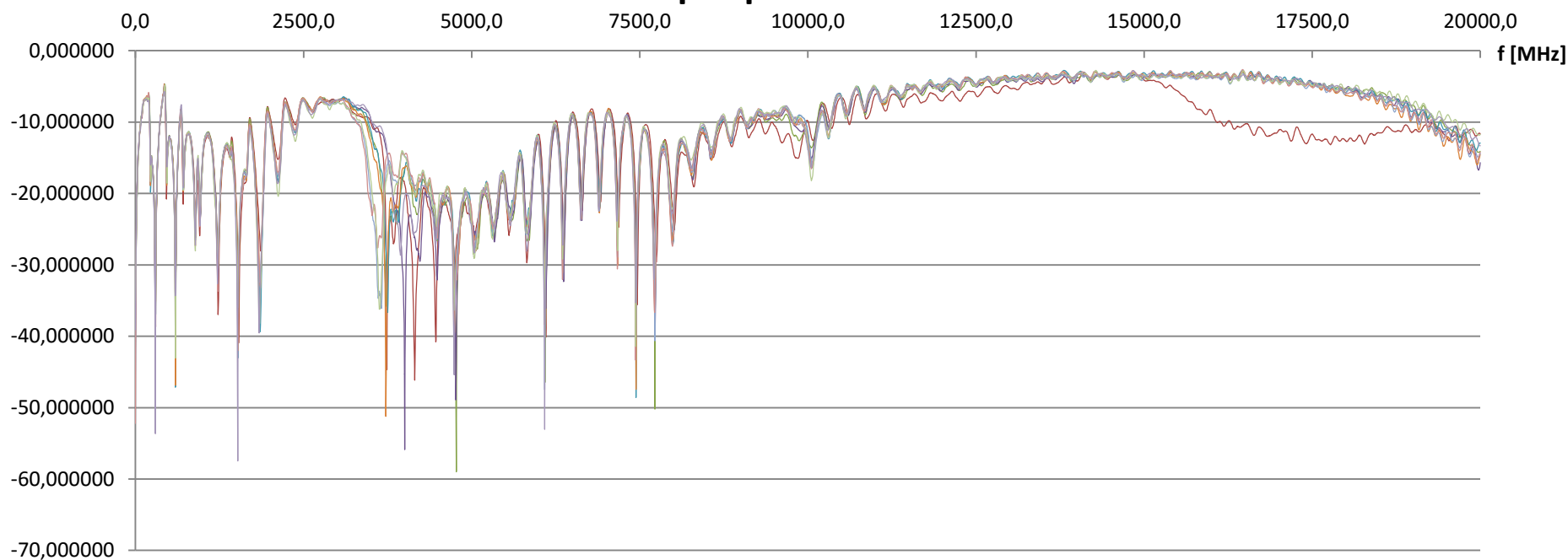


s12 [dB]

- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

Příloha Q – Grafy – Koplanární vedení – 100 Ω – vliv prostředí na S – parametry

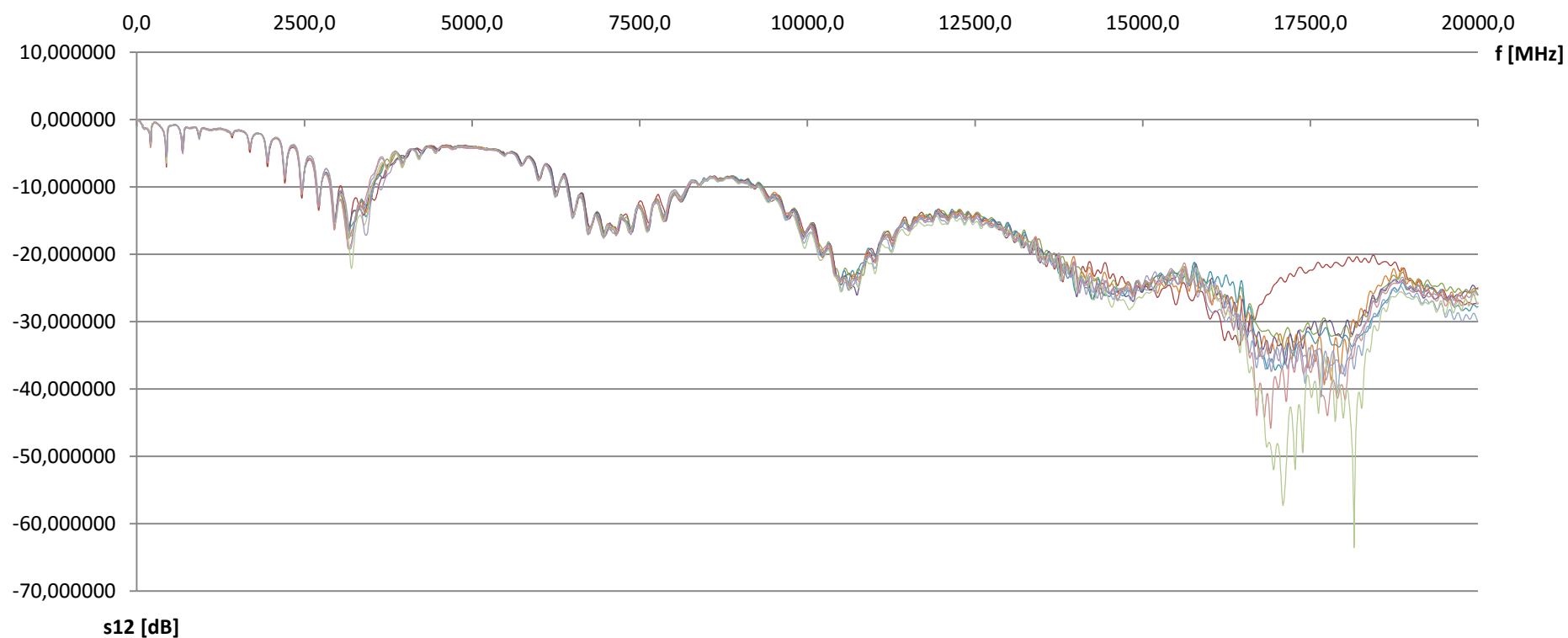
Graf pro parametr s11



s11 [dB]

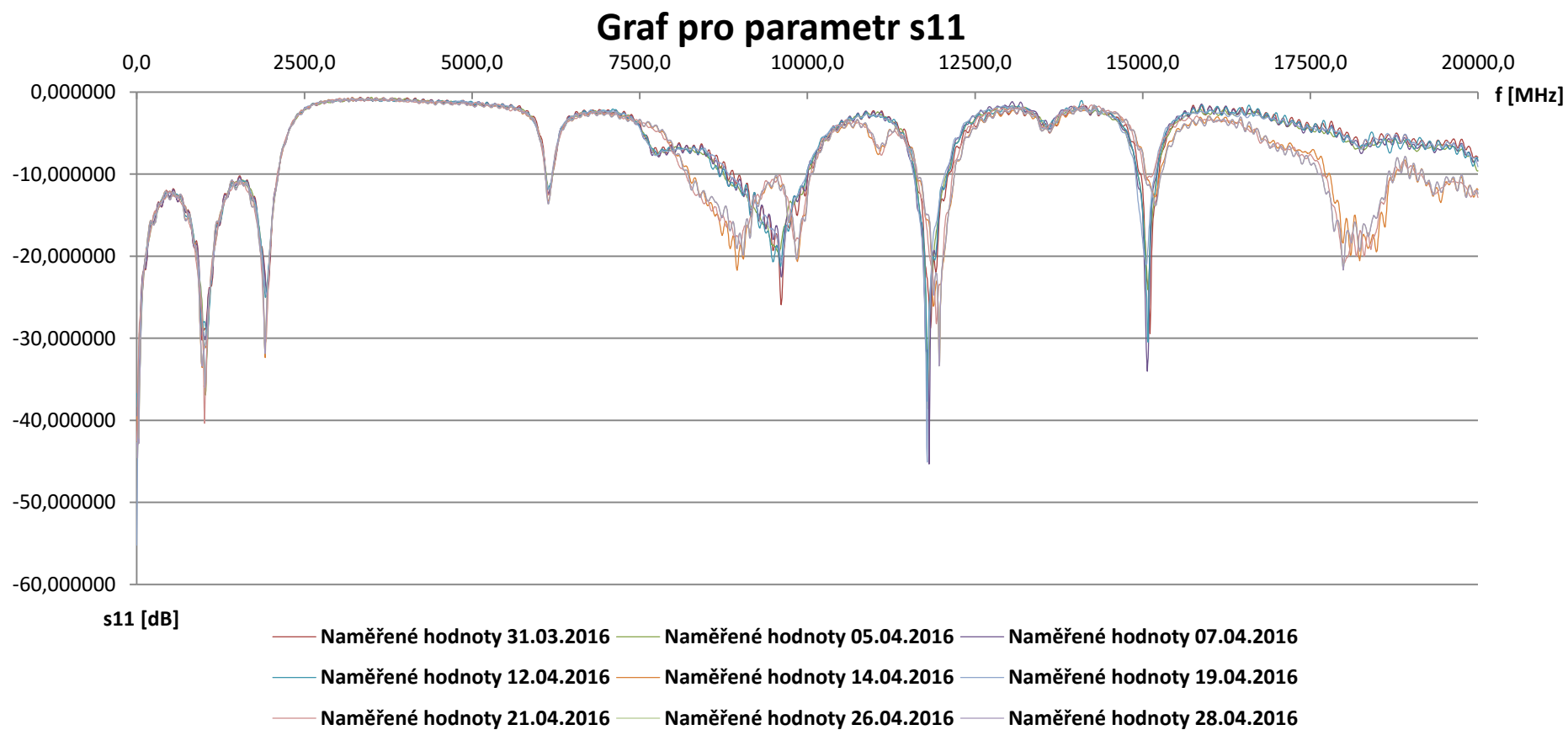
- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

Graf pro parametr s12

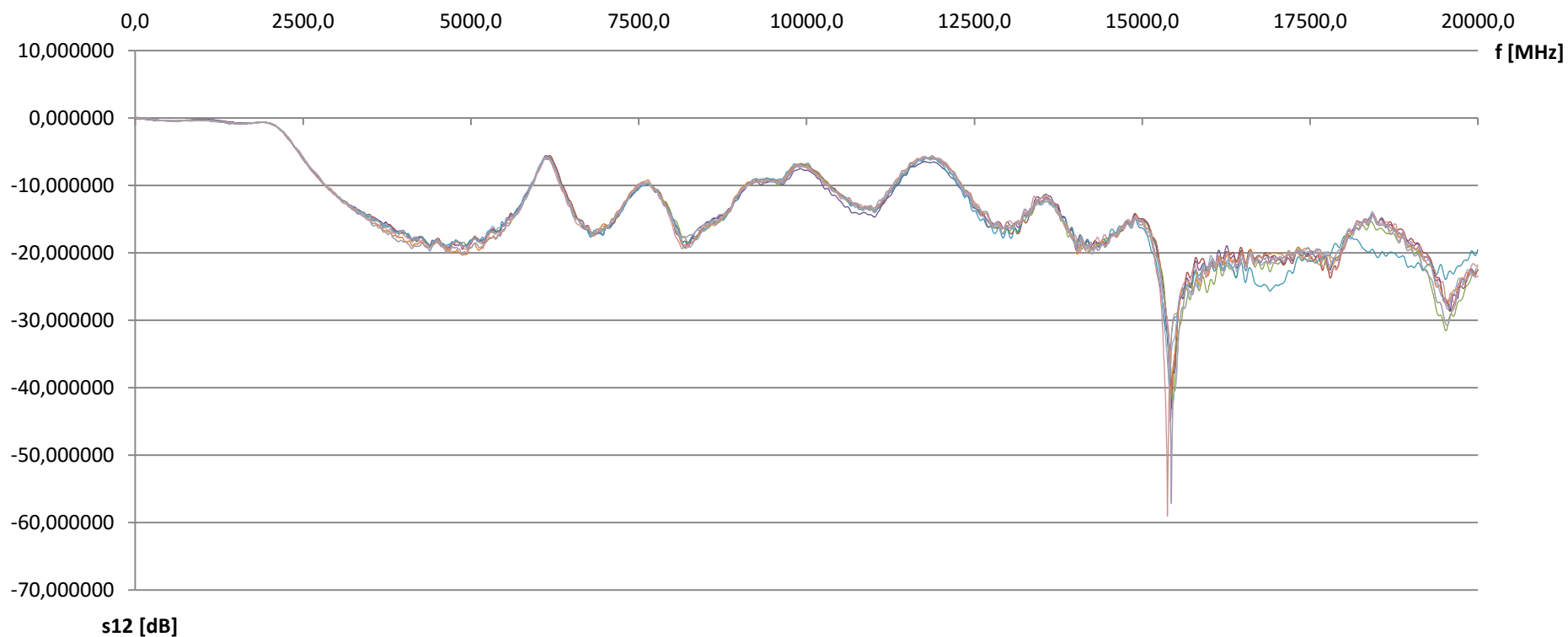


- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

Příloha R – Grafy – Filtr 2,4 GHz – dolní propust – vliv prostředí na S – parametry

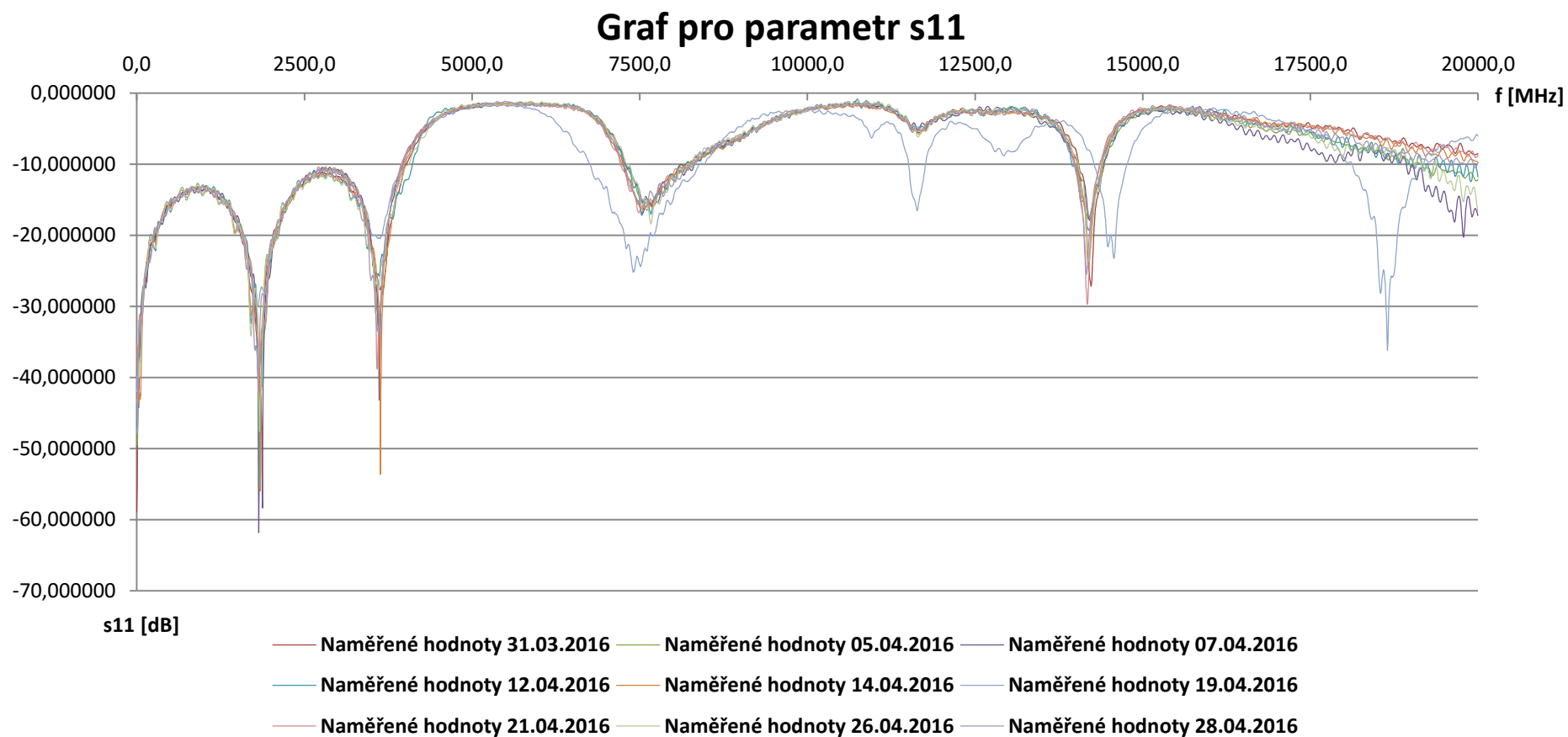


Graf pro parametr s12

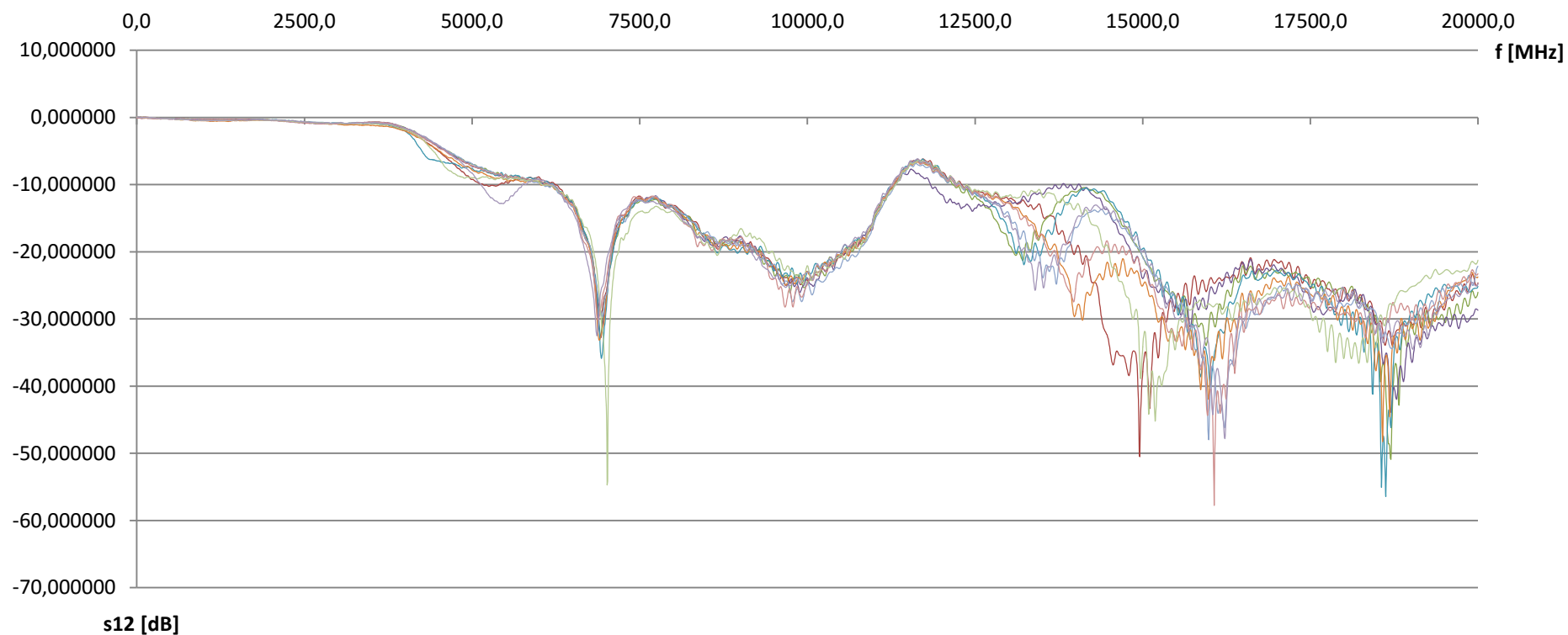


- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

Příloha S – Grafy – Filtr 5,0 GHz – dolní propust – vliv prostředí na S – parametry



Graf pro parametr s12



- Naměřené hodnoty 31.03.2016
- Naměřené hodnoty 05.04.2016
- Naměřené hodnoty 07.04.2016
- Naměřené hodnoty 12.04.2016
- Naměřené hodnoty 14.04.2016
- Naměřené hodnoty 19.04.2016
- Naměřené hodnoty 21.04.2016
- Naměřené hodnoty 26.04.2016
- Naměřené hodnoty 28.04.2016

Příloha T – Základní specifikace SPARQ – 3002E [13]**General**

Ports	2
Calibration	Internal, Automatic
Operating Frequency	DC to 30 GHz
S-parameter Measurements	Single-ended and mixed mode (calculated)
Calibration Method	OSLT (internal)
Connector Type	2.92 mm

Standard Measurement Capability

Frequency Domain Displays	Magnitude, Phase, Real and Imaginary
Time Domain Displays	Impulse Response, Step Response, Rho, Z . normalized to specified rise time
Result Displays	Up to 16 measurements displayed simultaneously
Display Modes	Smith Chart, single, dual, tandem, triple, quad, quattro, hex, octal
De-embedding Modes	User cables, adaptors, and optional fixture
File Output	Touchstone 1.0
Result Actions	Auto-save and e-mail

Pulser / Sampler and Time base

Step Amplitude	200 mV (nominal top-base, 50 ohm termination)
Rise Time	6 ps 20-80% typical - as measured by sampler
Noise	-50 dBm (no averaging, bandwidth limited to 40 GHz)
Repetition Rate	5 MHz (normal DUT length mode) and 1 MHz (long DUT length mode) @ 30% duty cycle
Hardware Averaging	Fast Averaging at 10 Million Points/Second
Acquisition Rate	Normal DUT length mode: 250 acquisitions/second; Long DUT Length Mode: 50 acquisitions/second (nominal)
Acquisition Duration	Normal DUT Length Mode: 50 ns; Long DUT Length Mode: 250 ns
Dynamic Range	$77 + 0.272 f - 0.931 \sqrt{f} - 20 \log(f)$; (typical, f in GHz; > 50 dB at 40 GHz in 'Normal' sequence control mode)
Time Base Type	Coherent Interleaved Sampling (CIS)
Equivalent Time Sample Rate	204.8 GS/s
Jitter	<= 300 fs rms

Power Requirements

Voltage	100 to 240 VAC(+/- 10%) at 50/60 Hz; Automatic AC voltage selection
Max. Power Consumption	80 W (80 VA) (Operating Mode), 7 W (Standby)

Internal Switching Relays

Frequency Rating	40 GHz
Rated Life	2 million actuations per contact
Insertion Loss	< 1.1 dB at 40 GHz
VSWR	< 1.8 @ 40 GHz
Switching Variation	Insertion loss: 0.05 dB, 0.9 deg, VSWR 0.087 @ 40 GHz
Single Relay Port-port Isolation	>50 dB @ 40 GHz (pulser / sampler port-port isolation > 100 dB @ 40 GHz)

Environmental and Safety

Temperature (Operating)	5 deg C to 40 °deg C (Internal Calibration valid 20 deg C - 0 deg C)
Humidity (Operating)	Maximum relative humidity 80% for temperatures up to 30 <C, decreasing linearly to 50% relative humidity at 40 deg C
Altitude (Operating)	Up to 10,000 ft (3,048 m) at or below 30 <C

Physical Dimensions

Dimensions (HWD)	7" H x 13.1" W x 13.6" D (178 x 332 x 345 mm)
Weight	17 lbs. (7.711 kg)