

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**Diplomová práce**

**Stanovení nejistot měření v laboratoři elektromagnetické  
kompatibility**

**2018**

**Bc. Martin Opava**

---

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin OPAVA**  
Osobní číslo: **E16N0119P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Stanovení nejistot měření v laboratoři elektromagnetické kompatibility**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování:

1. Popište problematiku stanovování nejistot.
2. Vypracujte metodiku pro výpočet nejistot měření zkušební laboratoře ETL s ohledem na druhy zkoušek, které laboratoř zajišťuje.
3. Proveďte výpočty nejistot měření pro používané měřicí řetězce.
4. Analyzujte a zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Olga Tůmová, CSc.**

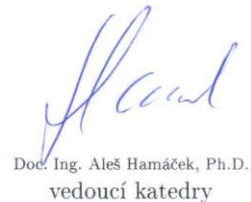
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



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

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku stanovování nejistot měření v laboratoři elektromagnetické kompatibility s ohledem na měření vyzařovaných emisí, které jsou prováděny v částečně bezodrazové komoře na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Tato práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části je podrobně popsána řešená problematika a všechny její části potřebné k realizaci praktické části. V praktické části byly stanoveny nejistoty měření pro dané měřicí řetězce. Aby bylo možné tyto nejistoty spočítat, byla provedena měření útlumu používaných koaxiálních kabelů a měření útlumu zkušebního stanoviště (částečně bezodrazové komory).

## **Klíčová slova**

elektromagnetická kompatibilita, nejistota měření, nejistota typu A, nejistota typu B, kombinovaná nejistota, rozšířená nejistota, nejistota ostatních vlivů, útlum, metrologie, chyba měření,

## **Abstract**

The submitted diploma thesis is focused on the issue of determination of measurement uncertainties in the laboratory of electromagnetic compatibility with respect to the measurement of radiated emission performed in an semi-anechoic chamber at the Faculty of electrical Engineering University of West Bohemia. This thesis consists of a theoretical and practical part. In the theoretical part the problematics solved and all their parts necessary for realization of the practical part are described in detail. In the practical part, measurement uncertainties were determined for the given measuring chains. In order to compute these uncertainties, measurement of the attenuation of the coaxial cables used and measurement of the attenuation of the test site (semi-anechoic chamber) were performed.

## **Key words**

electromagnetic compatibility, measurement uncertainty, uncertainty type A, uncertainty type B, combined uncertainty, extended uncertainty, uncertainty of other influences, attenuation, metrology, measurement error

## 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 23.5.2018

Martin Opava

# Obsah

ÚVOD .....	1
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA .....</b>	<b>2</b>
1.1 ČLENĚNÍ EMC .....	2
1.1.1 EMC biologických systémů .....	2
1.1.2 EMC technických systémů .....	4
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY EMC .....	8
<b>2 METROLOGIE ELEKTRICKÝCH VELIČIN .....</b>	<b>10</b>
2.1 METROLOGIE A MĚROVÁ SLUŽBA .....	10
2.2 POŽADAVKY NA MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN .....	10
2.3 STRATEGIE MĚŘENÍ .....	10
<b>3 PŘESNOST A CHYBY MĚŘENÍ .....</b>	<b>12</b>
3.1 PŘESNOST MĚŘENÍ .....	12
3.2 CHYBY MĚŘENÍ .....	12
3.2.1 Dělení chyb podle způsobu výskytu .....	12
3.2.2 Dělení chyb podle příčin vzniku .....	13
<b>4 CHYBY PŘÍMÝCH, NEPŘÍMÝCH A OPAKOVANÝCH MĚŘENÍ .....</b>	<b>15</b>
4.1 CHYBY PŘÍMÝCH MĚŘENÍ .....	15
4.2 CHYBY NEPŘÍMÝCH MĚŘENÍ .....	15
4.3 CHYBY OPAKOVANÝCH MĚŘENÍ .....	15
<b>5 NEJISTOTY MĚŘENÍ .....</b>	<b>16</b>
5.1 STANDARDNÍ NEJISTOTA TYPU A ( $U_A$ ) .....	17
5.2 STANDARDNÍ NEJISTOTA TYPU B ( $U_B$ ) .....	17
5.3 KOMBINOVANÁ STANDARDNÍ NEJISTOTA ( $U_C$ ) .....	17
5.4 ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA ( $U_V$ ) .....	17
5.5 TYPY ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI .....	18
5.6 ZDROJE NEJISTOT .....	20
5.7 DŮVODY VYJADŘOVÁNÍ STANDARDNÍCH NEJISTOT .....	21
<b>6 METODIKA VYJADŘOVÁNÍ STANDARDNÍCH NEJISTOT MĚŘENÍ .....</b>	<b>22</b>
6.1 ANALÝZA VSTUPNÍCH PODMÍNEK .....	22
6.2 MATEMATICKÝ MODEL ZVOLENÉ METODIKY .....	22
6.3 IDENTIFIKACE A PROVEDENÍ VŠECH VÝZNAMNÝCH KOREKČÍ .....	22
6.4 STANOVENÍ STANDARDNÍ NEJISTOTY TYPU A .....	22
6.5 STANOVENÍ STANDARDNÍ NEJISTOTY TYPU B .....	24
6.6 STANOVENÍ KOMBINOVANÉ (CELKOVÉ) NEJISTOTY .....	25
6.7 STANOVENÍ ROZŠÍŘENÉ NEJISTOTY .....	26
6.8 PREZENTACE VÝSLEDKŮ .....	26
<b>7 ANTÉNY POUŽITÉ K MĚŘENÍ ÚTLUMU EMC LABORATOŘE .....</b>	<b>27</b>
7.1 BIKÓNICKÁ ANTÉNA .....	27
7.2 LOGARITMICKO-PERIODICKÁ ANTÉNA .....	27
7.3 ŠIROKOPÁSMOVÁ BIKÓNICKO-LOGARITMICKO-PERIODICKÁ ANTÉNA .....	28
<b>8 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>29</b>
8.1 MĚŘENÍ ÚTLUMU KABELŮ .....	29
8.1.1 Postup měření .....	30
8.1.2 Schéma zapojení .....	30

8.1.3	<i>Naměřené výsledky útlumu kabelů</i> .....	31
8.2	STANOVENÍ ÚTLUMU MĚŘICÍHO STANOVÍŠTĚ .....	36
8.2.1	<i>Určení nejistoty měřicího přijímače a snímačů rušivých signálů</i> .....	36
8.2.2	<i>Měřicí pracoviště a použité přístroje</i> .....	37
8.2.3	<i>Schéma zapojení</i> .....	37
8.2.4	<i>Ukázka zapojení v laboratoři EMC</i> .....	39
8.2.5	<i>Postup měření</i> .....	40
8.2.6	<i>Výsledné grafy útlumu EMC laboratoře</i> .....	42
<b>9</b>	<b>ANALÝZA A ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>48</b>
9.1	VÝPOČET NEJISTOTY KABELŮ .....	48
9.2	ÚTLUM A NEJISTOTA EMC LABORATOŘE .....	50
9.3	VÝPOČET VÝSLEDNÉ NEJISTOTY OSTATNÍCH VLIVŮ $U_0$ .....	53
9.4	VÝPOČET VÝSLEDNÉ NEJISTOTY MĚŘICÍCH ŘETĚZCŮ .....	53
9.5	VYHODNOCENÍ KRITÉRIA MĚŘICÍHO ŘETĚZCE .....	55
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>57</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>59</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>60</b>
	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>I</b>



## Seznam symbolů a zkratk

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
SA	Spektrální analyzátor
BC-01	Bikónická vysílací anténa
LP-02	Logaritmicko-periodická vysílací anténa
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
SAC	Semi – Anechoic Chamber (Částečně bezodrazová komora)
OATS	Open Area Test Site (Otevřený testovací prostor)
AF	Anténní faktor
IN1	První vstup spektrálního analyzátoru
IN2	Druhý vstup spektrálního analyzátoru
K1	Krátký měřený kabel
K2	Dlouhý měřený kabel
$u_A$	Nejistota typu A
$u_B$	Nejistota typu B
$u_C$	Kombinovaná nejistota
$U_{lab}$	Rozšířená nejistota měřicího řetězce
$U_{cispr}$	Kritérium pro rozšířenou nejistotu měření vyhodnocenou v normě pro každou měřicí metodu
$u_a$	Nejistota kalibrace antény
$u_0$	Odhad nejistoty stanoviště a dalších prvků měřicího řetězce
$a_p$	Přesnost kalibrace přijímače
$a_a$	Přesnost kalibrace antény
$A_{meas}$	Útlum stanoviště
$V_{direct}$	Napěťová úroveň propojovacích kabelů
$V_{site}$	Napěťová úroveň EMC laboratoře
$F_{aT}$	Anténní faktor vysílací antény
$F_{aR}$	Anténní faktor přijímací antény
$A_{Ntheo}$	Teoretická hodnota útlumu stanoviště
$n$	Počet naměřených hodnot
$\bar{X}$	Aritmetický průměr z naměřených hodnot
$X_i$	Jednotlivé naměřené hodnoty

s	Směrodatná odchylka z opakovaných naměřených hodnot
$s(X_i)$	Výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru
$s^2(X_i)$	Výběrový rozptyl
$k_s$	Koeficient, jehož hodnota závisí na počtu měření
$\chi$	Koeficient statistického rozdělení
P	Výkon
U	Napětí

# Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku stanovování nejistot měření v laboratoři elektromagnetické kompatibility s ohledem na zkoušky vyzařovaných emisí, které laboratoř poskytuje. Problematika stanovování nejistot je rozsáhlý pojem, který není spojen pouze s jedním oborem a spojuje více oborů dohromady. Z tohoto důvodu je potřeba se seznámit s problematikou každého oboru pro lepší porozumění. Tato práce se skládá z teoretické a praktické části.

Teoretická část popisuje obory spojené s touto problematikou jako je elektromagnetická kompatibilita, její členění a základní pojmy tohoto oboru. Dále je v ní popsána metrologie, požadavky na měření elektrických veličin, přesnost, chyby měření a dělení těchto chyb. Zabývá se problematikou chyb přímých, nepřímých a opakovaných měření a také popisuje nejistoty měření, jejich druhy, zdroje těchto nejistot, důvod a postup, kterým tyto nejistoty vyjadřujeme. Jako poslední popisuje teoretická část použité vysílací antény.

V praktické části jsou řešeny dva problémy. Jako první byla stanovena výsledná nejistota ostatních vlivů, k čemuž bylo zapotřebí provést měření útlumu používaných kabelů a měření útlumu zkušebního stanoviště. Tato zjištěná hodnota měla ověřit uváděnou hodnotu nejistoty ostatních vlivů, která je uvedena v kalibračních listech, ale byla doposud pouze odhadovaná. Pomocí této hodnoty jsme byli schopni určit výslednou nejistotu použitých měřicích řetězců v laboratoři EMC a nakonec určit, zda použité měřicí řetězce splňují kritérium pro vyhodnocování podobných měření.

# 1 Elektromagnetická kompatibilita

Název elektromagnetická kompatibilita (EMC) nebo v některé literatuře také elektromagnetická slučitelnost vznikl z anglického spojení „Electromagnetic Compatibility“. Je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů a naopak svou vlastní činností nepřipustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.

EMC jako samostatná vědeckotechnická disciplína vznikla v šedesátých letech 20. století v USA. Delší dobu (rozmezí 10-15 let) byla předmětem zájmu pouze úzkého kruhu v oboru elektronika a jednalo se hlavně o vojenský či kosmický průmysl. Do každodenního života začala EMC pronikat až s prudkým vývojem elektroniky, především pak mikroprocesorové a komunikační techniky. V dnešní době je již EMC samozřejmostí u veškeré elektroniky, ale jsou známy případy z dřívější doby, kdy špatné řešení EMC mělo katastrofický následek, a proto není pochyb o tom, že EMC je důležitým oborem a rozhodně by neměla být brána na lehkou váhu. [3]

## 1.1 Členění EMC

Problematiku EMC lze členit podle mnoha různých hledisek. Celkově lze problematiku EMC rozdělit na dvě hlavní oblasti: 1) EMC biologických systémů,

2) EMC technických systémů.

### 1.1.1 EMC biologických systémů

EMC biologických systémů se zabývá celkovým "elektromagnetickým pozadím" našeho životního prostředí a přípustnými úrovněmi rušivých i užitečných elektromagnetických signálů (přírodních i umělých) s ohledem na jejich vlivy na živé organismy. I když tyto vlivy jsou pozorovány již delší dobu, nejsou výsledky dosavadních biologických a biofyzikálních výzkumů v této oblasti zdaleka jednoznačné. Biologické účinky elektromagnetického pole závisí totiž na jeho charakteru, době působení i na vlastnostech organismu. Protože nejsou známy receptory pole (tj. vstupy elektromagnetického pole do organismu), posuzují se tyto účinky jen podle nespécifických reakcí organismu. Každý člověk reaguje na působení elektromagnetického pole jinak, protože jeho adaptační, kompenzační a regenerační možnosti a schopnosti jsou individuální. Proto je velmi obtížné analyzovat změny v organismu a na základě statistických výsledků dojít k obecně platným závěrům. To je jeden z důvodů, proč je

ve světě zatím jen málo konkrétních klinických studií a ty co existují, jsou zaměřeny na vyšší expozice elektromagnetickým polem v pracovním procesu. Přitom za nežádoucí vlivy na člověka lze dnes považovat nejen přímé působení elektromagnetického pole na jeho pracovišti (obsluha vysílačů, radiolokátorů, výpočetních středisek apod.), ale i dlouhodobé bezděčné působení elektronizovaného životního prostředí zejména doma, kde většina lidí tráví hodiny svého času ve "společnosti" elektrických a elektronických zařízení (televizní a rozhlasové přijímače, kuchyňské spotřebiče, osobní počítače apod.).

Problematikou EMC biologických systémů se zabývají některá výzkumná lékařská pracoviště s cílem posoudit odolnost lidského organismu vůči elektromagnetickým vlivům, mechanismy jejich působení apod. U vysokofrekvenčních a mikrovlňných polí jsou relativně nejvíce objasněny tzv. tepelné účinky, tj. účinky, které se objeví jako výsledek ohřevu tkání vystavených vysokým úrovním polí. Příslušné hodnoty prahových výkonových hustot elektromagnetického pole na velmi vysokých kmitočtech, při jejichž překročení může nastat tepelné poškození organismu.

Účinky elektromagnetického pole na centrální nervový systém, srdečně-cévní, krvetvorný a imunitní systémy se přisuzují tzv. netepelným účinkům, tj. déle trvajícím expozicím polí s relativně nízkou výkonovou úrovní. Ani tyto, ani genetické či karcinogenní účinky však zatím nebyly jednoznačně prokázány. Všechny tyto skutečnosti v obtížnosti posuzování EMC biologických systémů jsou příčinou toho, že v příslušných hygienických normách ve světě existují až řádově velké rozdíly, např. v přípustných dávkách elektromagnetického záření. V České republice se této problematice týká Vyhláška ministerstva zdravotnictví č. 408/1990 Sb., která stanovuje poměrně přesné požadavky pro práci a pobyt osob v elektromagnetickém poli. Vyhláška především ukládá každému, kdo provozuje zdroje elektromagnetického záření (např. rozhlasové, televizní, ale i amatérské či občanské vysílače a generátory), aby učinil technická a organizační opatření, která omezí počty i ozařování osob elektromagnetickým polem na nejmenší možnou míru, nejvýše však na hodnoty stanovené touto vyhláškou. Stanovují se zde největší přípustné velikosti ozáření jak pracovníků, tak i "běžného" obyvatelstva. Velikost ozáření se přitom určuje jako velikost celkové energie záření  $W$ , tj. jako součin druhé mocniny intenzity  $E$  nebo  $H$  a času expozice  $t$  v hodinách v jednom pracovním cyklu (pětidenní pracovní týden pro pracovníky, kalendářní týden pro obyvatelstvo). Jak plyne z Tab. 1.1.1., jsou tyto mezní velikosti ozáření závislé na kmitočtovém pásmu a s rostoucím kmitočtem se rychle zmenšují. Kromě velikosti ozáření jsou v Tab. 1.1.1 stanoveny i mezní úrovně polí (elektrického  $E_{mez}$ , magnetického  $H_{mez}$  či výkonové

hustoty  $P_{mez}$ ), které nesmějí být překročeny ani krátkodobě. Dodržení těchto hodnot musí výrobce či provozovatel příslušného zařízení zajistit a kontrolovat opakovaným měřením. [1]

Tab. 1.1.1. Mezní úrovně elektromagnetického pole a největší přípustná ozáření

Veličina ↓ Kmitočet [MHz]	Pracovníci u zdrojů záření				Obyvatelstvo			
	0,06-3	3-30	30-300	>300	0,06-3	3-30	30-300	>300
$E_{mez}$ [V/m]	500	300	100	-	180	80	30	-
$H_{mez}$ [A/m]	50	-	-	-	15	-	-	-
$P_{mez}$ [mW/cm <sup>2</sup> ]	-	-	-	2,65	-	-	-	-
$W_E$ [(V/m <sup>2</sup> )*h]	50000	7000	800	-	5000	700	100	-
$W_H$ [(A/m <sup>2</sup> )*h]	200	-	-	-	20	-	-	-
$W_P$ [mWh/cm <sup>2</sup> ]	-	-	-	0,8.K <sub>1</sub>	-	-	-	0,12.K <sub>2</sub>

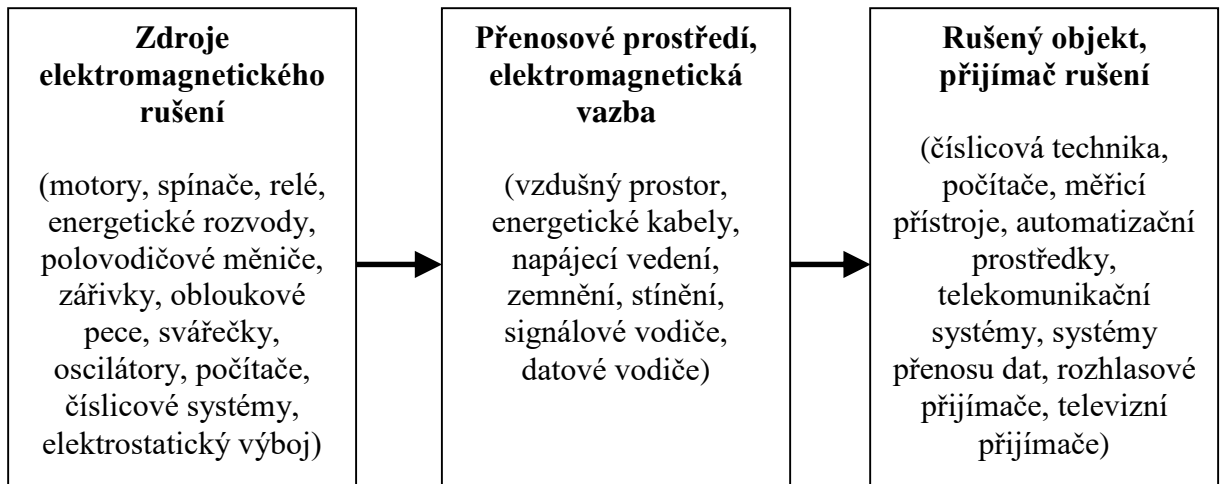
Hodnota koeficientu  $K$  se mění v závislosti na typu antény. Jejich přehled je uveden v tabulce Tab.1.1.2.

Tab.1.1.2 Přehled koeficientů  $K$

	$K_1$	$K_2$
Stacionární antény a zářiče	1	1
Mechanicky sektorující antény	2,5	5
Otáčející se antény	120	360

### 1.1.2 EMC technických systémů

Druhá základní oblast, tedy EMC technických systémů a zařízení, se zabývá vzájemným působením a koexistencí technických prostředků, zejména elektrotechnických a elektronických přístrojů. Elektromagnetická kompatibilita se tak z původní disciplíny, zabývající se pouze ochranou proti rušení rádiového příjmu, v současnosti rozvinula ve velmi široký obor, který se člení na několik dílčích podoborů a oblastí. Při zkoumání jednotlivých problémů EMC je třeba mít vždy na paměti, že EMC je oborem výrazně aplikačním a zejména systémovým. Koncepce a principy EMC lze tedy vždy chápat jako jednu oblast praktické aplikace obecných teoretických principů elektrotechniky a elektroniky. Při zkoumání EMC daného zařízení či systému (a to jak technického, tak i biologického) se vychází vždy z tzv. základního řetězce EMC, naznačeného na Obr. 1. Tento řetězec zdůrazňuje již zmíněný systémový charakter problematiky EMC, kdy v obecném případě vždy vyšetřujeme všechny tři jeho složky.



*Obr. 1 Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí*

První oblast zdrojů elektromagnetického rušení zahrnuje zkoumání obecných otázek mechanismů vzniku rušení, jeho charakteru a intenzity. Patří sem jednak tzv. přírodní (přírozené) zdroje rušivých signálů (Slunce, kosmos, elektrické procesy v atmosféře apod.), jednak tzv. umělé zdroje rušení, tj. zdroje vytvořené lidskou činností, k nimž patří nejrůznější technická zařízení (zapalovací systémy, elektrické motory, výroba, přenos a distribuce elektrické energie, elektronická zařízení, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné spotřebiče apod.).

Druhá oblast řetězce EMC se zabývá elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbami, tedy způsoby i cestami, kterými se energie ze zdroje rušení dostává do rušených objektů - přijímačů rušení.

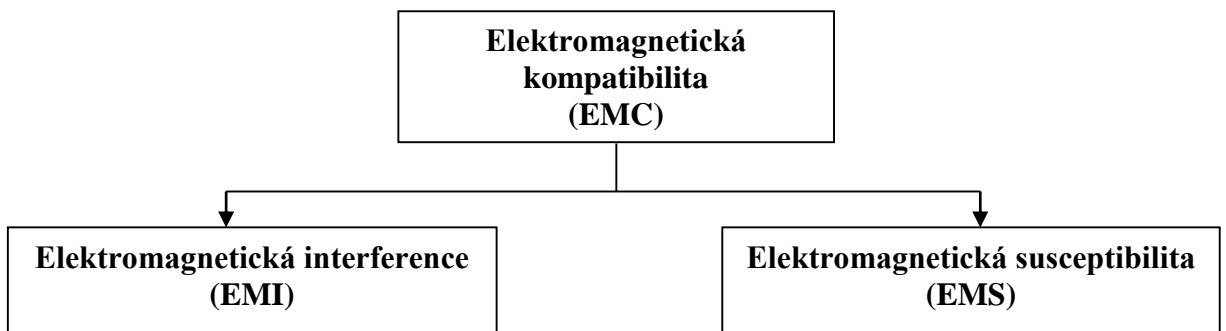
Konečnou oblastí je problematika objektů či přijímačů rušení zabývající se klasifikací typů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho plynoucí jejich elektromagnetickou odolností.

Skutečná souvislost tří oblastí základního řetězce EMC je samozřejmě mnohem složitější, než je znázorněno na Obr. 1. Každý systém nebo zařízení, nebo jeho určitá část, může být současně jak vysílačem (zdrojem), tak i přijímačem elektromagnetického rušení. Přesto můžeme v technické praxi většinou označit element méně citlivý na rušení a generující větší úroveň rušení jako zdroj (vysílač) rušícího signálu a naopak, citlivější element s menší úrovní generovaného rušení za přijímač rušivých signálů. V obou směrech jsou přitom zdroj a přijímač vázány mezi sebou parazitní elektromagnetickou vazbou. Ve skutečném řetězci EMC se rovněž nikdy nejedná o působení jediného zdroje rušení a jediného přijímače, ale řeší se vždy vzájemné vztahy více systémů vzájemně se všestranně ovlivňujících. Přesto obvykle postupujeme tak, že jeden systém považujeme nejprve za systém ovlivňující (zdroj rušení) a všechny ostatní

za systémy ovlivňované (přijímače rušení). Pak tento vybraný systém naopak považujeme za ovlivňovaný a hodnotíme důsledky jeho možných ovlivnění všemi ostatními systémy, které tvoří tzv. obklopující elektromagnetické prostředí. Souhrn jejich rušivého působení se ve zkoumaném systému může projevat různými způsoby, počínaje zhoršením kvality systémových parametrů přes částečné nebo úplné omezení systémové funkce až k havarijním technologickým či bezpečnostním stavům.

Současně však je vhodné si uvědomit, že pokud by se podařilo zcela odstranit kteroukoli část tohoto řetězce, ztratila by elektromagnetická kompatibilita svůj smysl, neboť dané zařízení či systém by byl absolutně kompatibilní. Ve snaze v praxi se tomuto stavu alespoň přiblížit, zaměřujeme svou pozornost na jednu ze tří oblastí řetězce EMC. Výběr nejvhodnější z nich, jejíž úpravou dosáhneme nejvyššího efektu EMC, závisí samozřejmě na konkrétním systému a okolnostech jeho činnosti. Především musíme uvážit, zda rušivé účinky ovlivňujícího systému (zdroje rušení) jsou jeho funkčními parametry (např. signál rozhlasového vysílače) nebo zda jsou jeho parazitními (rušivými) produkty (např. jiskření na kontaktech, vyšší harmonické apod.). Podle toho pak směřujeme prostředky pro minimalizaci těchto rušivých vlivů buď převážně na zdroj rušení, nebo na rušený objekt, příp. na přenosovou cestu mezi nimi.

Celou problematiku EMC lze rozdělit do dvou skupin:



*Obr. 2 Členění problematiky EMC*



## **Elektromagnetická interference (EMI)**

Zkratka pochází z anglického spojení „Electromagnetic Interference“ neboli elektromagnetické rušení. Jedná se o proces, při kterém se signál, generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů, identifikací parazitních přenosových cest a definuje zařízení tak, že nesmí rušit okolí a narušovat jeho činnost a funkčnost. Kompatibility celého systému se dosahuje technickými opatřeními především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování. [1][2]

## **Elektromagnetická susceptibilita (EMS)**

Zkratka pochází z anglického spojení „Electromagnetic Susceptibility“ neboli elektromagnetická citlivost či elektromagnetická odolnost. Vyjadřuje schopnost zařízení pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení. EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními, která zvyšují u objektu (přijímače rušení) jeho elektromagnetickou imunitu, tedy jeho odolnost proti vlivu rušivých signálů. EMS se tak týká spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin. Rozlišujeme dva druhy odolnosti, a sice interní odolnost (odolnost systému vůči rušivým vlivům, které se nacházejí uvnitř vlastního systému) a externí odolnost (odolnost systému vůči vnějším rušivým vlivům). [1][2]

S pojmem EMS jde ruku v ruce také pojem zvaný „Kritérium elektromagnetické odolnosti“. Jde o to, že musíme přesně definovat meze narušení funkcí daného zařízení a to buď kvalitativně, nebo kvantitativně. Kvantitativní metodou stanovujeme hodnotu sledované veličiny tak, aby její hodnota nevyvolala nežádoucí účinky a neovlivnila funkčnost daného zařízení. S kvalitativní metodou určujeme funkční kritérium, které definuje přípustné poruchy a změny funkčnosti testovaného zařízení. Rozlišujeme čtyři druhy funkčního kritéria:

### **Funkční kritérium A:**

Testované zařízení musí během testu pokračovat ve své činnosti bez jakéhokoliv zhoršení či přerušení jeho funkce.

### **Funkční kritérium B:**

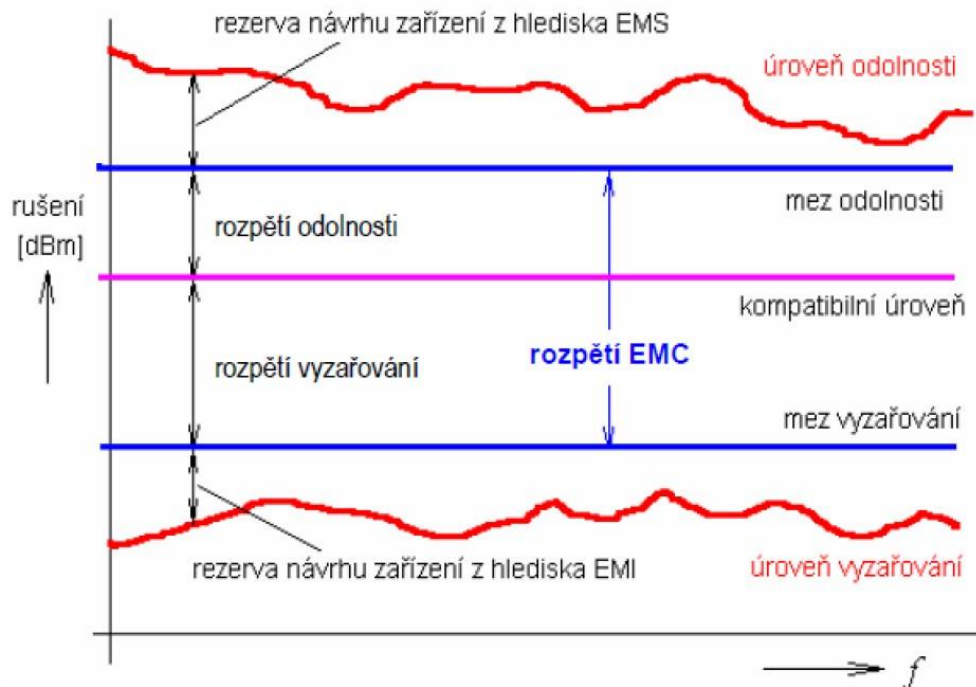
Testované zařízení může během testu zhoršit svou činnost, ale nesmí být ovlivněn jeho aktuální provozní stav a nesmí dojít ke změně dat v paměti testovaného zařízení. Po ukončení zkoušky odolnosti není dovoleno žádné zhoršení činnosti a zařízení musí pokračovat ve své činnosti bez externího zásahu (reset).

### Funkční kritérium C:

Testované zařízení může během testu dočasně ztratit svou funkci, ale po skončení testu se tato funkce musí obnovit řídicím systémem sama, nebo zásahem operátora (reset).

## 1.2 Základní pojmy EMC

Každé elektrotechnické zařízení je současně jak zdrojem elektromagnetického rušení, tak i jeho přijímačem pracujícím v určitém elektromagnetickém prostředí. Pro každé takové zařízení definuje obecná norma ČSN-IEC 1000-1-1[7] některé základní pojmy, jejichž základní vztah je vysvětlen na Obr. 3.



Obr. 3 Úrovně a meze elektromagnetického vyzařování a odolnosti [1]

**Úroveň vyzařování** je rušení generované samotným konkrétním spotřebičem či zařízením měřené předepsaným způsobem a vyjádřené např. v dBm v závislosti na kmitočtu.

**Mez vyzařování** je maximální přípustná (tj. normami povolená) úroveň vyzařování daného zařízení.

**Rezerva návrhu zařízení z hlediska EMI** je rozdíl úrovně vyzařování a meze vyzařování.

**Úroveň odolnosti** je maximální úroveň rušení působícího na konkrétní zařízení, při němž nedochází ještě ke zhoršení jeho provozu.

**Mez odolnosti** je nejnižší normou požadovaná úroveň odolnosti daného zařízení.

**Rezerva návrhu zařízení z hlediska EMS** je rozdíl úrovně odolnosti a meze odolnosti.

**Rezerva EMC** daného zařízení je rozdíl meze odolnosti a meze vyzařování.

**Kompatibilní úroveň** je úroveň rušení, při níž je dosaženo ještě "příjemně vysoké" pravděpodobnosti EMC zařízení.

**Rezerva (rozpětí) vyzařování** je rozdíl mezi kompatibilní úrovní a mezí vyzařování zdroje rušení.

**Rezerva (rozpětí) odolnosti** je rozdíl mezi kompatibilní úrovní a mezí odolnosti přístroje, zařízení nebo systému. [1]

## 2 Metrologie elektrických veličin

### 2.1 Metrologie a měrová služba

Jednotnost a dohled nad měrovým pořádkem zajišťuje v každém státě měrová instituce. Metrologie je věda o měření, která je samostatnou vědní disciplínou o fyzikálních veličinách a jejich jednotkách. Řada organizací zabývajících se na mezinárodní úrovni touto problematikou a to zejména problematikou měření, terminologickými a definičními otázkami je:

- OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale),
- BIPM (Bureau International des Poids et Mesures),
- IEC (International Electrotechnical Commission),
- ISO (International Standard Organisation).

Na území České republiky působí tyto instituce:

- Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO),
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ),
- Český metrologický institut (ČMI),
- Český institut pro akreditaci (ČIA),

Úkolem všech těchto institucí je především vnitrostátní zabezpečení správnosti, jednotnosti a přesnosti měr užívaných v národním a mezinárodním měřítku. [3]

### 2.2 Požadavky na měření elektrických veličin

Měření elektrických veličin je v celé řadě technických oborů velmi důležité. Jednotlivé požadavky na měření se rozlišují podle zaměření a úrovně pracovištěm podle technické složitosti a náročnosti měřených objektů. Současný trend vývoje technických zařízení nutí měřící techniku stále zvyšovat přesnost měření a používat dražší a složitější měřící zařízení. Nejpresnější měření kladou na zařízení laboratoří vysoké požadavky, na jejich přístrojové vybavení a kvalifikované odborníky v oboru metrologických měření. [3]

### 2.3 Strategie měření

Měření jako celek a strategii měření rozdělujeme na tři hlavní části.

- *První část pojednává o analýze měření*

Zabývá se především tím, zda je samotné měření proveditelné. S ohledem na přístrojové a laboratorní vybavení formulujeme dostatečně úkol měření, princip měření a zvolíme

vhodnou měřicí metodu.

- ***Druhá část pojednává o provedení měření***

Určí se základní rozhodnutí a postupy pro optimální průběh měření.

- ***Třetí část vyhodnocuje samotný průběh měření***

Výpočet chyby, použití korelací a vyhodnocuje způsob interpretace výsledků měření. [3]

## 3 Přesnost a chyby měření

### 3.1 Přesnost měření

Při každém reálném procesu měření dochází ke vzniku chyb. Tím, že neexistují absolutně přesné měřicí přístroje a měřicí metody, pomocí kterých by bylo možné určit hodnotu měřené veličiny, je každé měření zatížené určitou chybou. Nejruznější příčiny, které se v reálném procesu vyskytují, se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření se tedy vždy pohybuje v určitém „tolerančním poli“ kolem skutečné hodnoty, kde ideální ztotožnění dvou hodnot téměř nikdy nenastane. V konečném důsledku nás zajímá nejen výsledek měření, ale i chyba, s jakou byla určena. Každý uznaný výsledek měření má také obsahovat i vyjádření přesnosti. Přesnost měření se obvykle vyjadřuje chybou měření a je významným a důležitým kritériem pro posuzování měřících systémů a jejich jednotlivých členů. Přesnost měření charakterizuje schopnost udávat na výstupu informaci o pravé hodnotě měřené veličiny. [2]

### 3.2 Chyby měření

Chybu měření lze popsat jako rozdíl mezi pravou hodnotou měřeného parametru a výsledku získaného měřením. Vzhledem k tomu, že neznáme „skutečnou“ pravou hodnotu, nemůžeme tedy znát ani skutečnou chybu měření.

#### 3.2.1 Dělení chyb podle způsobu výskytu

- a) Systematické chyby (soustavné),
  - b) náhodné chyby (nahodilé),
  - c) hrubé chyby (omyly).
- a) Systematické chyby jsou korigovatelné tehdy, známe-li příčiny a zákonitosti jejich vzniku, nebo pokud je můžeme kontrolním měřením určit s určitou přesností a jejich vliv zmenšit pomocí korekcí, kompenzací apod. Jsou způsobeny vlivem teploty, kmitočtu, spotřebou použitých přístrojů apod. a mají stejnou polaritu i velikost. I když „systematicky“ ovlivňují výsledek měření, je možné ovlivnit podstatnou část jejich negativního vlivu na měření. Zbytek chyby označujeme jako „nevylučitelnou“ systematickou chybu.

**Absolutní chyba**  $\Delta x$  je rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Používá se při vyhodnocování výsledku měření.

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad [-], \quad (1)$$

kde:  $x_m$  - naměřená hodnota

$x_s$  - skutečná hodnota

**Relativní chyba**  $\delta_x$  je podíl absolutní chyby  $\Delta_x$  se skutečnou hodnotou (poměrné vyjádření chyby). Jejím výsledkem je číslo bez rozměru, protože hodnoty  $\Delta_x$  a  $x_s$  musí být vyjádřeny ve stejných jednotkách.

$$\delta_x = \frac{\Delta_m}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad [-], \quad (2)$$

**Procentní chyba**  $\delta s$  je vyjádřena poměrnou chybou v procentech správné hodnoty. Jedná se o lepší způsob vyjádření poměrné chyby. Skutečná hodnota  $x_s$  nebývá často známá, pak předpokládáme, že  $x_m \approx x_s$

$$\delta s = \delta x * 100 \quad [\%]. \quad (3)$$

- b) Náhodné chyby nejsou známé, jsou těžko předvídatelné, neznámého původu a opakovaným měřením lze změnit jejich vliv pouze za stejných podmínek měření. Výsledek měření je reprezentován aritmetickým průměrem získaným při  $n$  opakovaných měření. Příčina vzniku náhodných chyb je způsobena např. nepravidelným kolísáním teploty, změnou odporu vlivem oteplení vodiče průchodem proudu apod.
- c) Hrubé chyby (omyly) vznikají při nesprávném měření, při nepřesnosti nebo poruše měřicího přístroje nebo vlivem selhání pozorovatele. Měření zatížené touto chybou znehodnocuje celý experiment a proto je nutné tyto chyby vyloučit ze souboru naměřených hodnot. Omezit tyto chyby lze důsledným dodržováním měřicích postupů, podmínek měření a pozorností obsluhy. [2]

### 3.2.2 Dělení chyb podle příčin vzniku

- a) Chyby metody - jsou většinou korigovatelné a jedná se o systematické chyby, které vznikají vzájemným působením měřicího přístroje a měřicího obvodu.
- b) Chyby měřicích přístrojů - jsou charakteristické vlastnostmi přístrojů a nedokonalostí jejich výroby. Základní chyby měřicích přístrojů jsou uvedeny v třídě přesnosti. Ty udávají maximální možnou chybu, pokud se přístroj používá podle pokynů doporučených výrobcem. Pokud nejsou tyto podmínky dodrženy, dochází

k přídavným chybám, které mohou několikanásobně převýšit chyby základní.

- c) Chyby použitých měřicích členů (etalony) - jsou způsobeny nepřesnostmi vyrovnání a kalibrace etalonů (odpor, kapacita...). Pro velmi přesná měření je udávaná největší dovolená výchylka od jmenovité hodnoty (absolutní nebo relativní).
- d) Chyby způsobené rušivými vlivy - patří do skupiny obtížně korigovatelných chyb, které způsobují např. rušivá napětí, odpory vodičů, kapacitní a induktivní vazby apod.
- e) Chyby čtení - jsou způsobeny pozorovatelem, který čte údaj měřicího přístroje.
- f) Celková chyba měření - je výsledkem většího počtu různých dílčích chyb. Obvykle se počítá s největšími možnými chybami měření (největší možná absolutní chyba  $\Delta_x$  a relativní chyba  $\delta_x$ ). [2]



## 4 Chyby přímých, nepřímých a opakovaných měření

Výsledky měření se získávají buď přímo (čtením měřicího přístroje), nebo nepřímo (dosazením zjištěných hodnot do daného matematického vztahu). Měření se podle toho dělí na přímé a nepřímé.

### 4.1 Chyby přímých měření

Výsledek přímého měření se získá čtením údaje z měřicího přístroje a největší možná absolutní chyba měření je rovna absolutní chybě měřicího přístroje.

### 4.2 Chyby nepřímých měření

Výsledek nepřímého měření je dán matematickou funkcí několika nezávisle proměnných. Jejich hodnoty jsou obvykle zjištěny přímými měřeními, která jsou zatížena určitými chybami.

### 4.3 Chyby opakovaných měření

U opakovaných měření se k určení správného výsledku provádí měření za stejných podmínek několikrát. Výsledky těchto měření se mohou lišit.

- a) Výsledky jsou nepřesné, je-li vzájemná shoda výsledků špatná,
- b) výsledky jsou shodné, ale nesprávné, jestliže se výsledky mezi sebou shodují, ale výrazně se liší od skutečné hodnoty,
- c) výsledky přesné, jsou shodné a správné současně,
- d) výsledek odlehlý, který se od ostatních hodnot výrazně liší.

Opakovaným měřením snižujeme náhodné chyby (neznáme jejich původ ani zákonitosti) na minimum. [2]

## 5 Nejistoty měření

Výsledek každého měření je nekompletní, pokud je uveden bez příslušné nejistoty. Nejistota měření je obecně míra pochybnosti o správnosti výsledku měření a je charakteristická rozsahem hodnot okolo výsledku měření, který lze zahrnout k hodnotě měřené veličiny. Nejistota se týká nejen samotného výsledku měření, ale také i použitých měřicích přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod. Na základě doporučení Mezinárodního výboru pro míry a váhy CIPM jsou chyby měření nahrazovány nejistotami. K určování nejistot měření se používají statické metody, kde se předpokládá určité (normální) rozdělení pravděpodobnosti, které udává, jak se může měřená hodnota odchylovat od skutečné, konvenčně pravé hodnoty, popř. se uvádí pravděpodobnost, s jakou s jakou se skutečná hodnota nachází v intervalu daném nejistotou.

Mírou nejistoty je směrodatná odchylka udávané veličiny a takto vyjádřená nejistota se označuje jako standardní odchylka  $u$ , která představuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty.

Standardní odchylka  $u$ , se stanoví jako směrodatná odchylka výběrových parametrů:

$$u = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{s^2(\bar{x})}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [-], \quad (4)$$

kde:  $x_i$  - hodnota  $i$ -tého vzorku měření

$\bar{x}$  - aritmetický průměr ze základního výběru

$n$  - počet hodnot opakovaného a nezávislého měření

$s^2(x_i)$  - výběrový rozptyl

Standardní nejistota se podle způsobu vyhodnocování dělí na:

- a) standardní nejistota typu A – označují se  $u_A$ ,
- b) standardní nejistota typu B – označují se  $u_B$ .

Způsob udávání (značení) nejistot je buď samostatně bez znaménka, nebo za hodnotou výsledku se znaménkem plus nebo minus. [2]

### **5.1 Standardní nejistota typu A ( $u_A$ )**

Je způsobena změnami, náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují obecně za neznámé. Stanoví se z n-opakovaných a nezávislých měření stejné hodnoty za stále stejných podmínek. Se zvětšujícím se počtem opakovaných měření se tyto nejistoty zmenšují a předpokládá se existence náhodných chyb s normálním rozdělením (rozdělení s pravděpodobností 95%). [2]

### **5.2 Standardní nejistota typu B ( $u_B$ )**

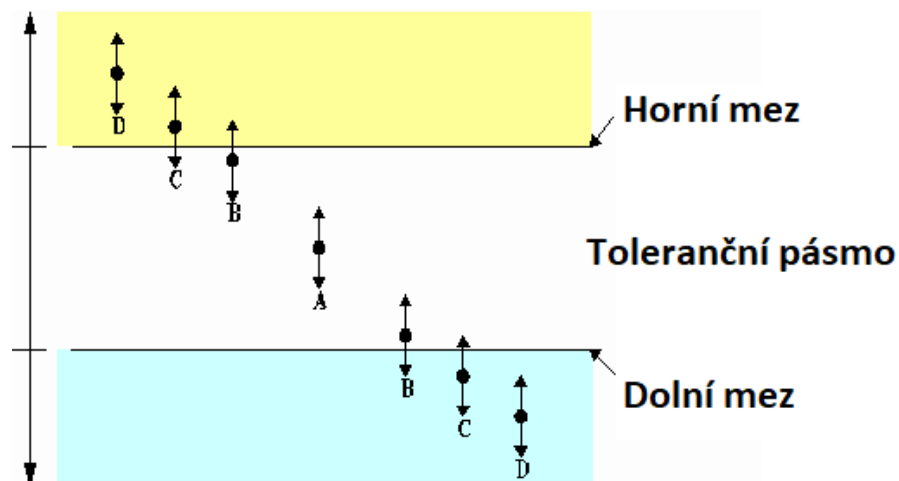
Je způsobena známými a odhadnutelnými příčinami. Jejich identifikaci a základní ohodnocení provádí experimentátor. Tyto nejistoty pocházejí od různých zdrojů a při určitém měření je výsledná standardní nejistota typu B dána jejich superpozicí. Hodnoty nejistot typu B nezávisí na počtu opakovaných měření. Standardní nejistota je určena v závislosti na rozdělení pravděpodobnosti, se kterou mohou zdroje nejistoty či ovlivňující veličiny nabývat jednotlivých hodnot mezi svými krajními mezemi.[2]

### **5.3 Kombinovaná standardní nejistota ( $u_C$ )**

V technické praxi se jen zřídka vystačí s určením standardní nejistoty typu A nebo standardní nejistoty typu B. V tomto případě určíme sumací výsledný efekt kombinace nejistot měření typu A i B. Kombinovaná standardní nejistota  $u_C$  udává interval (rozsah hodnot), ve kterém se s pravděpodobností 68,3% nachází skutečná hodnota. Běžná technická praxe proto více upřednostňuje tento druh kombinované standardní nejistoty. [2]

### **5.4 Rozšířená nejistota ( $u_y$ )**

Rozšířená nejistota  $u_y$  se získá z kombinované standardní nejistoty vynásobením příslušným koeficientem rozšíření  $k_u$ . Tuto nejistotu zavádíme v případě, pokud je požadovaná vysoká spolehlivost a větší pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty v intervalu  $\langle y-U_y; y+U_y \rangle$  daném touto nejistotou. [2]



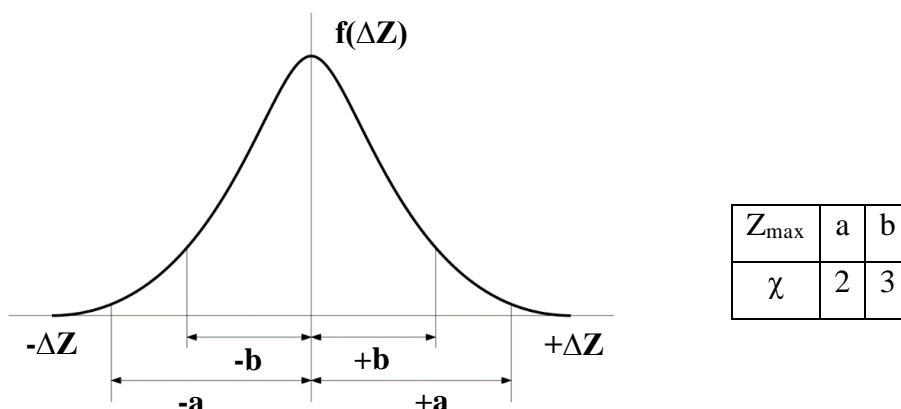
Obr. 4 Význam nejistoty měření při posuzování shody

Obr. 4 popisuje význam nejistoty při posuzování shody. Zde může dojít k následujícím možnostem:

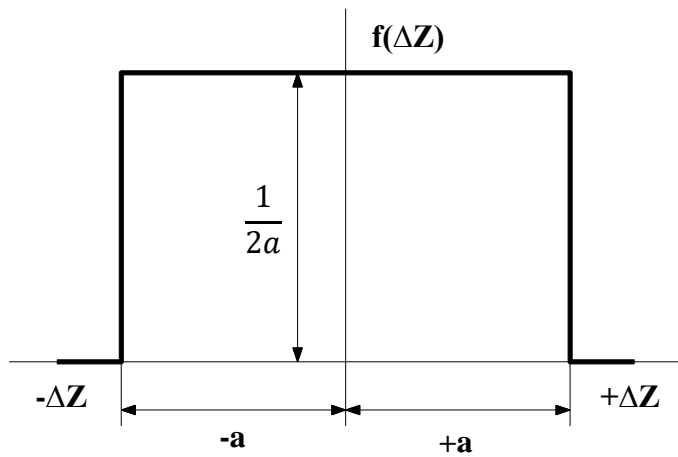
- bod A vyhovuje - hodnota i nejistota jsou v tolerančním pásmu,
- bod B nevyhovuje - hodnota je v tolerančním pásmu, nejistota však hranice tolerančního pásma překračuje,
- bod C nevyhovuje - hodnota je mimo toleranční pásmo, nejistota do tolerančního pásma zasahuje,
- bod D nevyhovuje - hodnota i nejistota jsou mimo meze tolerančního pásma.

## 5.5 Typy rozdělení pravděpodobnosti

Rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny je pravidlo, kterým každému jevu popisovanému touto veličinou přiřazujeme určitou pravděpodobnost a získáme ho, pokud každé diskrétní hodnotě náhodné veličiny, resp. intervalu hodnot spojitě náhodné veličiny, přiřadíme pravděpodobnost. Pro vyhodnocování nejistot se uvažují následující rozdělení:

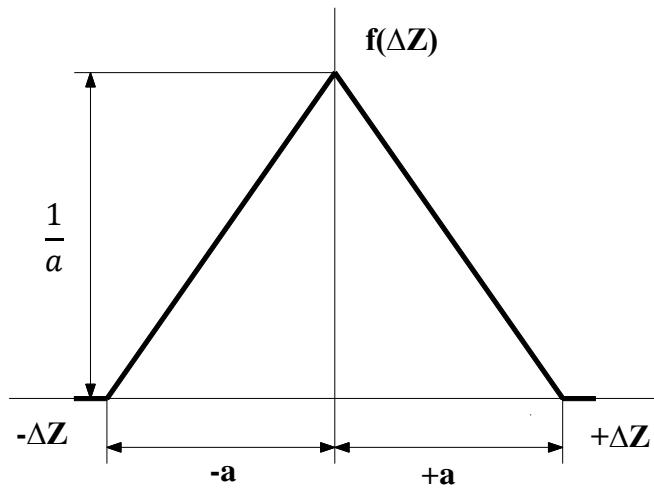


Obr. 5 Normální (Gaussovo) rozdělení



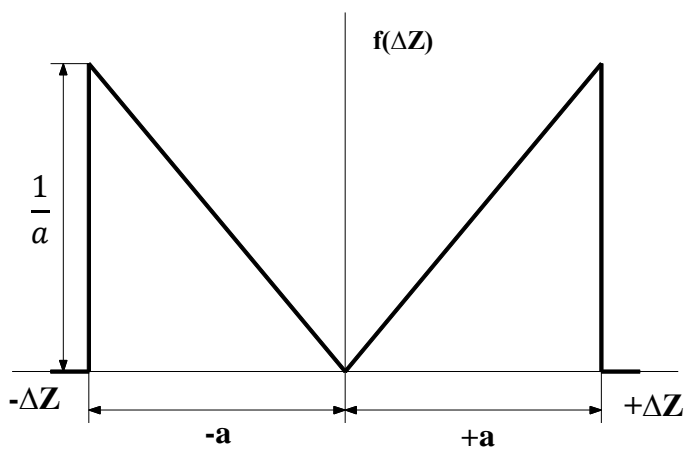
$Z_{\max}$	$a$
$\chi$	$\sqrt{3} = 1,73$

Obr. 6 Rovnoměrné (pravoúhlé) rozdělení



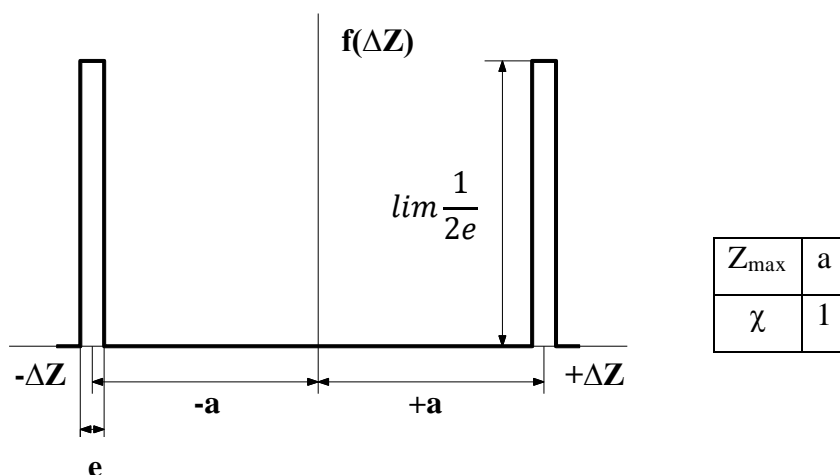
$Z_{\max}$	$a$
$\chi$	$\sqrt{6} = 2,45$

Obr. 7 Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení

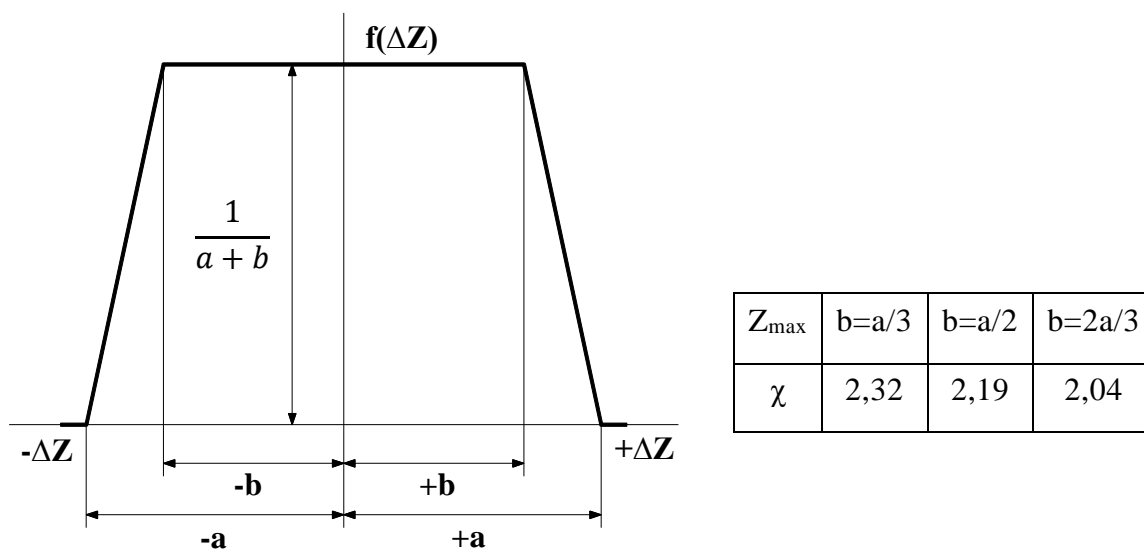


$Z_{\max}$	$a$
$\chi$	$\sqrt{2} = 1,41$

Obr. 8 Trojúhelníkové (bimodální) rozdělení



Obr. 9 Bimodální (Diracovo) rozdělení



Obr. 10 Lichoběžníkové rozdělení

kde:  $Z_{\max}$  - předpoklad rozložení chyb v intervalu

$\chi$  - koeficient statistického rozdělení pravděpodobnosti

## 5.6 Zdroje nejistot

Jako zdroje nejistot lze označit veškeré jevy, které nějakým způsobem ovlivňují neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření a tím vzdalují naměřenou hodnotu od skutečné. Některé ze zdrojů způsobují nejistotu typu A, některé typu B a mnohé se mohou projevit i v obou skupinách.

Nejčastější a nejzávažnější zdroje nejistot jsou [2]:

- nedokonalá, či neúplná definice měřené veličiny, popř. její realizace,
- nevhodný výběr přístroje (rozlišovací schopnost...), metody měření,
- nevhodný výběr vzorků měření,
- nevhodný postup při měření,
- nevhodné použití vztahů (závislostí) při vyhodnocování,
- nepřesnost použitých měř a měřicích přístrojů způsobené nejistotou kalibrace,
- neznámé vlivy prostředí,
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních,
- subjektivní vlivy obsluhy,
- další příčiny.

## 5.7 Důvody vyjadřování standardních nejistot

K vyjadřování standardních nejistot měření vedou zejména tyto důvody:

- určení nejistoty výsledku měření jako kvantitativního znaku jakosti,
- možnost jednotného posouzení jakosti výrobku,
- porovnání výsledku s referenčními hodnotami nebo normami, nebo porovnání z různých laboratoří, popř. v rámci vlastní laboratoře. Porovnání výsledků má praktický dopad v podobě možnosti zabránit dalšímu zbytečnému opakování chyb,
- porovnání prostých výsledků měření určitých různých vzorků nemusí prokázat samo o sobě rozdíly ve vlastnostech těchto vzorků nebo v provedení měření, pokud nemohly být rozdíly vyhodnoceny pomocí nejistot výsledků měření,
- určení hodnot jednotlivých složek poskytuje prostředky pro stanovení, zda kalibrační nebo zkušební postup použitého zařízení umožňuje přesné a správné měření a získání správných výsledků,
- jednotlivé složky nejistoty měření poukazují na aspekty zkoušky, které by měly být předmětem zlepšení kalibračních nebo zkušebních postupů.

Z konkurenčního hlediska představuje vyjadřování nejistot důležitou informaci pro uplatnění subjektu na světových trzích a zapojení se do mezinárodní spolupráce. Spolupráce na mezinárodní úrovni vyžaduje jednotnost a každá akreditovaná laboratoř musí mít vypracovaný konfirmační systém, kde nedílnou součástí tohoto systému představují také i nejistoty měření.[2]

## 6 Metodika vyjadřování standardních nejistot měření

### 6.1 Analýza vstupních podmínek

Podrobnou analýzou určíme cíl měření, zvážíme podmínky měření a závislost měřené veličiny na těchto podmínkách. Podle různých požadavků (přesnost výsledku, povaha posuzovaného výrobku, časové možnosti, předmět a rozsah akreditace apod.) pečlivě zvažujeme rozsah výběru, volbu měřicí metody a měřicí zařízení.

### 6.2 Matematický model zvolené metodiky

Volbou zvolené metodiky měření matematicky vyjádříme závislost měřené (výstupní) veličiny  $Y$  na vstupních veličinách  $X$  podle funkční závislosti:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad [-], \quad (5)$$

kde funkce  $f$  představuje postup a metodu měření a výstupní veličiny  $Y$  jsou stanovovány z více hodnot vstupních veličin  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

### 6.3 Identifikace a provedení všech významných korekcí

Určování nejistot korekcí představuje vyloučení známých systematických chyb a jejich nejistot z celkového souboru nejistot měření. Hrubé chyby musí být z měření vyloučeny, jelikož zcela zkreslují výsledek a systematické chyby by mely být dokorigovány. V optimálním případě by nejistota měření měla být vyjádřena mírou náhodných chyb měření a nejistotami odpovídajících korekcí.

### 6.4 Stanovení standardní nejistoty typu

**Standardní nejistota typu A ( $u_A$ ):**

Nejistoty typu A se stanovují statistickým zpracováním z  $n$  opakovaných ( $n \geq 10$ ) a nezávislých měření stejné hodnoty za stále stejných podmínek měření. Odhad naměřené hodnoty  $X$  je vyjádřen jako výběrový aritmetický průměr  $\bar{x}$  z naměřených hodnot podle vztahu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [-], \quad (6)$$

kde  $\bar{x}$  - výběrový (aritmetický) průměr,

$x_i$  -  $i$ -tý prvek náhodného výběru,

$n$  - celkový počet prvků.



**Odhad rozptylu**  $s^2(x_i)$  naměřených hodnot  $x_i$  označovaný jako výběrový rozptyl se stanoví ze vztahu

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad [-], \quad (7)$$

Nejlepší **odhad rozptylu**  $s^2(\bar{x})$  středních hodnot  $\bar{x}$  určíme ze vztahu

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad [-]. \quad (8)$$

Rozptýlení naměřených hodnot kolem výběrového průměru charakterizuje **výběrová (standardní) směrodatná odchylka**  $s$  jako druhá odmocnina z rozptylu.

Směrodatná odchylka naměřených hodnot  $x_i$  náhodného výběru:

$$s(x_i) = \sqrt{s^2(x_i)} \quad [-]. \quad (9)$$

Nejistotou typu A je pak zvolena **směrodatná odchylka výběrových průměrů**, kterou určíme podle výrazu

$$u_{AX} = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{s^2(x_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [\text{dB}]. \quad (10)$$

Je-li počet opakovaných měření menší než deset a není-li možné aplikovat vlastní odhad na základě zkušeností, výslednou nejistotu typu A určíme podle vztahu:

$$u_{AX} = k_s s(\bar{x}) \quad [\text{dB}], \quad (11)$$

kde  $k_s$  je koeficient závislý na počtu měření  $n$  podle následující tabulky

*Tab.6.4.1 Závislost koeficientu  $k_s$  na počtu měření*

Počet měření	9	8	7	6	5	4	3	2
Koeficient $k_s$	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

## 6.5 Stanovení standardní nejistoty typu B

### Standardní nejistota typu B ( $u_B$ ):

Tento typ nejistot se používá, je-li vstupní odhad veličiny určen jinak, než statistickou analýzou porovnání série opakovaných měření. Zdroje informací o těchto nejistotách mohou být zejména:

- informace z dříve provedených měření,
- údaje kalibračních certifikátů a jiné technické dokumentace,
- hodnoty nejistot údajů převzatých z příruček a manuálů,
- údaje výrobce,
- zkušenosti a obecné znalosti o problematice a další.

Při odhadu nejistoty typu B se postupuje takto:

1. odhadneme rozsah odchylek  $\pm\Delta Z_{\max}$  od jmenovité hodnoty tak, aby jeho překročení bylo málo pravděpodobné.
2. určíme, jakému druhu (tvaru) rozdělení pravděpodobnosti odpovídají odchylky  $\Delta Z$  v intervalu  $\pm\Delta Z_{\max}$ .
3. určíme nejistotu typu B jednotlivých zdrojů  $Z_j$  ze vztahu:

$$u_{BZ} = \frac{\Delta Z_{\max}}{\chi} \text{ [dB]}, \quad (12)$$

kde  $\chi$  závisí na druhu rozdělení, pro normální rozdělení je  $\chi = 2$  (95%), pro rovnoměrné rozdělení je  $\chi = 1,73$  a pro trojúhelníkové je  $\chi = 2,45$ .

### Postup určení nejistoty typu B

1. Vytipujeme možné zdroje nejistot  $Z_j$ ,
2. určíme standardní nejistoty těchto zdrojů  $u_z$  např. převzetím hodnot nejistot z technické dokumentace (certifikáty, kalibrační listy, technické normy, technické tabulky...) a přepočítají se odpovídající složky nejistoty měřené veličiny:

$$u_{xzj} = A_{xzj} * u_{zj} \text{ [dB]} \quad (13)$$

Hodnoty převodového (citlivostního) koeficientu se stanoví z následující závislosti:

$$X = f(Z_1, \dots, Z_j, \dots, Z_m) = f(Z) \text{ [-]} \quad (14)$$

použitím vztahu:

$$A_{xzj} = \frac{\partial X}{\partial z_j} [-], \quad (15)$$

kde  $z = [z_1, \dots, z_j, \dots, z_m]$  jsou aktuální hodnoty veličiny  $Z_j$ .

Není-li známa závislost  $X = f(Z)$ , stanoví se  $A_{xz}$  experimentálně změřením hodnoty  $\Delta x_{zj}$  při malé změně  $\Delta z_j$  a dosadí se do následujícího vztahu:

$$A_{xzj} \approx \frac{\Delta x_{zj}}{\Delta z_j} [-]. \quad (16)$$

Ke vztahu (15) se dospělo pomocí Taylorova polynomu zanedbáním členů vyšších řádů.

V případě, že  $u_{zj}$  je vyjádřené v hodnotách měřené veličiny, bude  $A_{xzj} = 1$ .

3. V dalším kroku, vedoucím ke stanovení nejistoty typu B pro přímá měření, by se měla posoudit možnost korelace mezi jednotlivými zdroji nejistot typu B. Bude-li posouzení kladné, odhadneme korelační koeficienty  $r_{zjk}$  z intervalu  $\langle -1 ; 1 \rangle$ .
4. V posledním kroku se pak provede sloučení přepočítaných složek nejistot jednotlivých zdrojů na výslednou nejistotu  $u_{BX}$ . Vezmeme-li v úvahu Gaussův zákon šíření nejistot (zpravidla se používá), potom vztah pro  $u_{BX}$  bude vypadat takto:

$$u_{BX} = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_{xzj}^2 * u_{zj}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{xzj}^2} \quad [\text{dB}]. \quad (17)$$

## 6.6 Stanovení kombinované (celkové) nejistoty

Kombinovaná standardní nejistota  $u_{CX}$  vyjadřuje míru nejistoty výsledku, který získáme z řady dalších veličin.

Tuto nejistotu určíme ze vztahu:

$$u_{CX} = \sqrt{u_{AX}^2 + u_{BX}^2} [\text{dB}]. \quad (18)$$

## 6.7 Stanovení rozšířené nejistoty

Rozšířená nejistota  $U$  je standardní nejistota vynásobená koeficientem rozšíření  $k_u$  podle vztahu:

$$U = k_u * u_{CX}[\text{dB}]. \quad (19)$$

Doporučuje se volit  $k_u = 2$ , což odpovídá pravděpodobnosti pro normální rozdělení 95% podle Tab. 6.7.1.

*Tab.6.7.1 Koeficient rozšíření a jemu odpovídající pravděpodobnost*

Koeficient rozšíření $k_u$	Pravděpodobnost P
1	68%
2	95%
2,58	99%
3	99,7%

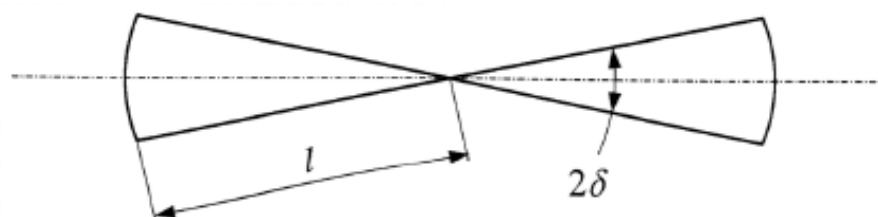
## 6.8 Prezentace výsledků

Konečný výsledek je vyjádřen ve tvaru  $X = \bar{x} \pm U(x) * \text{jednotka}$  a vyjadřuje to, že nejlepší odhad veličiny výstupní  $X$  je hodnota  $x$  v intervalu  $< \bar{x} - U(x) ; \bar{x} + U(x) >$  a tento interval obklopuje velkou část hodnot, které mohou být přisouzeny výstupní veličině s danou pravděpodobností. [2]

## 7 Antény použité k měření útlumu EMC laboratoře

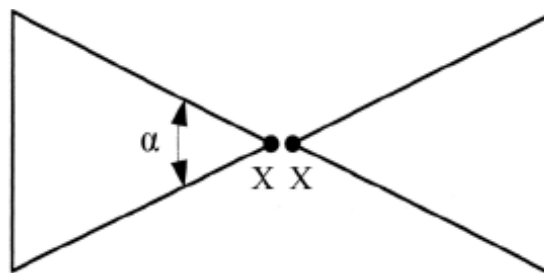
### 7.1 Bikónická anténa

Tato anténa je složena ze dvou souměrných kuželů umístěných proti sobě, a proto se také nazývá kuželový dipól a jeho tvar můžeme vidět na Obr. 11, kde  $l$  je délka kuželů na povrchu a  $2\delta$  je jejich povrchový úhel.



Obr. 11 Bikónická anténa (kuželový dipól), převzato z [4].

Další verzí této antény je trojúhelníkový (plochý) dipól, který se skládá z plochých trojúhelníkových vodičů se stejným vrcholovým úhlem  $\alpha$  a souměrným napájením v místech jejich vrcholů (body X) viz Obr. 12.



Obr. 12 Bikónická anténa (trojúhelníkový dipól), převzato z [4].

Bikónická anténa PMM BC-01

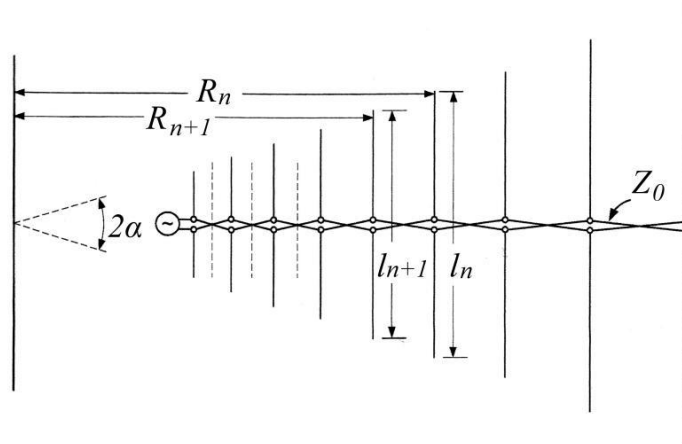
Kmitočtový rozsah: 30 MHz – 200 MHz

Vzhled bikónické antény BC-01, lze vidět na Obr. 28.

### 7.2 Logaritmicke-periodická anténa

Šířku frekvenčního pásma logaritmicke-periodické antény (LPDA), které chceme přijímat, nám určuje počet dipólů antény. Každý anténní prvek (resp. dipól) je tedy nastaven na

určitou přijímanou frekvenci a tato frekvence odpovídá jeho délce a vychází z poměru vlnové délky. Všechny dipóly společně tvoří výsledné přijímané kmitočtové pásmo. Anténa obsahuje dvě tzv. ráhna, na kterých jsou protější dipóly umístěny. Každý z dipólů je umístěn vždy na jiném ráhnu. Délka jednotlivých prvků na anténě logaritmicky roste směrem od nejkratšího dipólu. Napájení této antény je realizováno právě na tomto nejkratším dipólu.



Obr. 13 Konstrukční náčrt logaritmicko-periodické antény, převzato z [4].

kde:  $R_{n+1}$  - vzdálenost příslušného anténního prvku od pomyslného vrcholu antény,  
 $R_n$  - stejná vzdálenost pouze pro delší prvek, který následuje,  
 $l_{n+1}$  - délka příslušného anténního prvku,  
 $l_n$  - délka většího anténního prvku, který následuje.

Logaritmicko-periodická anténa PMM LP-02

Kmitočtový rozsah: 200 MHz – 3 GHz

Vzhled antény LP-02 lze vidět na Obr. 27.

### 7.3 Širokopásmová bikónicko-logaritmicko-periodická anténa

Tento typ antény vznikl kombinací bikónické a LPDA antény tak, aby byl schopen pokrýt celý rozsah nejpoužívanějšího frekvenčního pásma, což je pro měření elektromagnetického záření pásmo od 30 MHz až do několika GHz. Jak je patrné z popisu předchozích dvou druhů antén, tak bikónická anténa pokrývá nižší frekvenční pásmo (do 200-300 MHz) a LPDA anténa pokrývá vyšší frekvence (od 200 MHz).

Kombinovaná anténa Frankonia BTA-M

Kmitočtový rozsah: 30 MHz – 3 GHz

Vzhled antény BTA-M lze vidět na Obr. 27 nebo Obr. 28..

## 8 Praktická část

V praktické části jsou řešeny dva problémy. Jako první byla stanovena výsledná nejistota ostatních vlivů, k čemuž bylo zapotřebí provést měření útlumu používaných kabelů a měření útlumu zkušebního stanoviště (částečně bezodrazové komory). Z těchto dvou hodnot jsme schopni určit výslednou hodnotu nejistoty ostatních vlivů, která je uvedena v kalibračních listech, ale byla doposud pouze odhadovaná. Pomocí této hodnoty jsme byli schopni určit výslednou nejistotu použitých měřicích řetězců v laboratoři EMC, což by měl být hlavním přínosem této práce.

### 8.1 Měření útlumu kabelů

Realizací toho měření chceme stanovit hodnotu útlumu používaných kabelů pro tento typ měření. Měření bylo prováděno pomocí tří spektrálních analyzátorů a byly měřeny dva typy používaných kabelů. První kabel značený jako K1, byl kabel typu RG213U délky 5 metrů a druhý kabel K2, byl kabel ECOFLEX10 délky 11metrů. Všechny kabely byly zakončeny konektory typu N.

Jako první spektrální analyzátor byl použit EMI přijímač Rohde & Schwarz ESR7 se dvěma vstupy s frekvenčním rozsahem 30 MHz až 6 GHz. Měření bylo provedeno pro dva frekvenční rozsahy. Jako první byl nastaven rozsah 30 MHz - 1000 MHz a jako druhý rozsah 1 GHz - 6 GHz a pro každý z nich byl změřen útlum obou dvou kabelů. Ukládané grafické průběhy z tohoto analyzátoru byly zobrazeny pomocí 691 bodů.

Jako druhý spektrální analyzátor byl použit analyzátor Agilent ESA-L E4411B, který měl oproti předchozímu spektrálnímu analyzátoru pouze jeden vstup a jeho frekvenční rozsah byl do 1,5 GHz. Volené frekvenční rozsahy pro měření útlumu kabelů byly poté 30 MHz - 1000 MHz a 1 GHz - 1,5 GHz. Ukládané grafické průběhy z tohoto analyzátoru byly zobrazeny pomocí 401 bodů.

Jako třetí byl použit spektrální analyzátor Agilent ESA-E E4402B. Tento spektrální analyzátor měl k dispozici jeden vstup s frekvenčním rozsahem 30 MHz - 1000 MHz a 1 GHz - 3 GHz. Ukládané grafické průběhy z tohoto analyzátoru byly zobrazeny pomocí 401 bodů.

Mezi výstup generátoru SA a vstup SA byl připojen měřený kabel a měřená data byla uložena do PC pomocí GPIB sběrnice, viz Obr. 14.

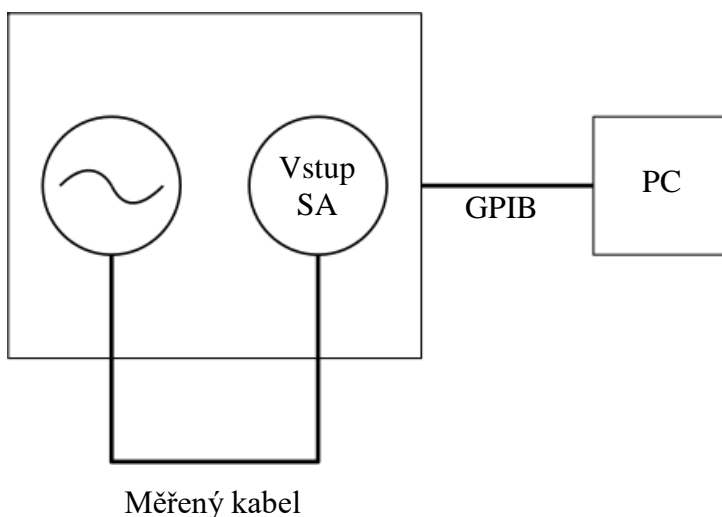
### 8.1.1 Postup měření

Při měření útlumu samotných kabelů byl připojen kabel přímo ke spektrálnímu analyzátoru. Na spektrálním analyzátoru bylo potřeba nastavit frekvenční rozsah, šířku pásma a počet bodů pro grafické zobrazení. Šířka pásma mezifrekvenčního filtru byla v tomto případě  $RBW = 100 \text{ kHz}$  pro frekvenční rozsah  $30 \text{ MHz} - 1000 \text{ MHz}$  a  $RBW = 1 \text{ MHz}$  pro frekvenční rozsah od  $1 \text{ GHz}$ . Po nastavení potřebných hodnot na spektrálním analyzátoru byl spuštěn rozmítaný generátor s hodnotou výstupní úrovně  $-20 \text{ dBm}$ . Dále byl každý z kabelů měřen dvěma různými metodami.

Jako první způsob byl nejprve připojen krátký normalizační kabel pro stanovení útlumu  $-20 \text{ dBm}$  a zaznamenány hodnoty pomocí spektrálního analyzátoru. Poté byl tento kabel nahrazen měřeným kabelem a opět došlo k zaznamenání hodnot spektrálním analyzátozem. Takto bylo provedeno měření obou frekvenčních rozsahů a pro každý z měřených kabelů. Výsledná hodnota se určí jako rozdíl útlumu měřeného kabelu a útlumu normalizačního kabelu.

Při druhém způsobu měření útlumu kabelů byla normalizační úroveň nastavena přímo na spektrálním analyzátoru, k němuž byl připojen rovnou měřený kabel. Oproti předešlé metodě byl naměřený výsledek zároveň výsledný útlum bez dalšího dopočítávání pomocí normalizačního kabelu. Tento postup byl také proveden pro oba frekvenční rozsahy pro každý z měřených kabelů.

### 8.1.2 Schéma zapojení

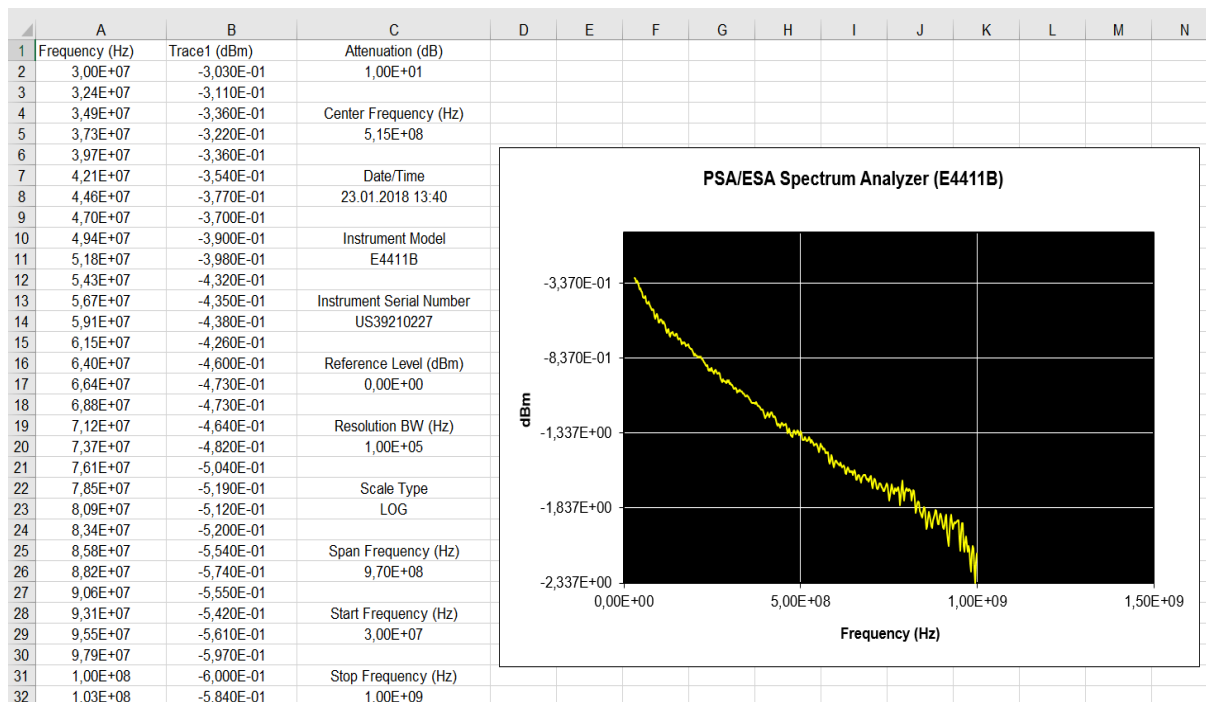


*Obr. 14 Schéma zapojení pro měření útlumu kabelů*



### 8.1.3 Naměřené výsledky útlumu kabelů

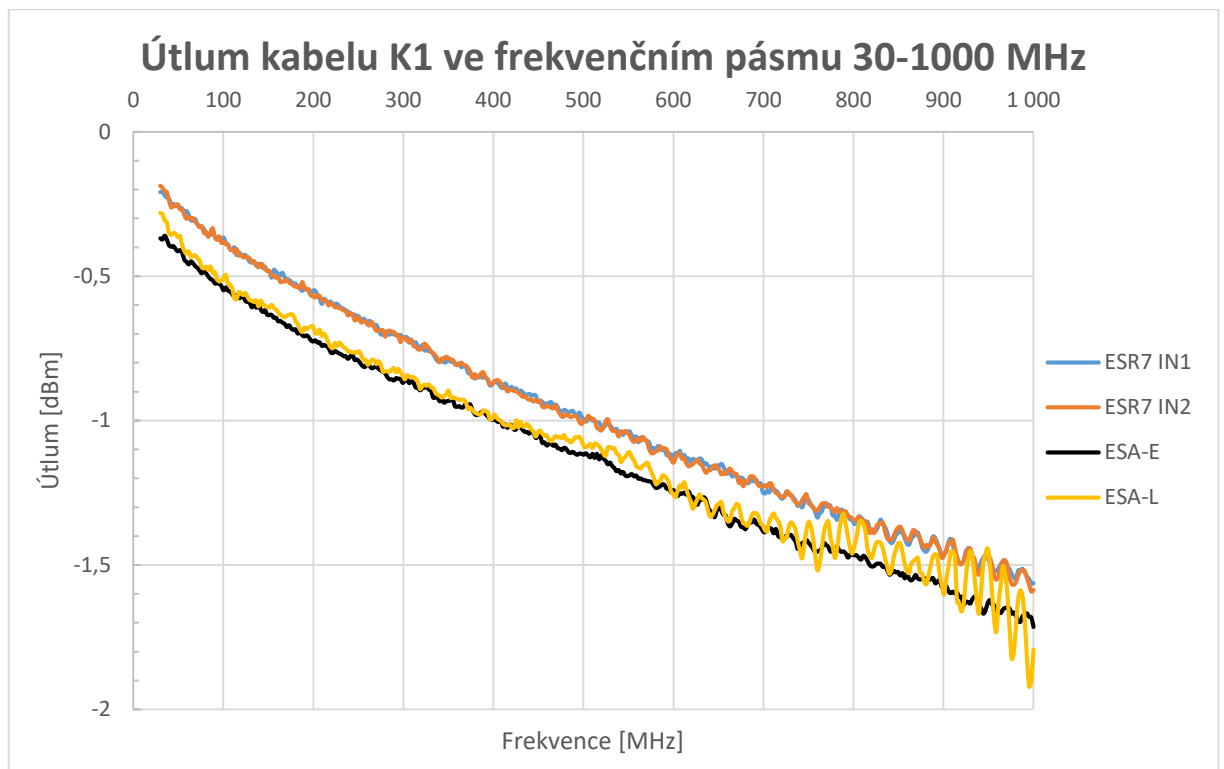
Příklad výsledku měření SA Agilent ESA-L E4411B v aplikaci MS Excel:



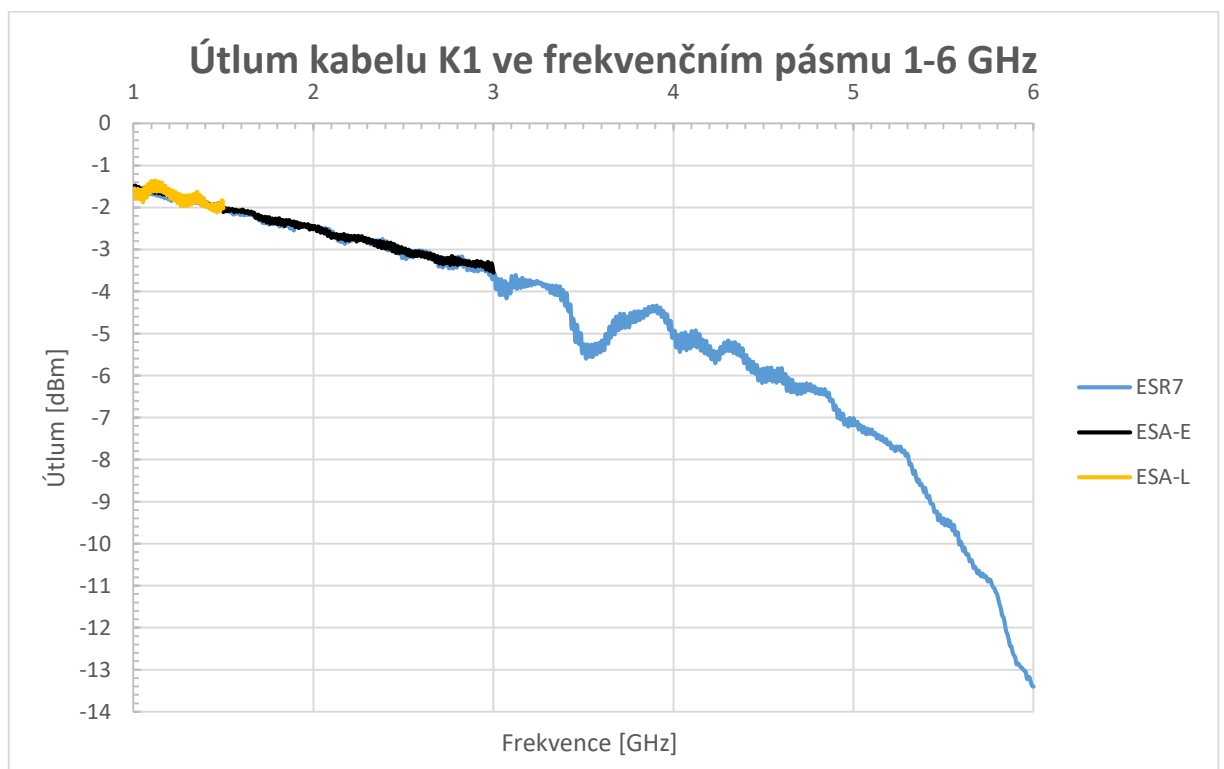
Obr. 15 Příklad výsledku měření spektrálního analyzátoru

Hodnoty útlumu kabelu K1 a K2 byly měřeny dvěma různými způsoby, jak již bylo popsáno v postupu měření. Pro lepší názornost jsme tyto hodnoty zanesli do společného grafu. Každý graf obsahuje průběhy měřeného útlumu kabelu daným způsobem, pro dané frekvenční pásmo a pomocí všech spektrálních analyzátorů. Pomocí těchto naměřených hodnot jsme schopni určit nejistotu těchto dvou kabelů, která je určena jako nejistota typu A. Tento dopočet je popsán později v analýze naměřených hodnot.

### První způsob získání hodnot útlumu kabelu K1:

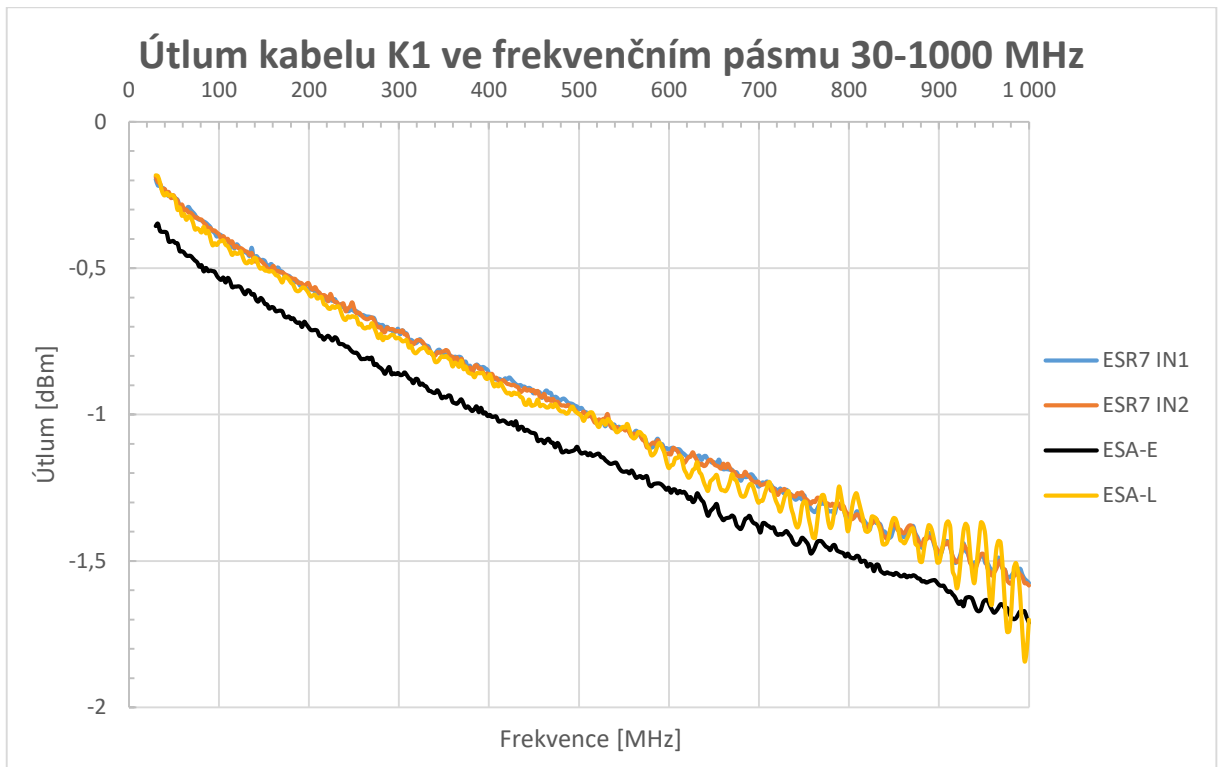


Obr. 16 Graf útlumu kabelu K1 měřený pomocí všech spektrálních analyzátorů

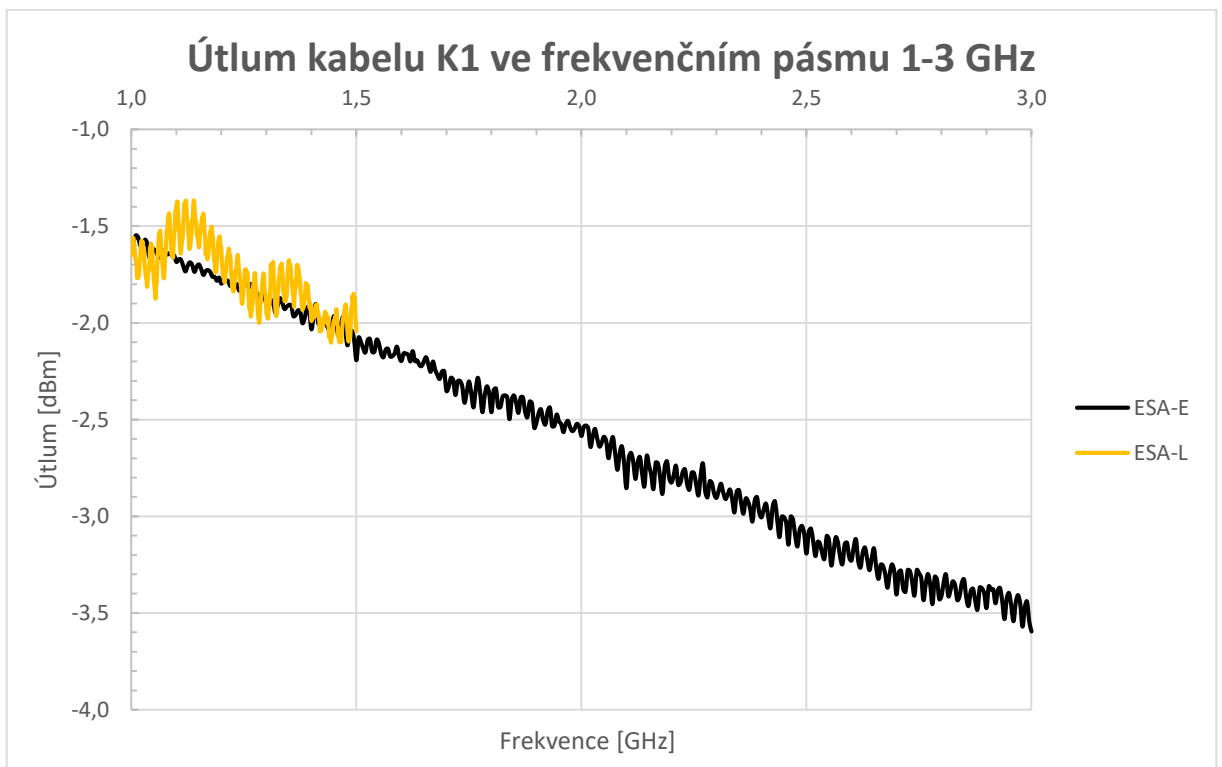


Obr. 17 Graf útlumu kabelu K1 měřený pomocí všech spektrálních analyzátorů

## Druhý způsob získání hodnot útlumu K1:

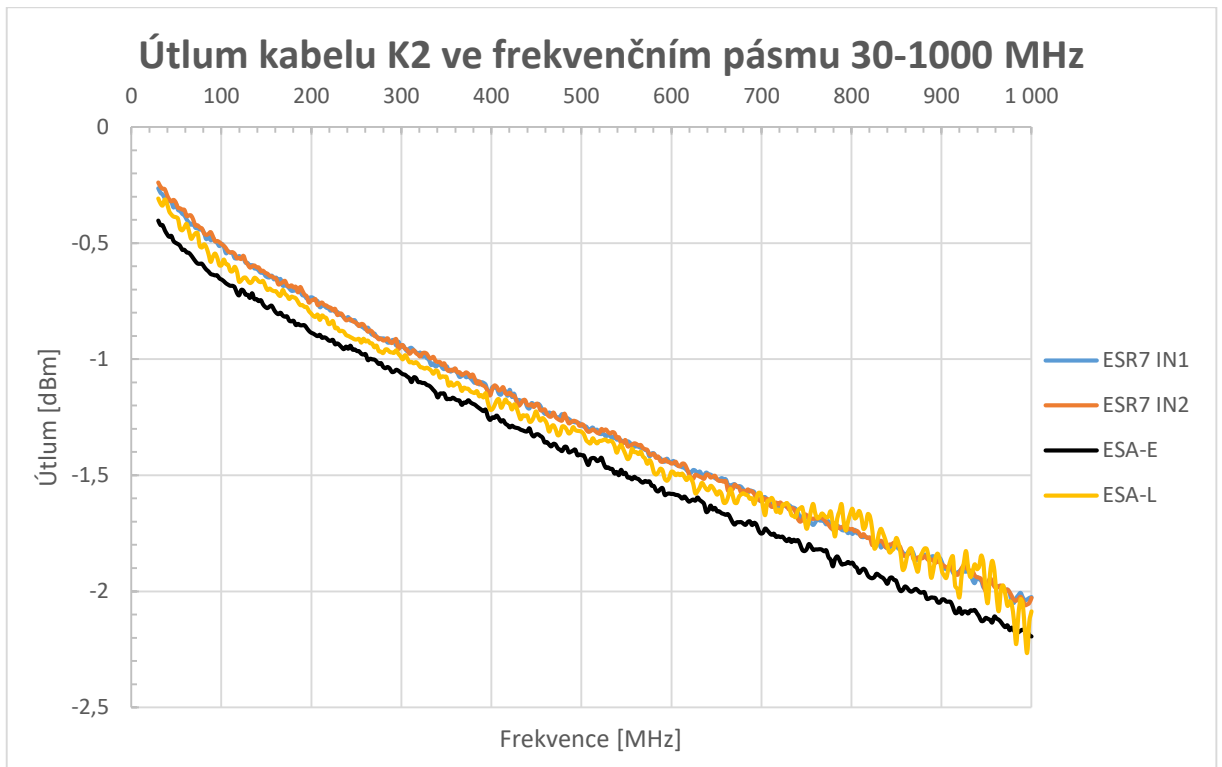


Obr. 18 Graf útlumu kabelu K1 měřený pomocí všech spektrálních analyzátorů

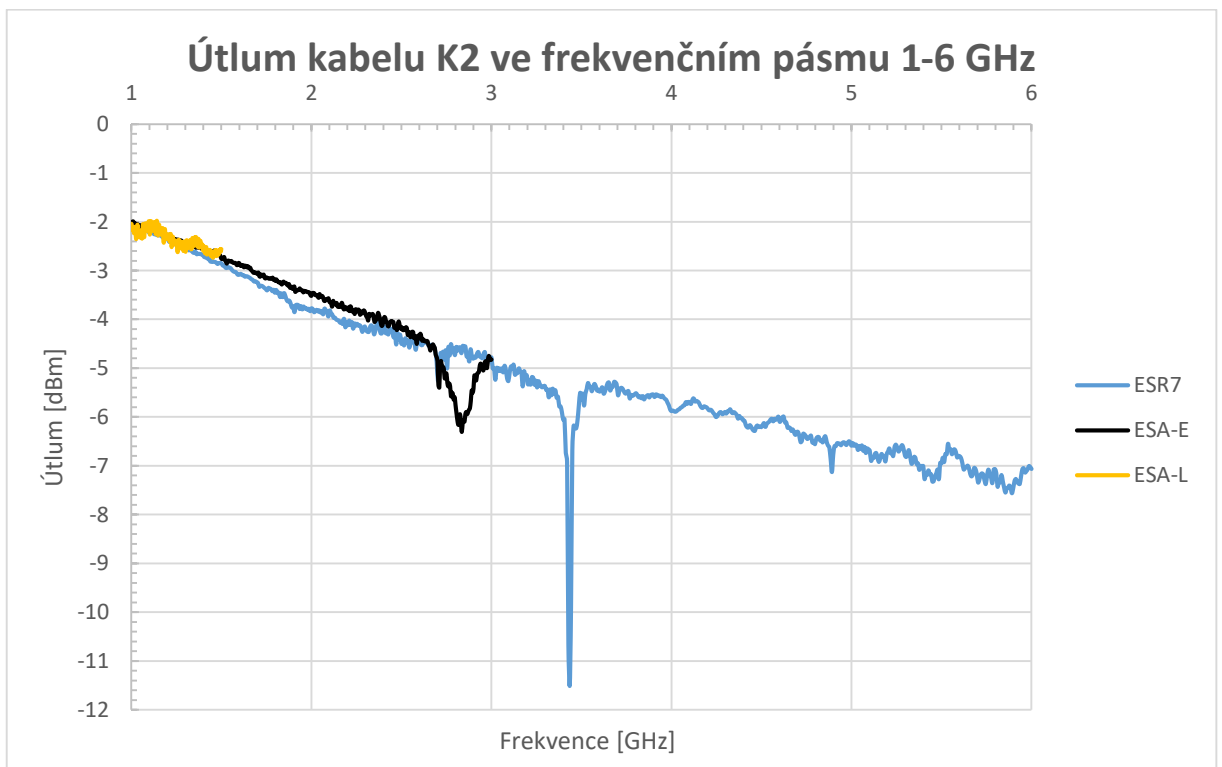


Obr. 19 Graf útlumu kabelu K1 měřený pomocí dvou spektrálních analyzátorů

**První způsob získání hodnot útlumu kabelu K2:**

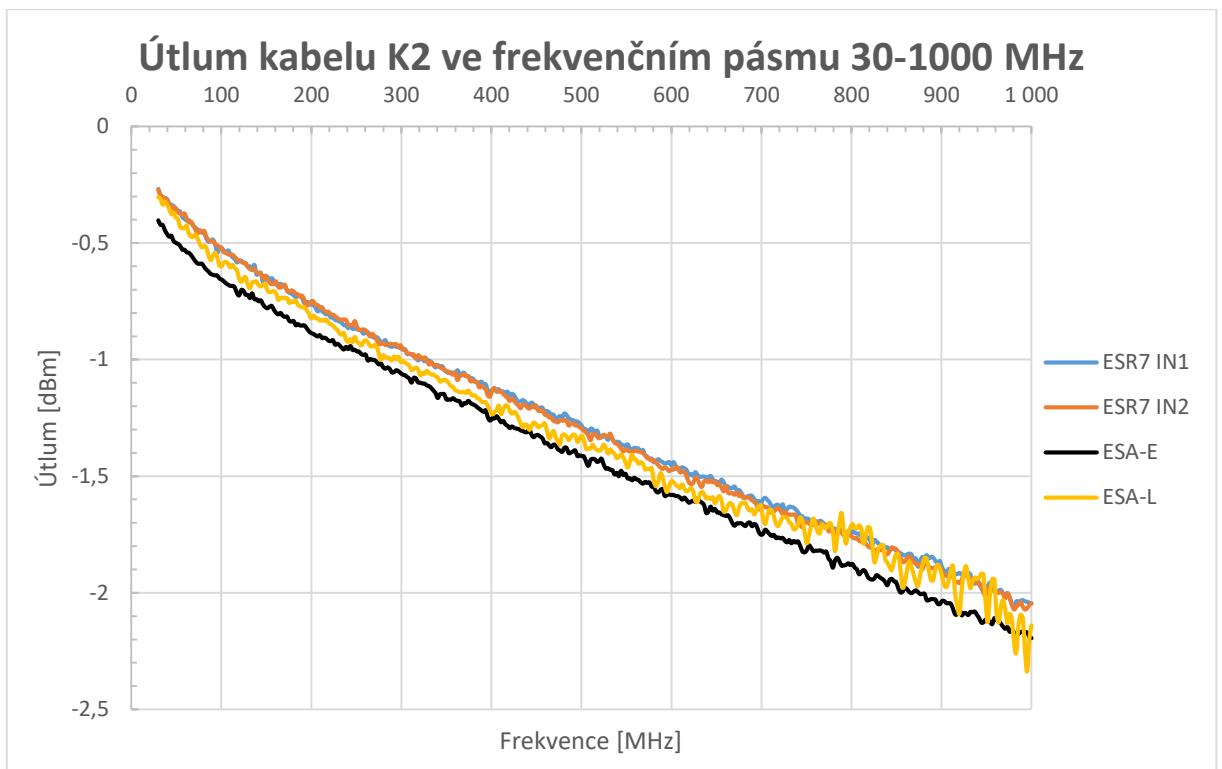


Obr. 20 Graf útlumu kabelu K2 měřený pomocí všech spektrálních analyzátorů

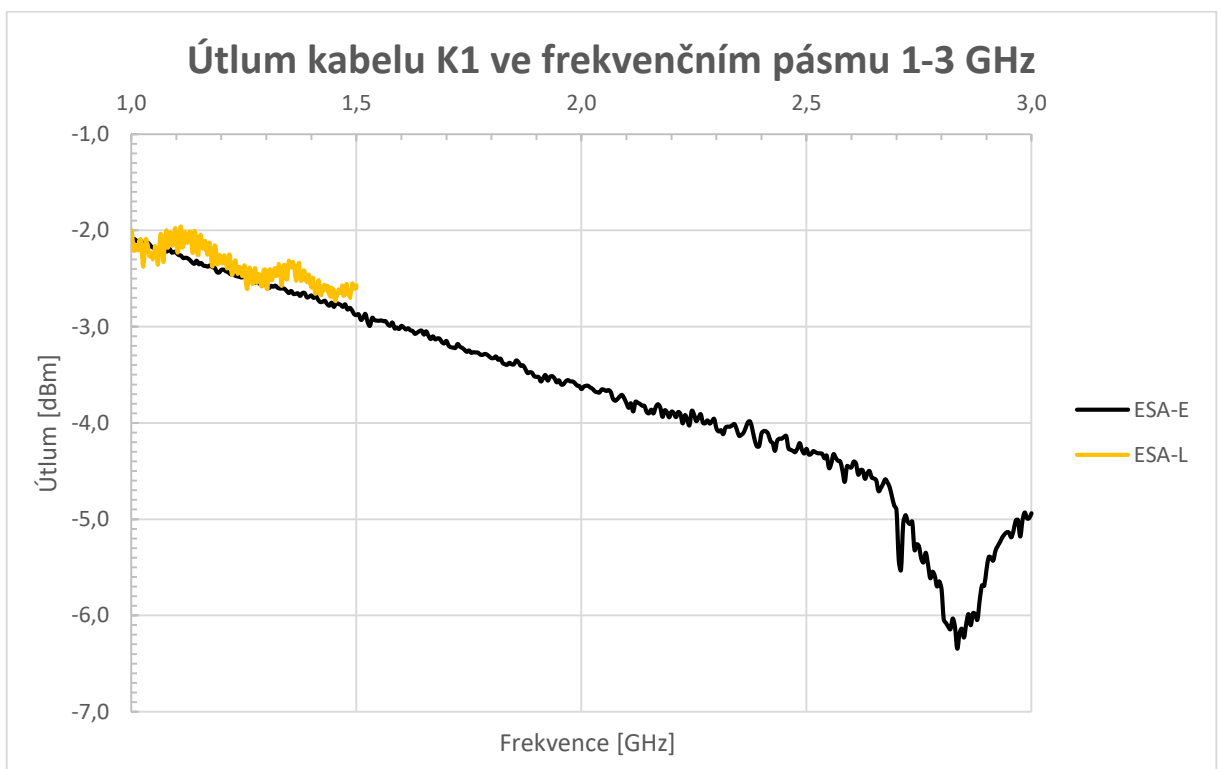


Obr. 21 Graf útlumu kabelu K2 měřený pomocí všech spektrálních analyzátorů

## Druhý způsob získání hodnot útlumu kabelu K2:



Obr. 22 Graf útlumu kabelu K2 měřený pomocí všech spektrálních analyzátorů



Obr. 23 Graf útlumu kabelu K2 měřený pomocí dvou spektrálních analyzátorů

## 8.2 Stanovení útlumu měřicího stanoviště

Jako první došlo k zaznamenání grafů útlumu propojovacích kabelů v kmitočtovém rozsahu 30 MHz – 1000 MHz. Pomocí těchto naměřených hodnot jsme mohli dopočítat výsledný útlum EMC laboratoře, který má být podle standardu ČSN EN 55016-1-4 ed.3 [6] maximálně  $\pm 4$  dB. Poté bylo potřeba provést výpočet nejistoty samotné EMC laboratoře, k čemuž bylo zapotřebí kalibračních listů všech použitých přístrojů měřicího řetězce. Z kalibračních listů bylo potřeba zjistit hodnoty nejistot pro každý prvek řetězce a započítat ho do výsledné nejistoty. Vztah pro výpočet nejistoty je uveden později v kapitole 9.

### 8.2.1 Určení nejistoty měřicího přijímače a snímačů rušivých signálů

Pro všechny přístroje jsou uvedené hodnoty standardních nejistot určených v souladu s dokumentem EA – 4/02 [8]. Uvedené rozšířené nejistoty měření jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu  $k$ , kde  $k = 2$  a odpovídá, tak pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 % pro normální rozdělení.

**U těchto přístrojů se udává přesnost  $a$ , a nejistota kalibrace  $u$ :**

#### **Přijímač**

- **Přesnost:**  $a_P$  je největší odchylka z kalibračního protokolu, nebo nejistota měření z datového listu.
- **Nejistota kalibrace:**  $u_P$  je udána v kalibračním protokolu.

#### **Antény, napěťové a proudové sondy**

- **Přesnost:**  $a_a$  odchylka je eliminována zadáním kalibrační charakteristiky do softwaru (SW).
- **Nejistota kalibrace:**  $u_a$  je udána v kalibračním protokolu.

#### **Ostatní prvky a zařízení**

- **Nespecifikovaná nejistota:**  $u_0$  odhad nejistoty stanoviště a dalších prvků měřicího řetězce.[8]

## 8.2.2 Měřicí pracoviště a použité přístroje

Částečně bezodrazová komora Frankonia, FEL ZČU v Plzni

Vysílací antény: -Bikónická anténa BC-01 s frekvenčním rozsahem 30 MHz - 200 MHz

-Logaritmicke-periodická anténa LP-02 s frekvenčním rozsahem 200 MHz - 3 GHz

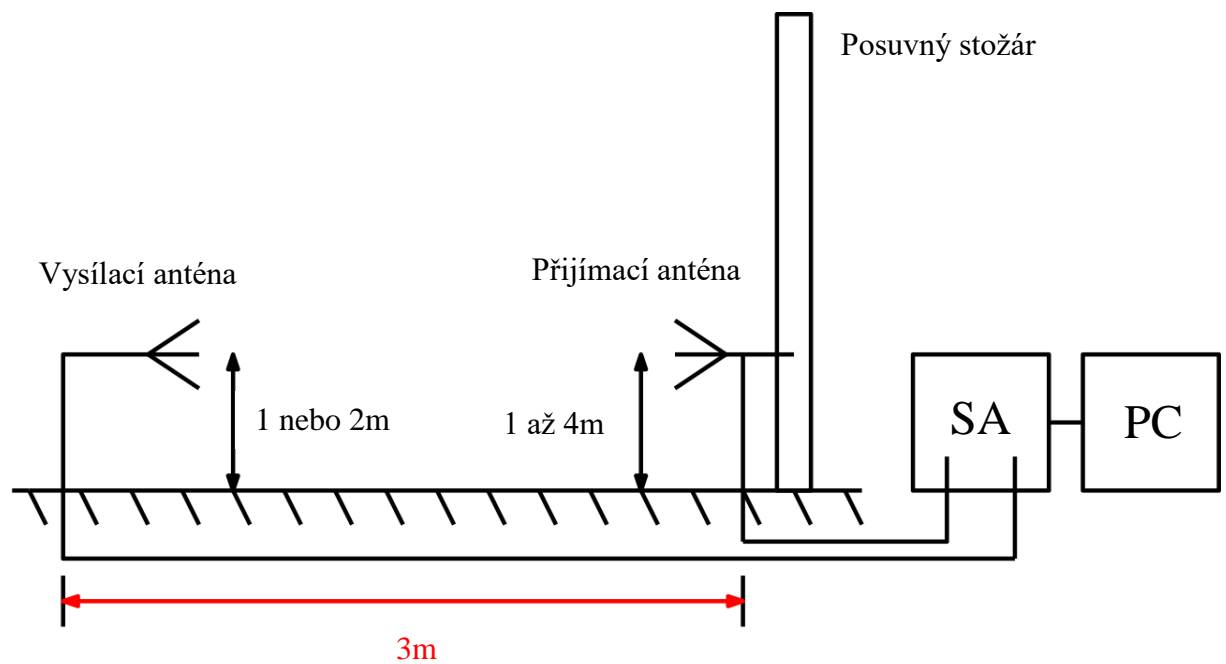
Přijímací anténa: -anténa na pohyblivém stožáru od firmy Frankonia BTA-M s frekvenčním rozsahem 30 MHz - 3 GHz

Spektrální analyzátor Agilent ESA-L E4411B

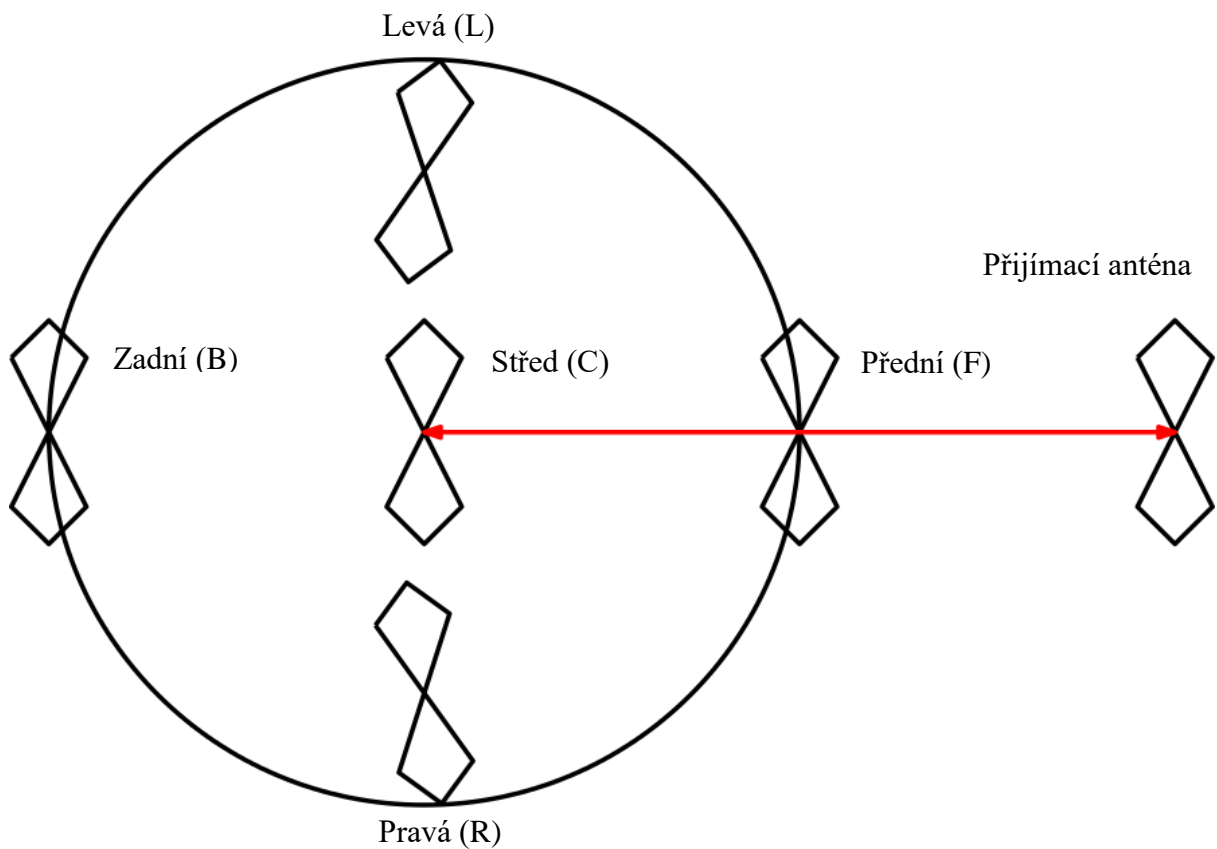
Spojovací kabely: -ECOFLEX 10 (8+3m)

-ECOFLEX 15

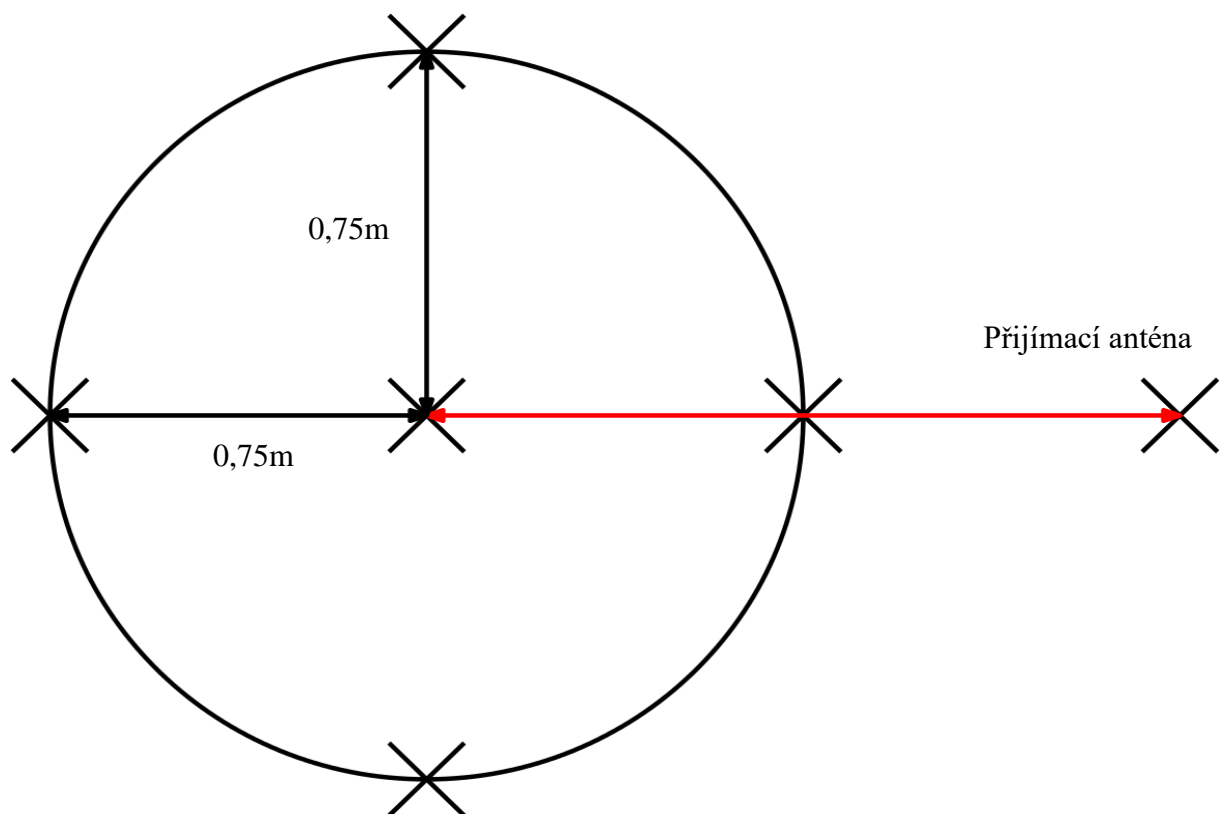
## 8.2.3 Schéma zapojení



Obr. 24 Obecné schéma zapojení pro měření útlumu EMC laboratoře



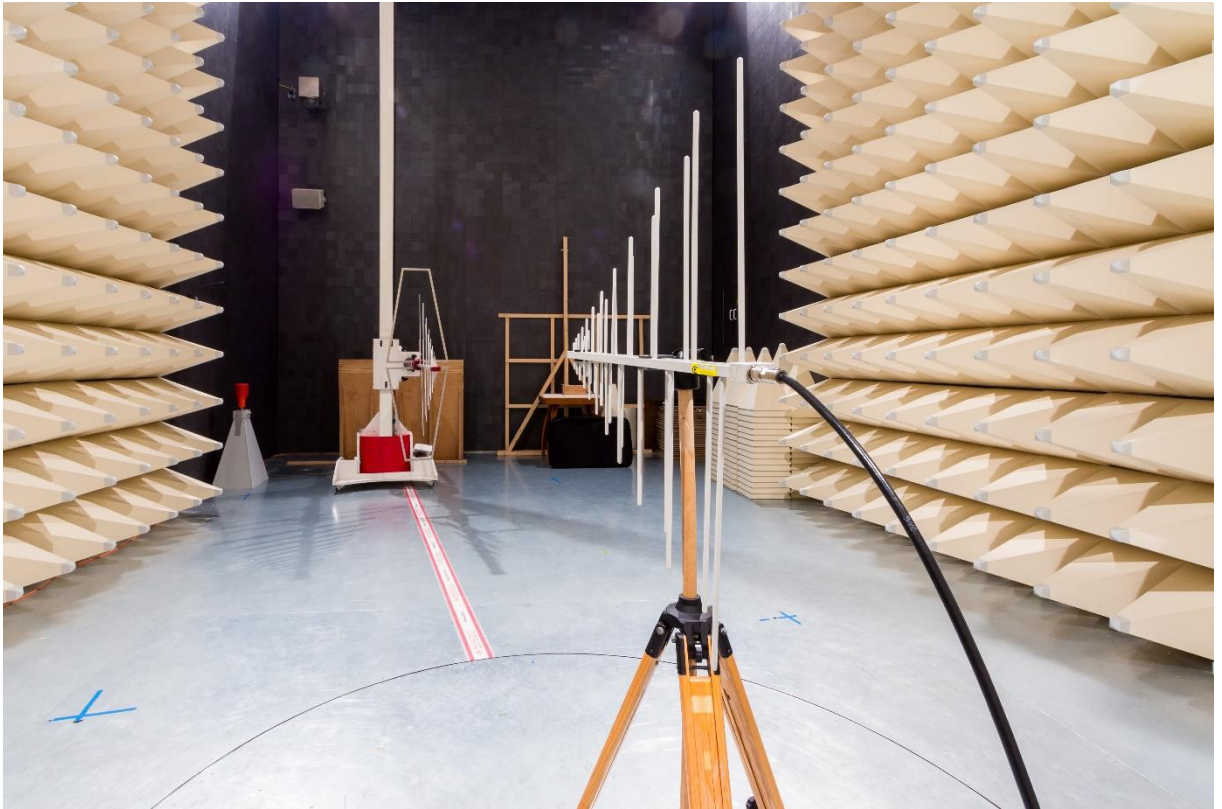
Obr. 25 Pozice horizontální vysílací antény pro měření útlumu EMC laboratoře



Obr. 26 Pozice vertikální vysílací antény pro měření útlumu EMC laboratoře



## 8.2.4 Ukázka zapojení v laboratoři EMC



*Obr. 27 Vertikální zapojení LPDA a BTA-M antény pro měření útlumu EMC laboratoře*



*Obr. 28 Horizontální zapojení bikónické a BTA-M antény pro měření útlumu EMC laboratoře*



*Obr. 29 Spojka pro propojení propojovacích kabelů*

### **8.2.5 Postup měření**

Celé měření probíhalo podle normy ČSN EN 55016-1-4 ed.3 [6], která definuje způsob, jakým provádět měření zkušebního stanoviště pro měření rušení šířeného zářením. Nejprve jsme nastavili software posuvného stožáru, kde jsme nastavili posun z výšky jednoho metru až do výšky čtyř metrů s indexem rychlosti 1 a krokem 0,1 m. Každý posuv stožáru a tím pádem i každé měření trvalo přibližně 4 min 40 s. Dále jsme pro každou anténu vyměřili její pozici na točně tak, aby její vzdálenost splňovala normované vzdálenosti od středu točny (0,75 m), stěn EMC laboratoře (vzdálenost od podlahy alespoň 25 cm a od okolních stěn a absorbérů alespoň 1 m) a vzdálenost mezi přijímací a vysílací anténou (3 m).

Pro toto měření byla jako přijímací anténa použita širokopásmová anténa BTA-M, která díky svému širokému frekvenčnímu rozsahu pokryla rozsahy obou vysílacích antén 30 MHz až 1 GHz. Tato anténa byla připevněna na posuvný stožár, který umožňoval plynulý vertikální pohyb z výšky 1 m do výšky 4 m s nastavitelnou rychlostí posuvu a také možností změny polarizace antény. Jako první probíhalo měření s bikónickou anténou BC-01 ve frekvenčním pásmu 30 MHz až 200 MHz. Šířka pásma mezifrekvenčního filtru spektrálního analyzátoru byla nastavena na  $RBW = 120\text{kHz}$ . Měření bylo provedeno pro horizontální polarizaci antény ve výšce 1 m a 2 m a pro vertikální polarizaci antény ve výšce 1 m a 1,5 m. Jako druhé probíhalo

měření s vysílací anténou LPDA LP-02 ve frekvenčním pásmu 200 MHz až 1GHz a šířkou pásma mezifrekvenčního filtru spektrálního analyzátoru stejnou, jako u předešlé antény. Vysílací anténa byla umístěna postupně v pěti pozicích a pro každou z nich bylo provedeno měření. Jedná se o pozice uprostřed (C), nalevo (L), napravo (R), před (F) a za středem točny (B) viz Obr. 25. Měření před a za středem točny bylo provedeno spíše experimentálně, jelikož nemůžeme hýbat posuvným stožárem dopředu a dozadu a tím dodržet normovanou vzdálenost 3 m mezi přijímací a vysílací anténou. Pro každou pozici bylo provedeno měření útlumu podle výše uvedené normy a byly zaznamenány naměřené hodnoty a následně jejich grafický průběh.

Během výměny vysílací antény bylo provedeno také měření samotných propojovacích kabelů bez antén pro oba frekvenční rozsahy. Právě tyto hodnoty byly později použity jako hodnoty  $V_{DIRECT}$  pro určení výsledného útlumu laboratoře.

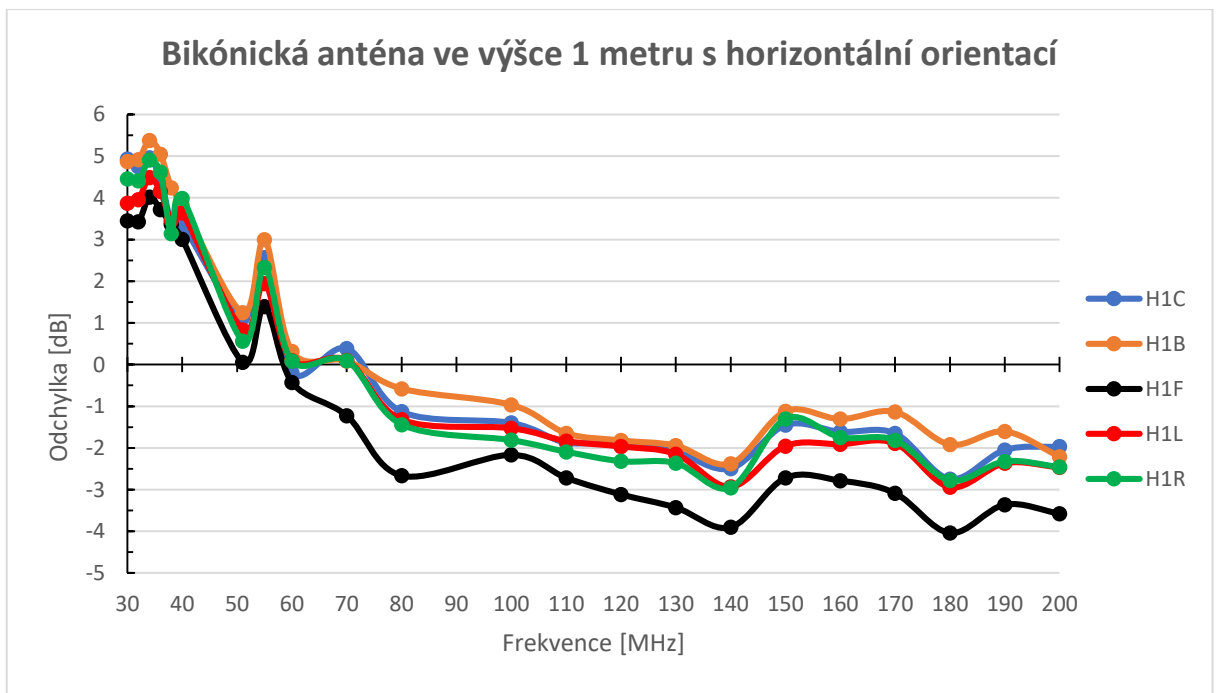
Poté bylo potřeba provést výpočet nejistoty měřícího pracoviště, k čemuž bylo zapotřebí kalibračních listů všech použitých komponent měřícího řetězce. Z kalibračních listů bylo potřeba zjistit hodnoty nejistot pro každý prvek řetězce a započítat ho do výsledné nejistoty. V tomto případě se výsledná nejistota skládá pouze z nejistoty typu B, jelikož nebylo provedeno více stejných měření.

## 8.2.6 Výsledné grafy útlumu EMC laboratoře

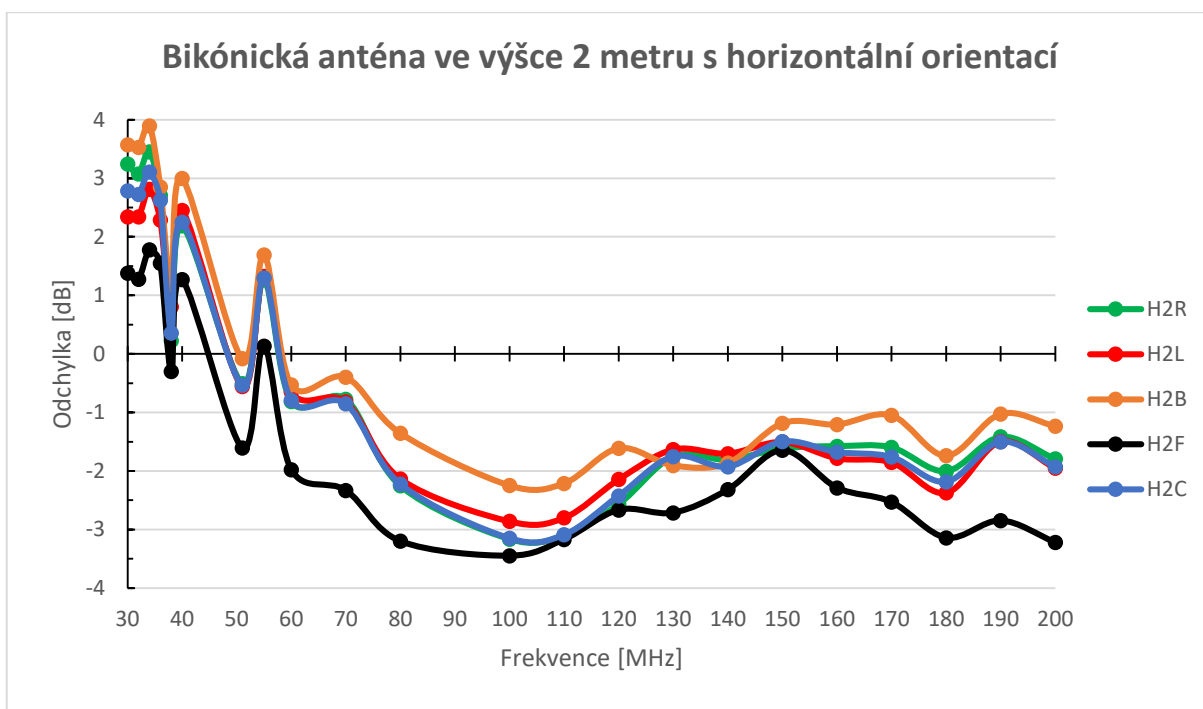
Značení průběhů viz následující Obr. 30: XYZ

X	Polarizace vysílací antény	H - Horizontální V - Vertikální
Y	Výška vysílací antény [m]	1 1,5 2
Z	Pozice vysílací antény	F= vepředu točny (F) B= vzadu na točně (B) R= vpravo na točně (R) L= vlevo na točně (L) C= uprostřed točny (C)

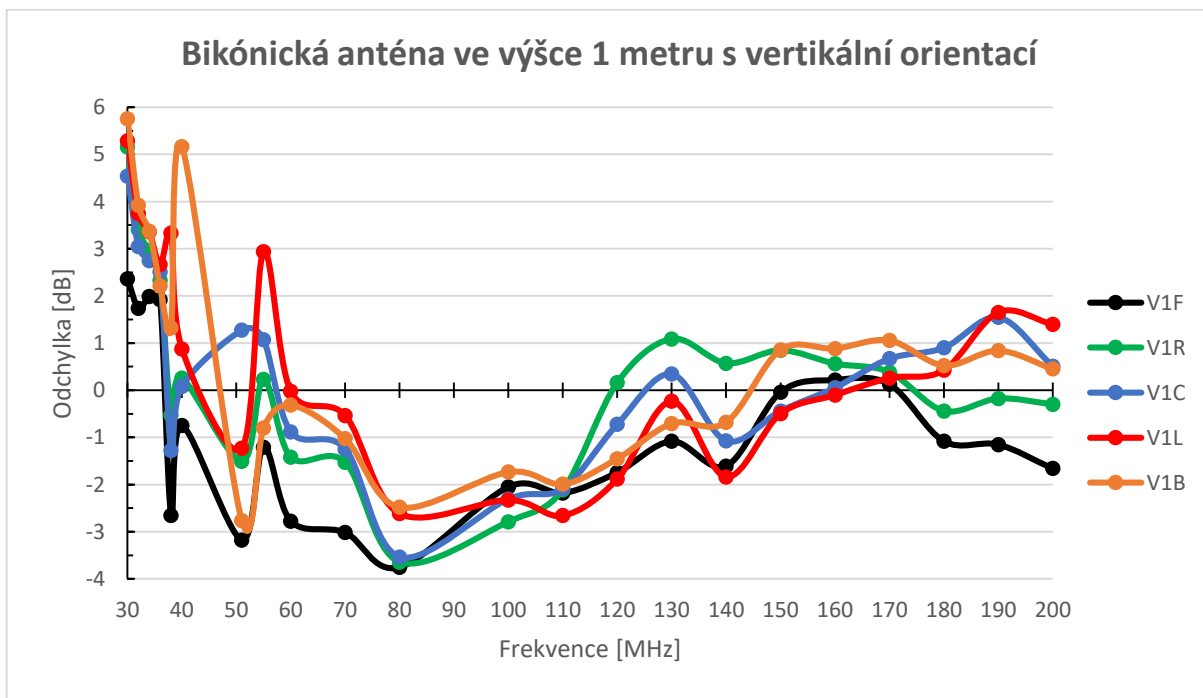
### 8.2.6.1 Bikónická anténa BC-01, 30 MHz – 200 MHz



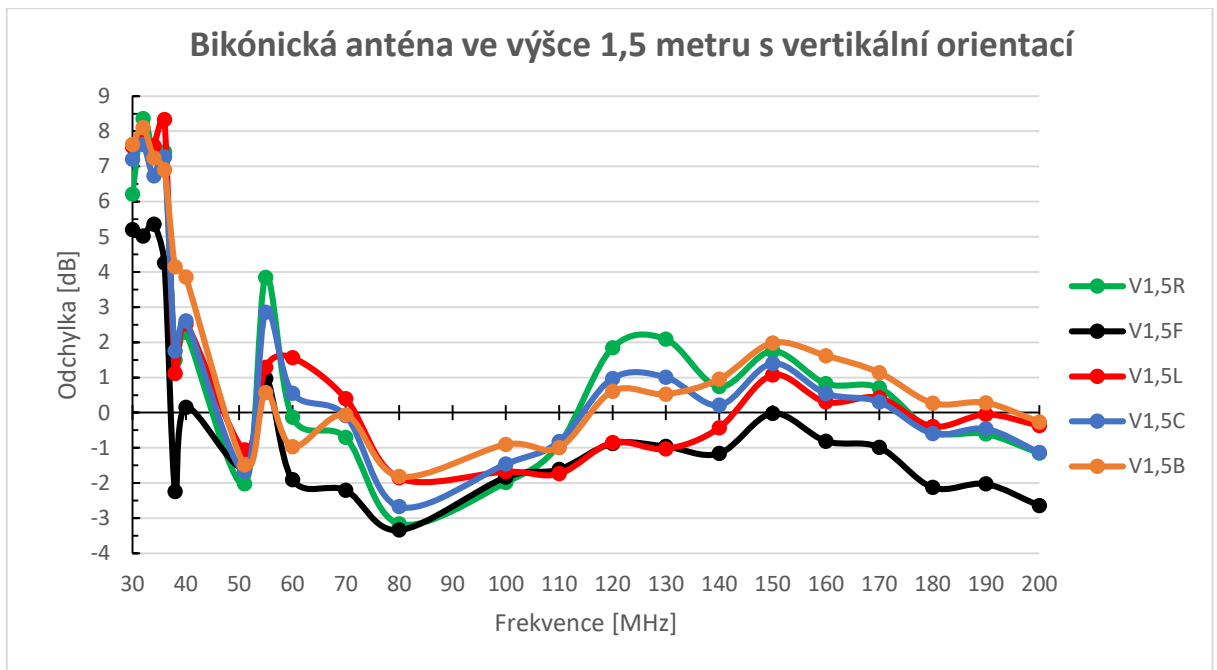
Obr. 30 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény



Obr. 31 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény

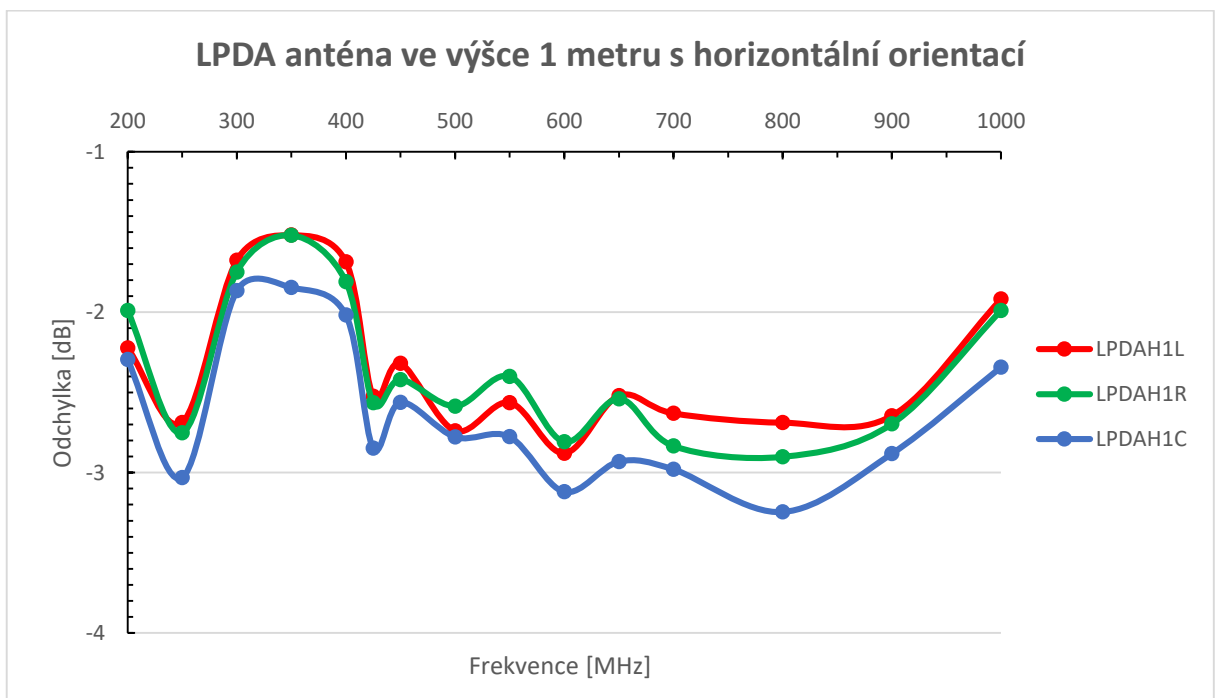


Obr. 32 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antén

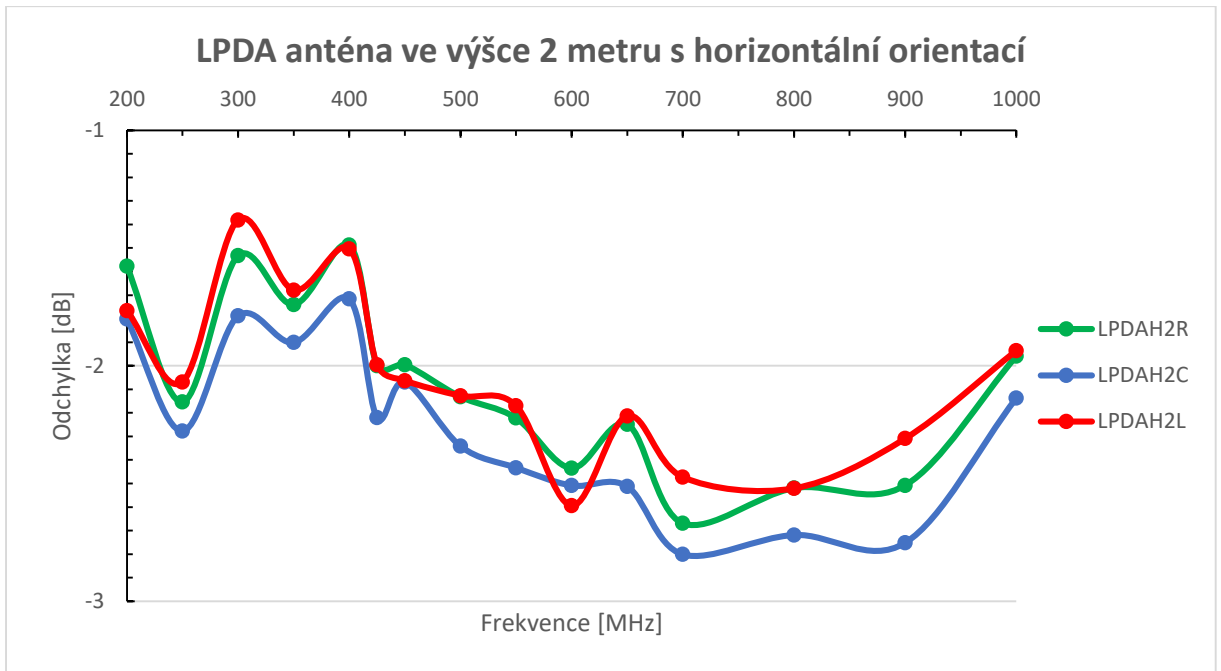


Obr. 33 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény

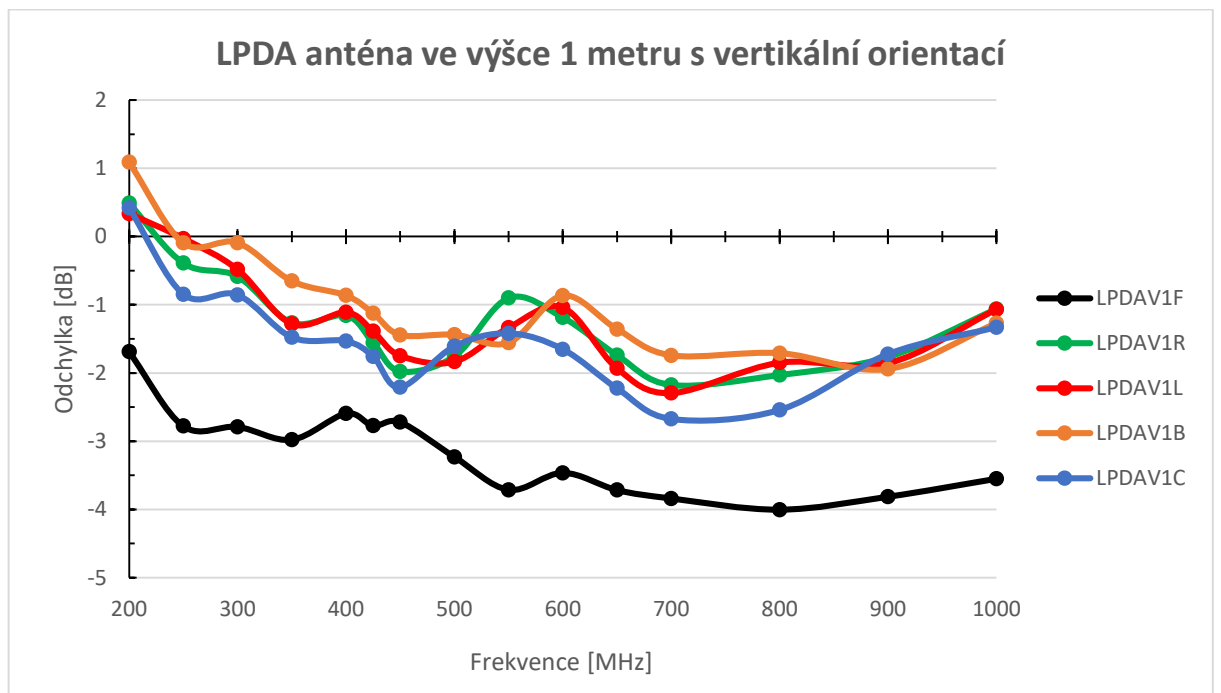
### 8.2.6.2 LPDA anténa LP-02, 200 MHz – 1 GHz



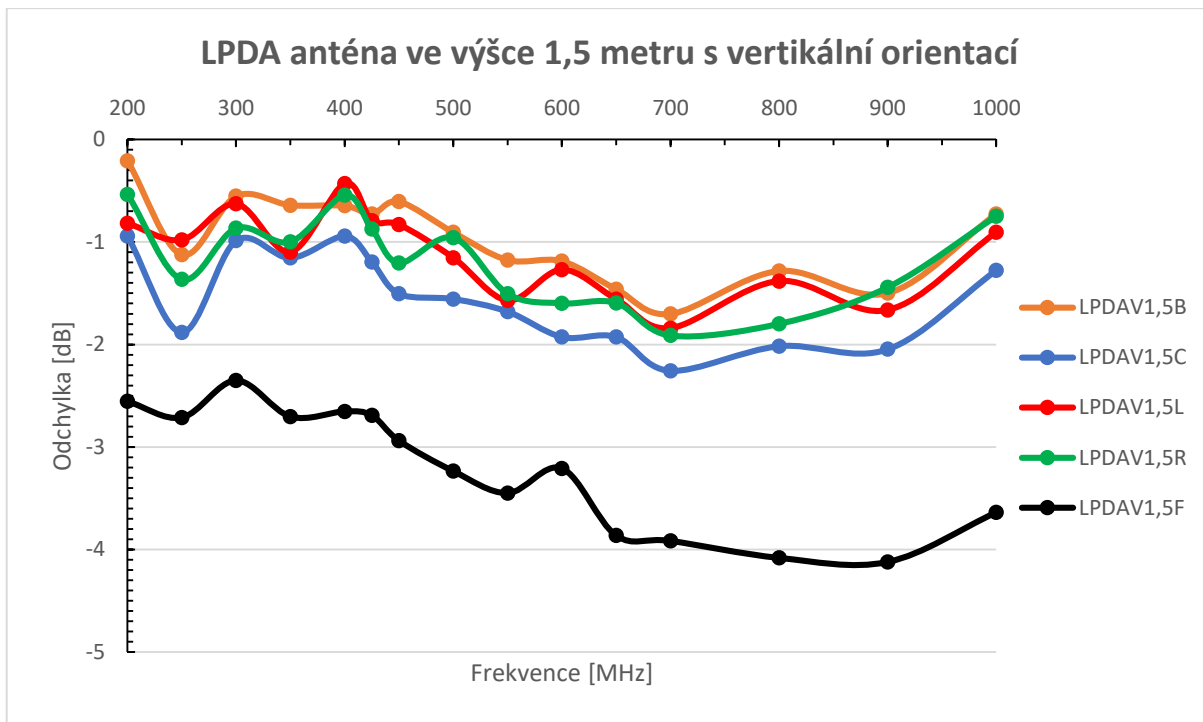
Obr. 34 Graf útlumu EMC laboratoře ve třech pozicích vysílací antény



Obr. 35 Graf útlumu EMC laboratoře ve třech pozicích vysílací antény

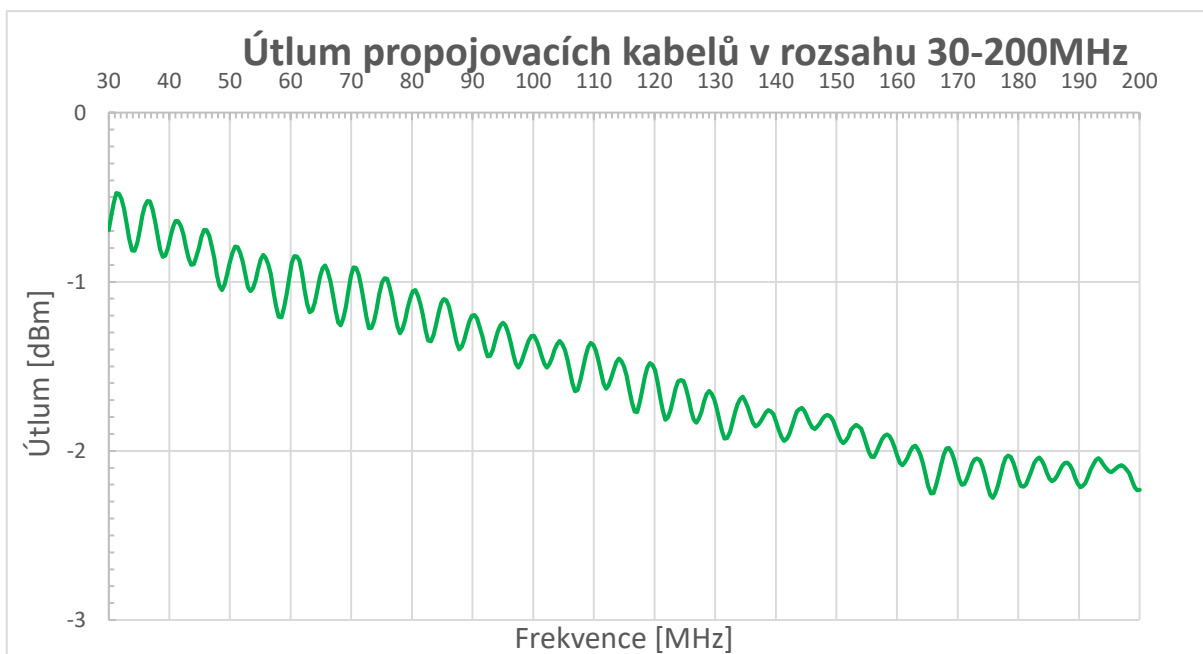


Obr. 36 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény



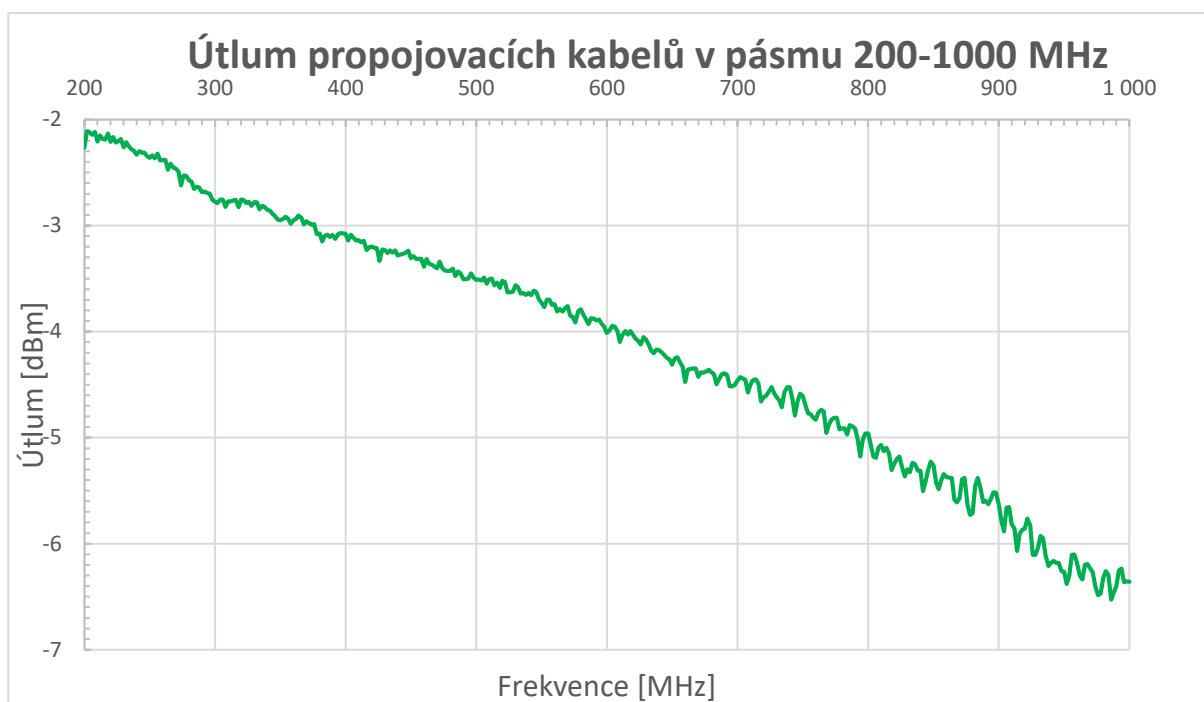
Obr. 37 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény

### 8.2.6.3 Měření útlumu propojovacích kabelů



Obr. 38 Graf útlumu propojovacích kabelů v rozsahu 30-200 MHz





*Obr. 39 Graf útlumu propojovacích kabelů v rozsahu 200-1000 MHz*

## 9 Analýza a zhodnocení dosažených výsledků

Měřením použitých kabelů jsme zaznamenali hodnotu jejich útlumu, viz příloha A, B a C. Z těchto hodnot jsme schopni určit jejich výslednou nejistotu. Tato hodnota tvoří část výsledné hodnoty ostatních vlivů  $u_0$ , kterou se snažíme stanovit. Druhou část této hodnoty tvoří nejistota měřicího stanoviště. Z kalibračních listů bylo potřeba zjistit hodnoty nejistot pro každý prvek řetězce a započítat ho do výsledné nejistoty. Z těchto dvou vypočtených nejistot můžeme vypočítat výslednou nejistotu ostatních vlivů  $u_0$ .

Dále došlo ke stanovení výsledné nejistoty použitých měřicích řetězců. Tato hodnota byla oproti měřením provedených v minulosti ovlivněna blíže určenou nejistotou  $u_0$ , což byl hlavní přínos této práce.

Jako poslední došlo k vyhodnocení kritéria, zda námi použité měřicí řetězce splňují kritérium dané normou.

### 9.1 Výpočet nejistoty kabelů

Pro kabel K1 i K2 jsme vytvořili tabulku z naměřených hodnot útlumu na frekvenci 500 MHz a 1,5 GHz. Pro každou z nich byla vypočtena výsledná nejistota. V tomto případě se jedná o nejistotu typu A. Z těchto čtyř výsledků byla vybrána nejvyšší hodnota, která byla poté použita pro určení výsledné nejistoty ostatních vlivů  $u_0$ . Z tabulek je vidět, že rozdíl mezi naměřenými hodnotami útlumu je minimální nebo se výsledky zcela shodují.

Tab. 9.1.1. Tabulka hodnot pro určení nejistoty kabelů

Číslo měření	Útlum K1 (500 MHz) [dBm]	Útlum K2 (500 MHz) [dBm]
1	1,00	1,29
2	1,00	1,28
3	1,12	1,41
4	1,09	1,31
5	0,98	1,28
6	1,00	1,30
7	1,12	1,41
8	1,00	1,33
aritmetický průměr	1,04	1,33
nejistota $u_A$	0,0255	0,023

Tab. 9.1.2. Tabulka hodnot pro určení nejistoty kabelů

Číslo měření	Útlum K1 (1,5 GHz) [dBm]	Útlum K2 (1,5 GHz) [dBm]
1	2,05	2,85
2	2,02	2,76
3	2,02	2,56
4	2,09	2,87
5	2,04	2,57
aritmetický průměr	2,04	2,72
nejistota $u_A$	0,0183	0,0934

Příklad výpočtu zvolené nejistoty:

$$u_{AX} = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{s^2(x_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{5(4-1)} * (2,85 - 2,72)^2 + (2,76 - 2,72)^2 + (2,56 - 2,72)^2 + (2,87 - 2,72)^2 + (2,57 - 2,72)^2} = 0,0667 \text{ dB}$$

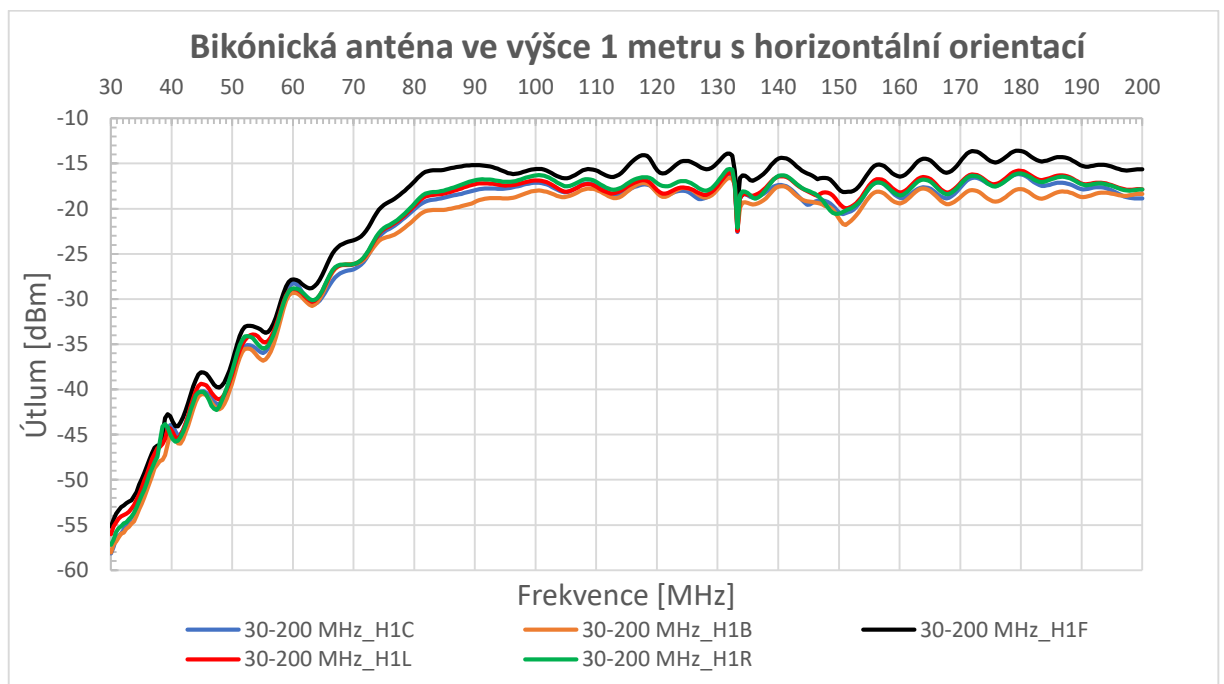
$$u_A = k_s * s(\bar{x}) = 1,4 * 0,0667 = 0,0934 \text{ dB}$$

## 9.2 Útlum a nejistota EMC laboratoře

Pro stanovení výsledného útlumu stanoviště jsme postupovali podle normy ČSN EN 55016-1-4 ed. 3 [6]. Postup tohoto měření byl popsán v kapitole 8.2. Pomocí obou antén byla graficky zaznamenána závislost útlumu na zvyšující se frekvenci, viz Obr. 40. Grafy všech měření jsou v této práci jako příloha D a E. Tuto naměřenou hodnotu bylo potřeba přepočítat z hodnoty dBm na hodnotu dB $\mu$ V. Stejný přepočet bylo potřeba použít také u naměřených hodnot propojovacích kabelů, viz Obr. 38 a 39. Z těchto dopočtených hodnot, dopočteného teoretického útlumu a dále hodnot získaných z kalibračních listů použitých antén jsme byli schopni určit výsledný útlum EMC laboratoře.

Jako poslední došlo ke stanovení výsledné nejistoty EMC laboratoře pomocí dat z kalibračních listů. V tomto případě se jedná o nejistotu typu B, jelikož nebyla provedena opakovaná měření.

**Příklad výsledku měření útlumu před přepočtem z dBm na dB $\mu$ V:**



*Obr. 40 Příklad grafu naměřených hodnot*

### Vztahy potřebné pro přepočítání dBm na dBμV:

Převod výkonové úrovně na výkon:

$$P[\text{dBm}] \Rightarrow P[\text{mW}] = 10^{\frac{P[\text{dBm}]}{10}} \quad (20)$$

Pomocí výkonu zjistíme napětí:

$$U[\text{V}] = \sqrt{50 * P[\text{W}]} \quad (21)$$

V poslední řadě přepočítání napětí na napěťovou úroveň:

$$U[\text{dB}\mu\text{V}] = 20 * \log \frac{U[\text{V}]}{1 * 10^{-6}} \quad (22)$$

Vztah pro stanovení teoretického útlumu EMC laboratoře je ve tvaru:

$$A_{\text{Ntheo}} = 20 \log\left(\frac{5 * Z_0 * d}{2\pi}\right) - 20 \log(f_M) \quad [\text{dB/m}] \quad (23)$$

kde:  $Z_0$  - impedance celého systému (50Ω)

$d$  - vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou (3m)

$f_M$  - frekvence v MHz

**Vztah pro stanovení výsledné hodnoty útlumu EMC laboratoře je ve tvaru:**

$$A_{\text{meas}} = V_{\text{direct}} - V_{\text{site}} - F_{aT} - F_{aR} - A_{\text{Ntheo}} \quad [\text{dB}] \quad (24)$$

kde:  $V_{\text{direct}}$  - útlum propojovacích kabelů viz Obr. 38 a 39 spojených pomocí kabelové spojky viz Obr. 29. Tato hodnota byla přepočtena na napěťovou úroveň,

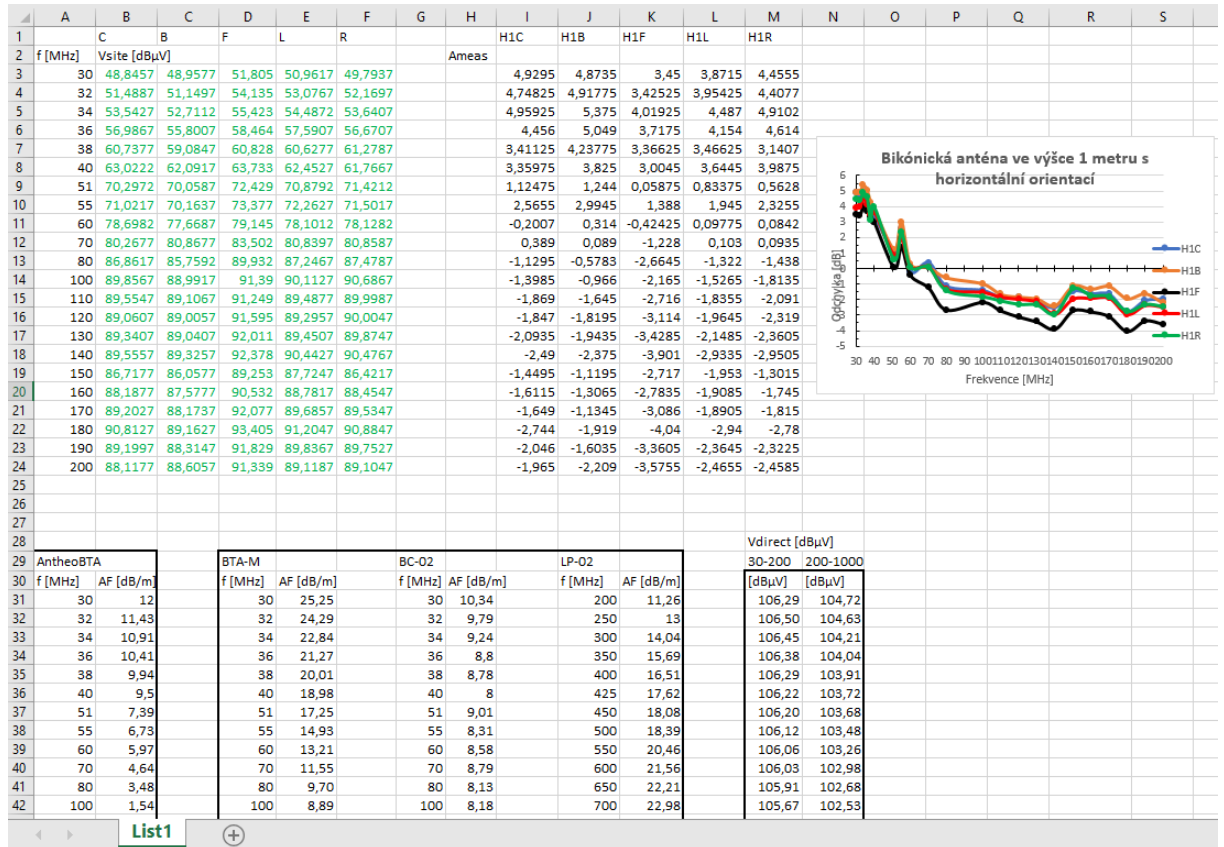
$V_{\text{site}}$  - úroveň měřena pomocí antén v EMC laboratoři a následně také přepočtena na napěťovou úroveň,

$F_{aT}$  - anténní faktor vysílací antény,

$F_{aR}$  - anténní faktor přijímací antény,

$A_{\text{Ntheo}}$  - hodnota dopočtená ze zapojení podle normy.

Ze všech těchto zjištěných a dopočtených hodnot byly vytvořeny výsledné grafy útlumu stanoviště. Pro rychlejší přepočítání hodnot byla vytvořena šablona v programu MS Excel, viz Obr. 41.



Obr. 41 Šablona obsahující všechny potřebné hodnoty pro určení výsledného útlumu EMC laboratoře

Příklad výpočtu hodnoty útlumu stanoviště H1C při frekvenci 100 MHz:

$$\begin{aligned}
 A_{meas} &= \frac{(V_{direct} - V_{site} - F_{aT} - F_{aR} - A_{Ntheo})}{2} = \\
 &= \frac{(105,67 - 89,85 - 8,89 - 8,18 - 1,54)}{2} = -1,39 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Pro stanovení nejistoty tohoto stanoviště bylo zapotřebí zjistit hodnoty nejistot jednotlivých prvků měřicího řetězce. Vždy jsme volili nejvyšší hodnotu nejistoty v námi měřeném rozsahu.

Tab. 9.2.1. Tabulka hodnot pro určení nejistoty stanoviště

	Rozšířená nejistota U
BC - 01 (30 MHz - 100 MHz)	3,54
LP - 02 (100 MHz - 300 MHz)	3,15
BTA - M (30 MHz - 100 MHz)	3,54
Agilent ESA - L	1,15

Výpočet nejvyšší možné nejistoty, která může vzniknout kombinací antén BTA-M a BC-01:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_{xzj}^2 * u_{zj}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{xzj}^2} = \sqrt{\left(\frac{3,54}{2}\right)^2 + \left(\frac{3,54}{2}\right)^2 + \left(\frac{1,15}{2}\right)^2} = 2,57 \text{ dB}$$

### 9.3 Výpočet výsledné nejistoty ostatních vlivů $u_0$

Tato nejistota se skládá ze dvou dílčích nejistot, a proto se výsledná nejistota určí jako kombinovaná nejistota těchto dvou.

$$u_0 = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,09^2 + 2,44^2} = 2,57 \text{ dB}$$

### 9.4 Výpočet výsledné nejistoty měřicích řetězců

Pro stanovení výsledné nejistoty je potřeba dohledat v kalibračních listech dílčí hodnoty nejistot a přesností každého prvku měřicího řetězce. Volíme nejvyšší hodnotu nejistoty každého prvku v námi měřeném rozsahu.

Vztah pro stanovení nejistoty měřicího řetězce EMC laboratoře je ve tvaru:

$$U = 2 * \sqrt{\frac{a_p^2}{3} + \left(\frac{u_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_0}{2}\right)^2} \quad (25)$$

kde:  $a_p$  - přesnost (nejvyšší odchylka přijímače z kalibračního listu)

$u_p$  - nejistota kalibrace přijímače

$u_a$  - nejistota kalibrace antény

$u_0$  - odhad nejistoty stanoviště a dalších prvků měřicího řetězce

### Kombinace 1

Přijímač ESU 8	$a_p = 1,66 \text{ dB}$	$u_p = 0,15 \text{ dB}$
Anténa BC-01 (30 MHz - 100 MHz)	$a_a = \text{eliminováno SW}$	$u_a = 2,20 \text{ dB}$
Ostatní vlivy		$u_0 = 2,57 \text{ dB}$
Rozšířená nejistota		$U_{\text{lab}} = 3,89 \text{ dB}$

$$U = 2 * \sqrt{\frac{a_p^2}{3} + \left(\frac{u_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_0}{2}\right)^2} = 3,89 \text{ dB}$$

### Kombinace2

Přijímač ESU 8	$a_p = 1,66 \text{ dB}$	$u_p = 0,15 \text{ dB}$
Anténa LP-02 (100 MHz - 300 MHz)	$a_a = \text{eliminováno SW}$	$u_a = 1,50 \text{ dB}$
Ostatní vlivy		$u_0 = 2,57 \text{ dB}$
Rozšířená nejistota		$U_{\text{lab}} = 3,54 \text{ dB}$

$$U = 2 * \sqrt{\frac{a_p^2}{3} + \left(\frac{u_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_0}{2}\right)^2} = 3,54 \text{ dB}$$

### Kombinace 3

Přijímač ESR7 (9 kHz – 3,6 GHz)	nejistota měření (viz datový list)	0,47 dB
Anténa BC-01 (30 MHz - 100 MHz)	$a_a = \text{eliminováno SW}$	$u_a = 2,2 \text{ dB}$
Ostatní vlivy		$u_0 = 2,57 \text{ dB}$
Rozšířená nejistota		$U_{\text{lab}} = 3,51 \text{ dB}$

$$U = 2 * \sqrt{\frac{a_p^2}{3} + \left(\frac{u_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_0}{2}\right)^2} = 3,51 \text{ dB}$$



#### Kombinace 4

Přijímač ESR7 (9 kHz – 3,6 GHz)	nejistota měření (viz datový list)	0,47 dB
Anténa LP-02 (100 MHz - 300 MHz)	$a_a =$ eliminováno SW	$u_a = 1,5$ dB
Ostatní vlivy		$u_0 = 2,57$ dB
Rozšířená nejistota		$U_{lab} = 3,12$ dB

$$U = 2 * \sqrt{\frac{a_p^2}{3} + \left(\frac{u_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_0}{2}\right)^2} = 3,12 \text{ dB}$$

Po dopočtení těchto rozšířených nejistot můžeme určit, zda měřicí řetězce splňují kritérium dané normou ČSN EN 55016 - 4 - 2 ed.3 [6].

#### 9.5 Vyhodnocení kritéria měřicího řetězce

Posuzování výsledků:

- 1) Když  $U_{lab} \leq U_{cispr}$  výsledky vyhovují, když výsledek měření nepřevyšuje mez rušení,
- 2) když  $U_{lab} \leq U_{cispr}$  výsledky nevyhovují, když výsledek měření převyšuje mez rušení,
- 3) když  $U_{lab} > U_{cispr}$  výsledky vyhovují, když žádný výsledek měření zvýšený o  $U_{lab} - U_{cispr}$  nepřevyšuje mez rušení,
- 4) když  $U_{lab} > U_{cispr}$  výsledky nevyhovují, když jakýkoliv výsledek měření zvýšený o  $U_{lab} - U_{cispr}$  převyšuje mez rušení.[6][8]

Hodnota rušení šířené zářením na OATS nebo SAC ve frekvenčním pásmu 30 MHz – 1000 MHz je podle normy  $U_{cispr} = 6,3$  dB.

#### Vyhodnocení použitých kombinací měřicích řetězců:

##### Kombinace 1

$U_{lab} = 3,89$  dB       $U_{lab} \leq U_{cispr}$        $U_{cispr} = 6,3$  dB  
Podmínka splněna

**Kombinace 2**

$$U_{lab} = 3,54 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr} \quad U_{cispr} = 6,3 \text{ dB}$$

Podmínka splněna

**Kombinace 3**

$$U_{lab} = 3,51 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr} \quad U_{cispr} = 6,3 \text{ dB}$$

Podmínka splněna

**Kombinace 4**

$$U_{lab} = 3,12 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr} \quad U_{cispr} = 6,3 \text{ dB}$$

Podmínka splněna

## 10 Závěr

Tato práce vysvětluje základy problematiky stanovování nejistot měření v laboratoři elektromagnetické kompatibility s ohledem na zkoušky vyzařovaných emisí, které laboratoř poskytuje. V teoretické části této práce byla popsána problematika typů nejistot, jejich dělení a způsob jakým je stanovit. Praktická část této práce obsahuje naměřená a dopočtená data, pomocí kterých jsme se pokusili určit, zda je hodnota útlumu EMC laboratoře v uváděném rozmezí  $\pm 4$  dB. Dále jsme pomocí získaných hodnot stanovili nejistoty stanoviště a ostatních prvků řetězce a pomocí nich jsme ověřili, zda je momentálně používaná odhadovaná hodnota stanoviště a ostatních prvků řetězce 2 dB odhadována správně a s případnou tolerancí. Tato dopočtená hodnota byla započítána do výsledné nejistoty celého měřicího řetězce, což měl být hlavní přínos této práce. Nakonec jsme z výsledných dopočtených nejistot potvrdili, zda každá měřicí kombinace splňuje kritérium dané normou.

Měření útlumu stanoviště EMC laboratoře mělo potvrdit uváděnou hodnotu útlumu  $\pm 4$  dB, kterou uvádí norma ČSN EN 55016-4-2. ed. 3 [6]. Toto měření bylo prováděno pouze jednou firmou Frankonia, a proto jsme se pokusili ověřit správnost naměřených dat nebo zjistit případnou odchylku způsobenou po 14 letech provozu laboratoře. Z výsledných grafů můžeme usoudit, že při měření pomocí vysílací antény LP-02 došlo k potvrzení uváděného rozsahu  $\pm 4$  dB, viz Obr. 34 až 37. Jediný případ kdy se tyto hodnoty liší a přesahují tuto mez, je v pozici Front, kde došlo k překročení této hodnoty z důvodu nesplnění normované vzdálenosti pro měření mezi vysílací a přijímací anténou viz Obr. 37. Z grafů naměřených pomocí vysílací antény BC-01 je patrné překročení uváděného útlumu u tří ze čtyř měření. Uváděný maximální útlum je překročen v kmitočtovém pásmu cca. 30 MHz až 80 MHz a poté dochází k ustálení hodnoty útlumu v daných tolerancích. Počáteční zvýšení útlumu může být způsobeno tím, že přijímací anténa BTA-M je primárně určena pro měření od 80 MHz výše, což při vysokých hodnotách anténního faktoru mohlo způsobit takovéto zvýšení útlumu. Společnost Frankonia používala při měření párové kalibrované antény, což znamená, že vysílací a přijímací anténa byla totožná.

Měření útlumu kabelů a útlumu zkušebního stanoviště jsme měli posoudit, zda je odhadovaná hodnota ostatních vlivů  $u_0 = 2$  dB určena správně. Při započítání nejvyšších nejistot každého prvku měřicího řetězce přesáhla hodnota výsledné nejistoty uváděnou hodnotu 2 dB. Naším měřením a výpočtem jsme stanovili nejistotu  $u_0 = 2,57$  dB. Na základě našeho výpočtu můžeme tedy říct, že je doposud odhadovaná velikost této nejistoty menší, než jak by bylo potřeba pro tento typ měření. Nejvyšší podíl na nejistotě mají prvky měřicího řetězce, jako je

přijímač a použité antény, kde výsledná hodnota nejistoty byla 2,57 dB, což je většina z celkové hodnoty. Oproti tomu hodnota nejistoty měřených koaxiálních kabelů byla nejvýše 0,0934 dB a můžeme tuto hodnotu při výpočtu zanedbat, jelikož její vliv na celkovou nejistotu byl eliminován pouhým zaokrouhlením na dvě desetinná místa.

Nakonec jsme pro všechny námi použité kombinace měřiče rušení a snímače rušivého signálu vyhledali hodnoty nejistot měření pro různá frekvenční pásma, které jsme získali z kalibračních protokolů jednotlivých typů snímačů rušivých signálů a měřiče rušení. V normě ČSN EN 55016-4-2. ed. 3 [6] jsou pro jednotlivé snímače rušivých signálů uvedena standardně používaná frekvenční pásma. Pro každé pásmo je uvedena rozšířená nejistota měření  $U_{cispr}$  a tuto hodnotu nesmí žádná z testovaných kombinací převýšit. Vypočtenou výslednou hodnotu nejistoty měřicího řetězce  $U_{lab}$  jsme porovnali s hodnotou  $U_{cispr}$ . Jelikož žádná vypočtená hodnota ani z daleka nepřevyšovala hodnotu udávanou normou, tak můžeme říct, že všechny námi použité měřicí kombinace toto kritérium splňují.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SVAČINA, Jiří. Základy elektromagnetické kompatibility  
Část 1 - Základní pojmy a členění oboru EMC. In: elektrorevue.cz [online]. 19.6. 2000 [cit. 10.11.2017]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>
- [2] BANDŽÁK, Ján, Vyjadřování nejistot emisních měření ve zkušební EMC laboratoři, Plzeň, 2008. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, Katedra technologií a měření, 2008-04-06.
- [3] ŽÁK, Václav, Vyjadřování nejistot měření odolností ve zkušební EMC laboratoři, Plzeň, 2008. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, Katedra technologií a měření, 2008-04-06.
- [4] PROCHÁZKA, Miroslav. Antény – encyklopedická příručka. 3. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 383 s. ISBN 80-7300-166-7.
- [5] FRANKONIA GmbH, Německo [Cit. 10.2.2018]. Dostupné z: <http://www.frankoniagroup.com>
- [6] Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Část 1-4: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Antény a zkušební stanoviště pro měření rušení šířeného zářením: ČSN EN 55016-1-4 ED.3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [7] Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 1: Všeobecně. Díl 1: Použití a interpretace základních definic a termínů: ČSN IEC 1000-1-1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1995
- [8] Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration: EA-4/02. Paris: European accreditation, 2013

## Seznam příloh

[A] Krátký kabel K1 a delší kabel K2 měřený spektrálním analyzátozem ESR7 oběma způsoby v obou frekvenčních pásmech

[B] Krátký kabel K1 a delší kabel K2 měřený spektrálním analyzátozem ESA-L oběma způsoby v obou frekvenčních pásmech

[C] Krátký kabel K1 a delší kabel K2 měřený spektrálním analyzátozem Agilent oběma způsoby v obou frekvenčních pásmech

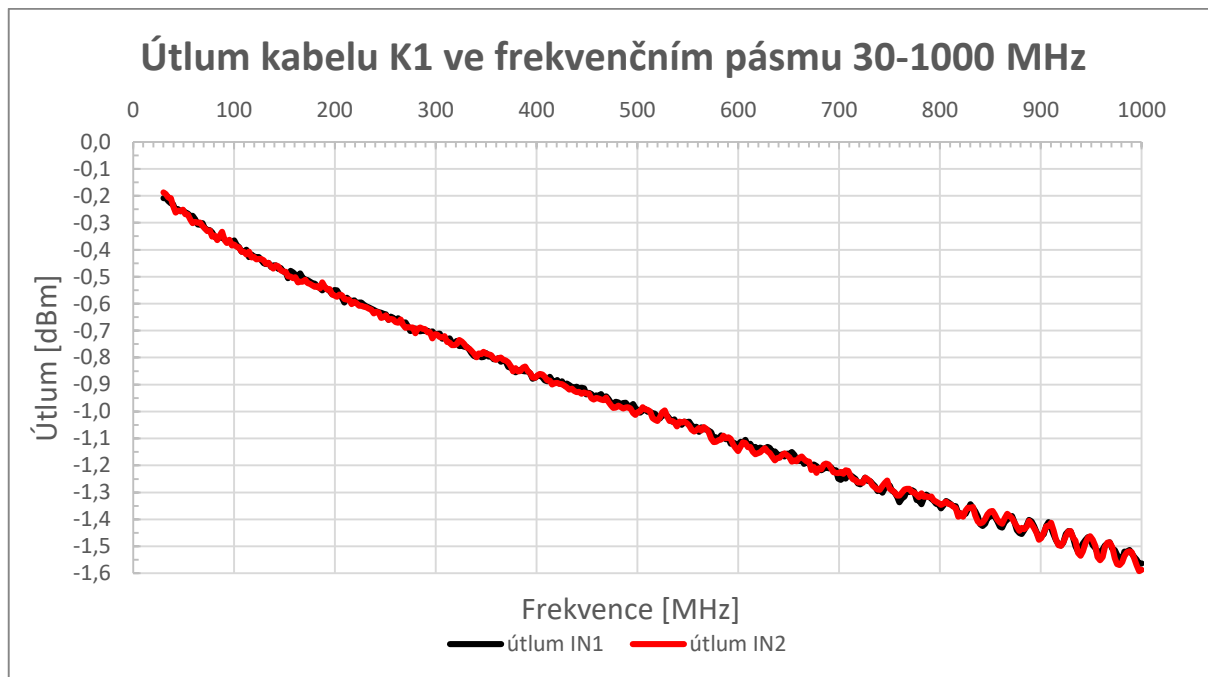
[D] Naměřený útlum EMC laboratoře bikónickou anténou ve vše pozicích točny

[E] Naměřený útlum EMC laboratoře LPDA anténou ve vše pozicích točny

## Přílohy

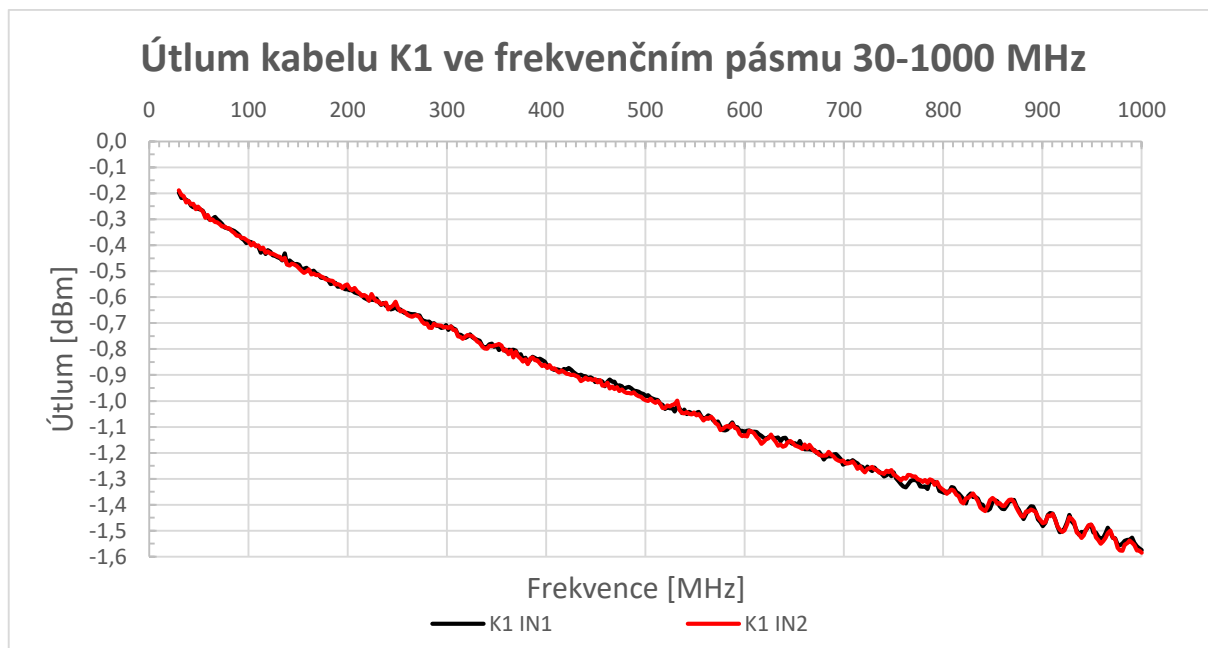
### Příloha A - Krátký kabel K1 a delší kabel K2 měřený spektrálním analyzátozem ESR7 oběma způsoby v obou frekvenčních pásmech

První způsob určení útlumu kabelu:



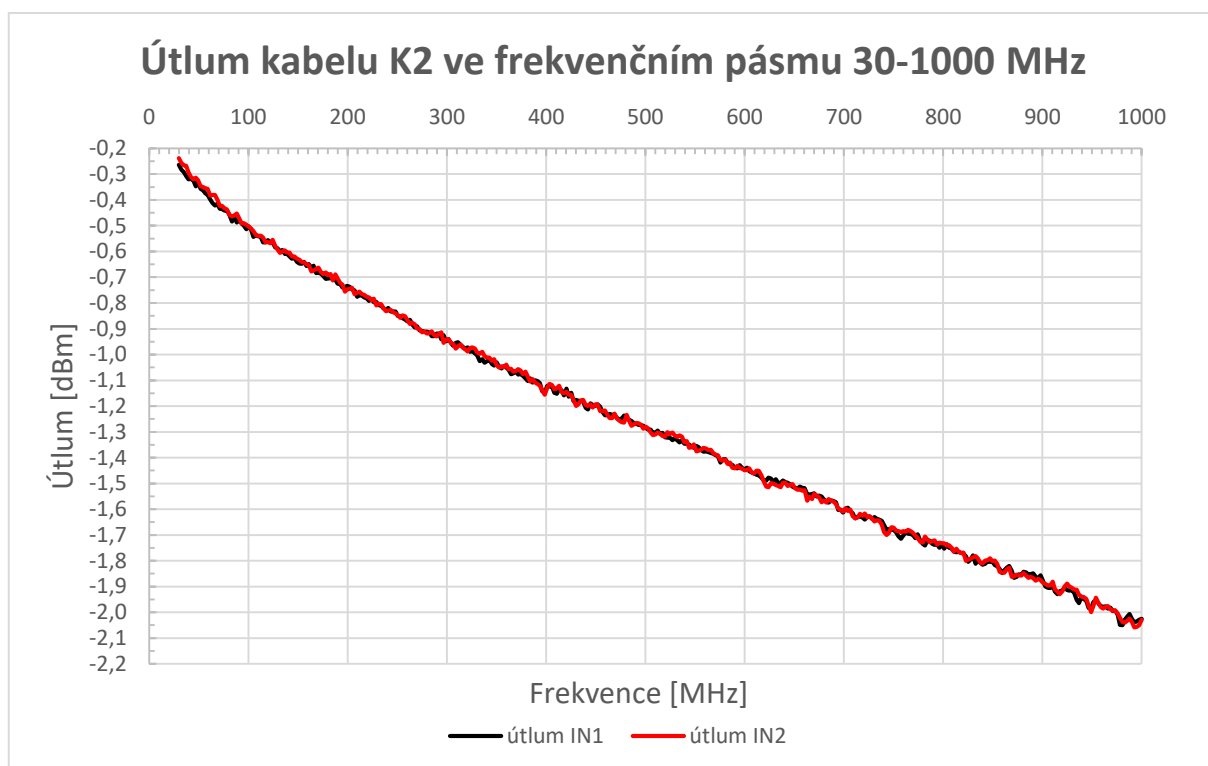
Obr. 42 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz měřený oběma vstupy

Druhý způsob určení útlumu kabelu:



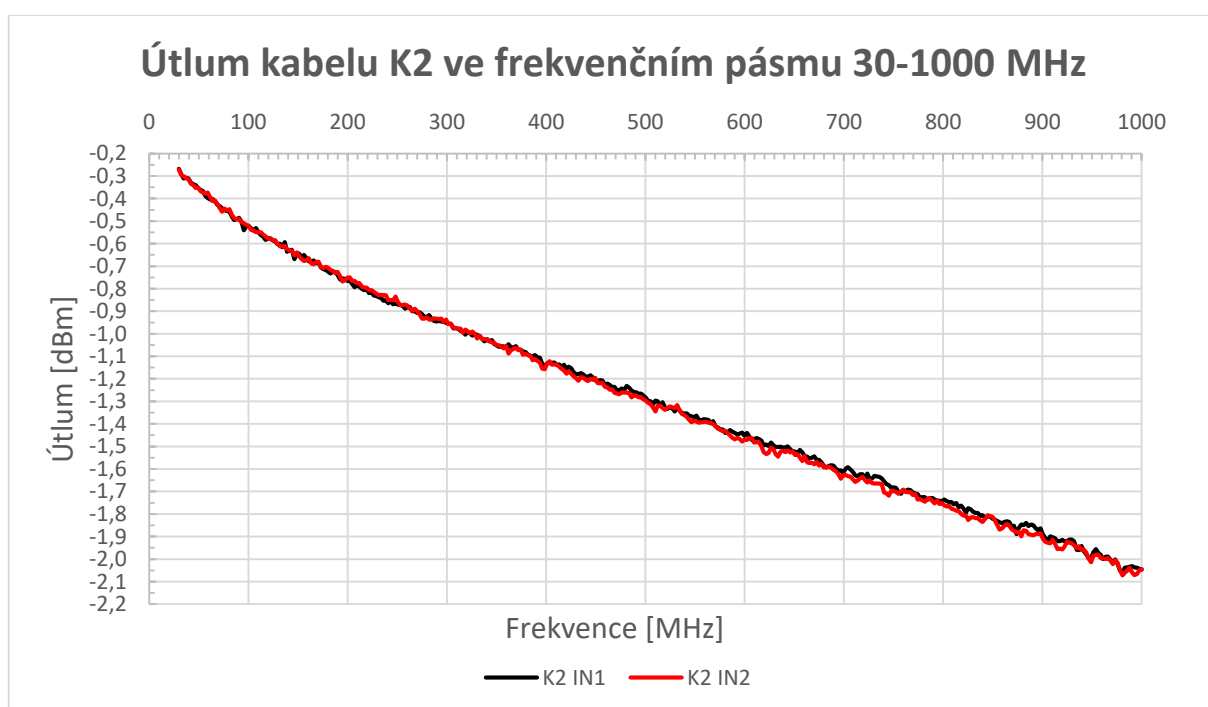
Obr. 43 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz měřený oběma vstupy

První způsob určení útlumu kabelu:



Obr. 44 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz měřený oběma vstupy

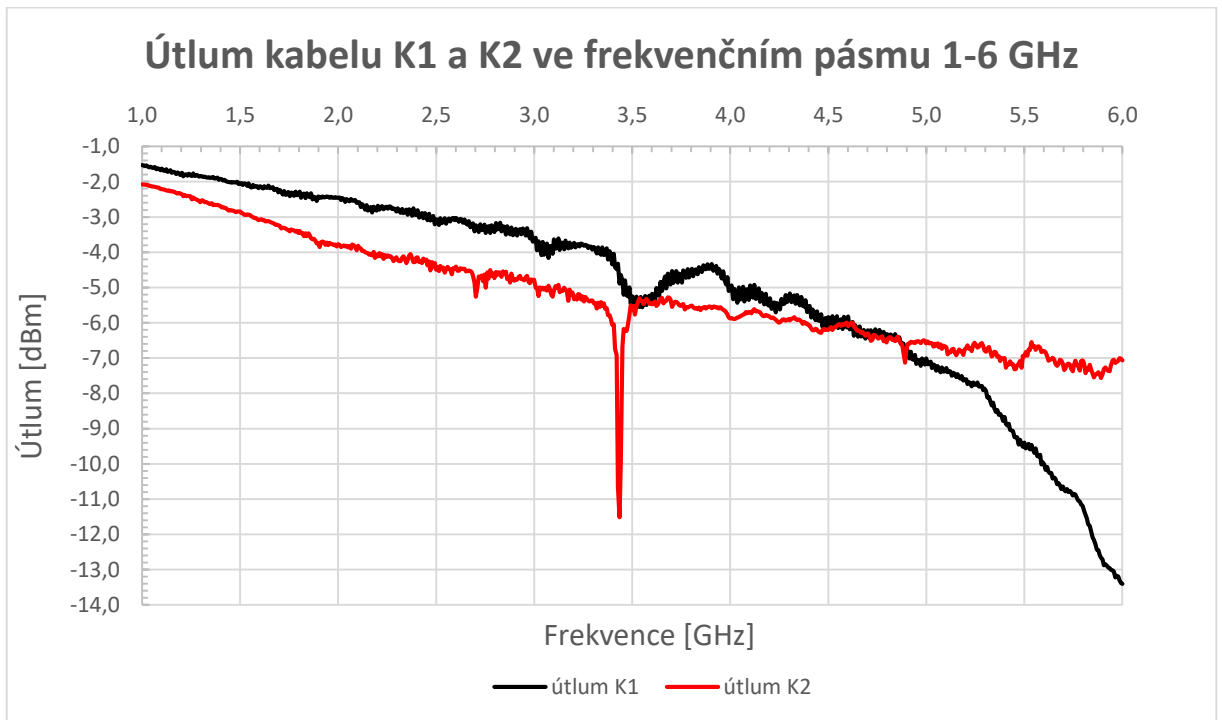
Druhý způsob určení útlumu kabelu:



Obr. 45 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz měřený oběma vstupy



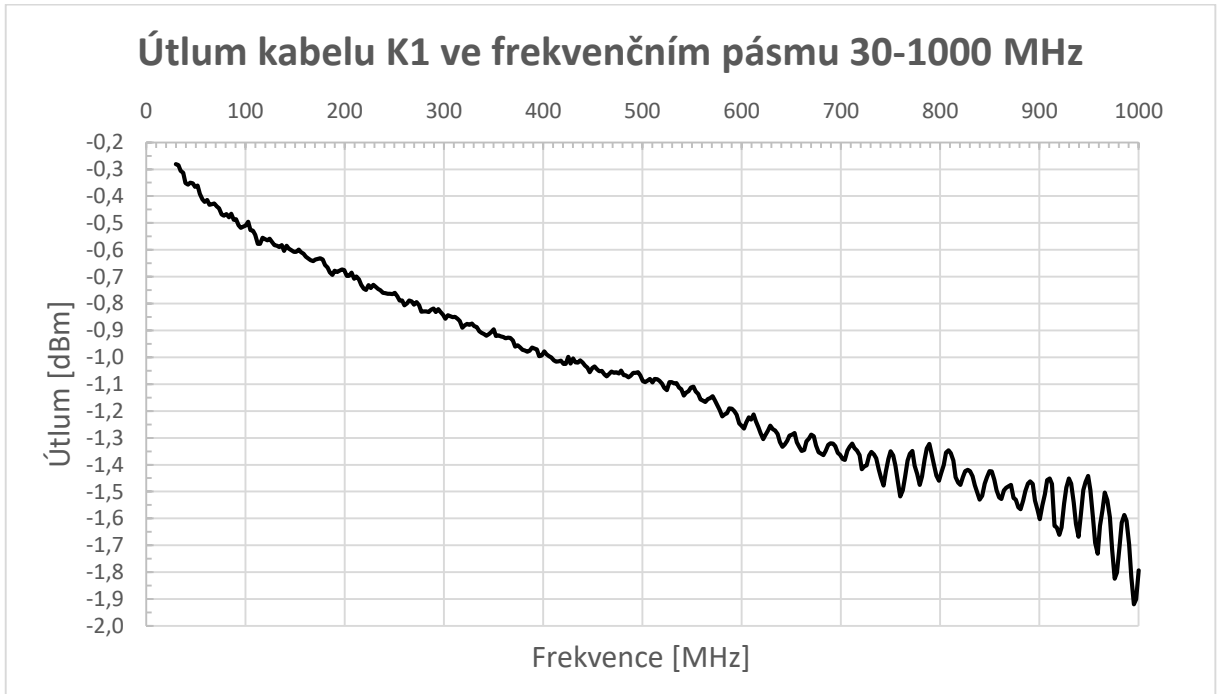
Pouze první způsob:



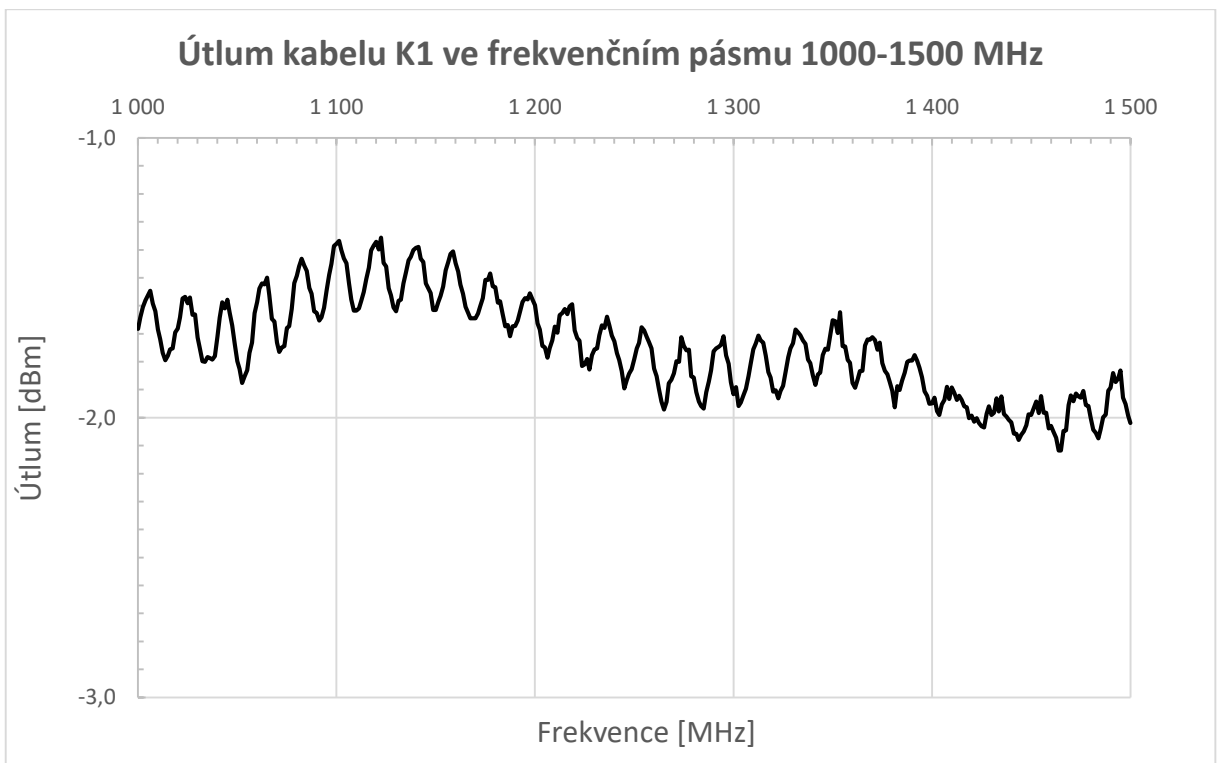
*Obr. 46 Graf útlumu kabelu K1 a K2 ve frekvenčním pásmu 1-6 GHz*

**Příloha B - Krátký kabel K1 a delší kabel K2 měřený spektrálním analyzátozem ESA-L oběma způsoby v obou frekvenčních pásmech**

První způsob určení útlumu kabelu:

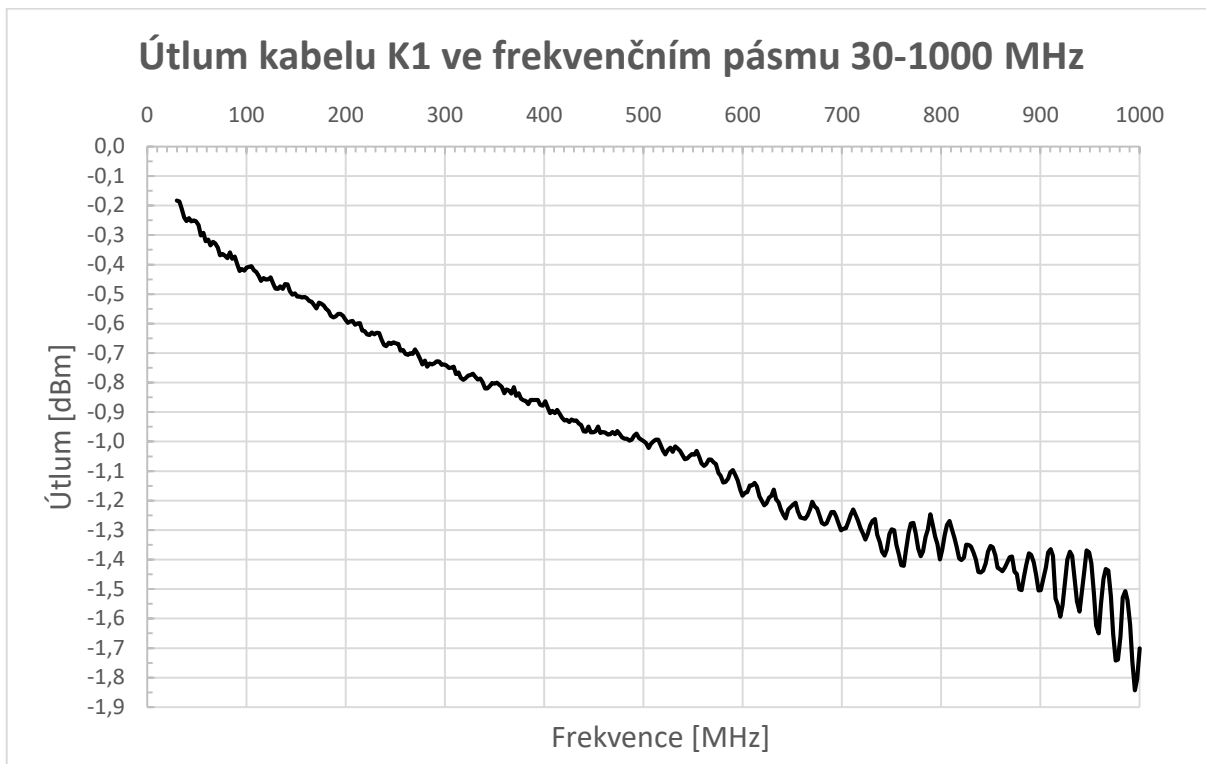


*Obr. 47 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz*

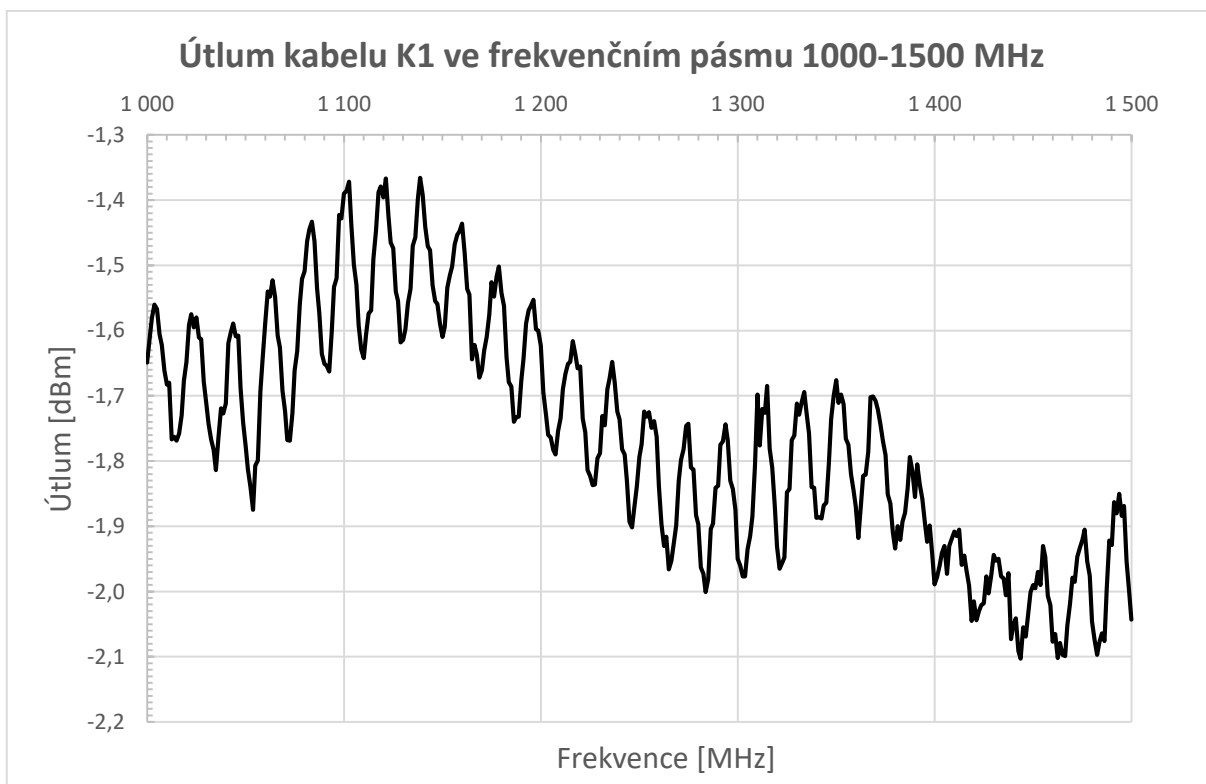


*Obr. 48 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 1000-1500 MHz*

Druhý způsob určení útlumu kabelu:

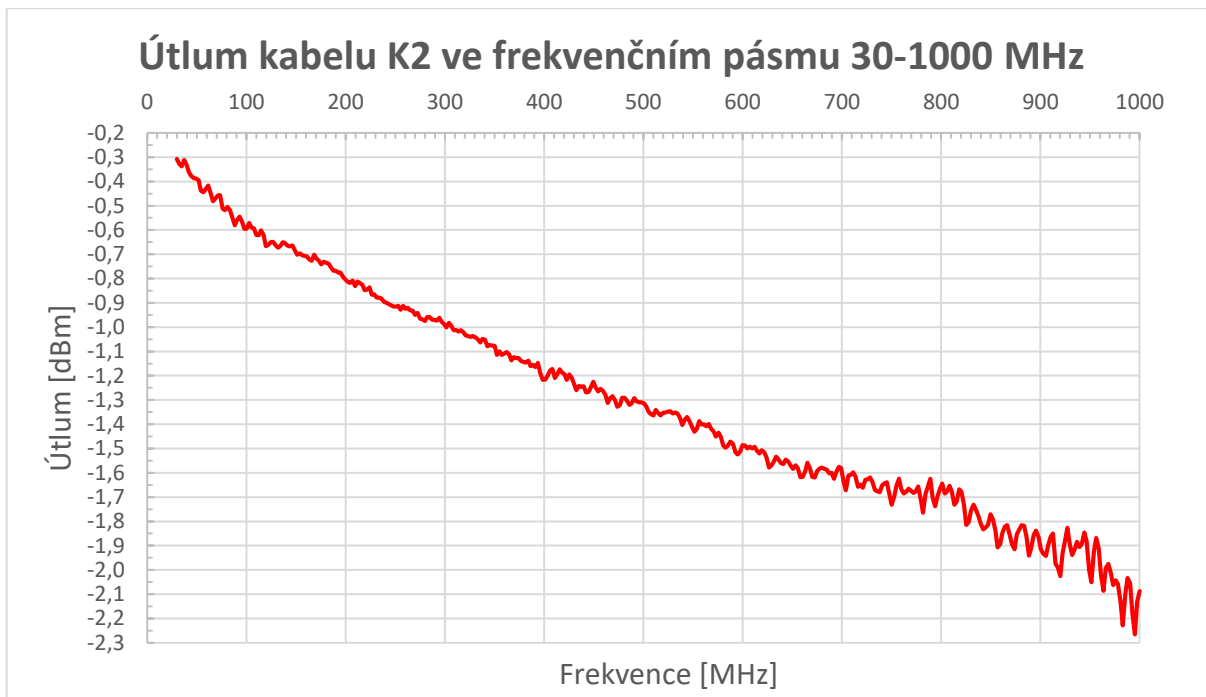


Obr. 49 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz

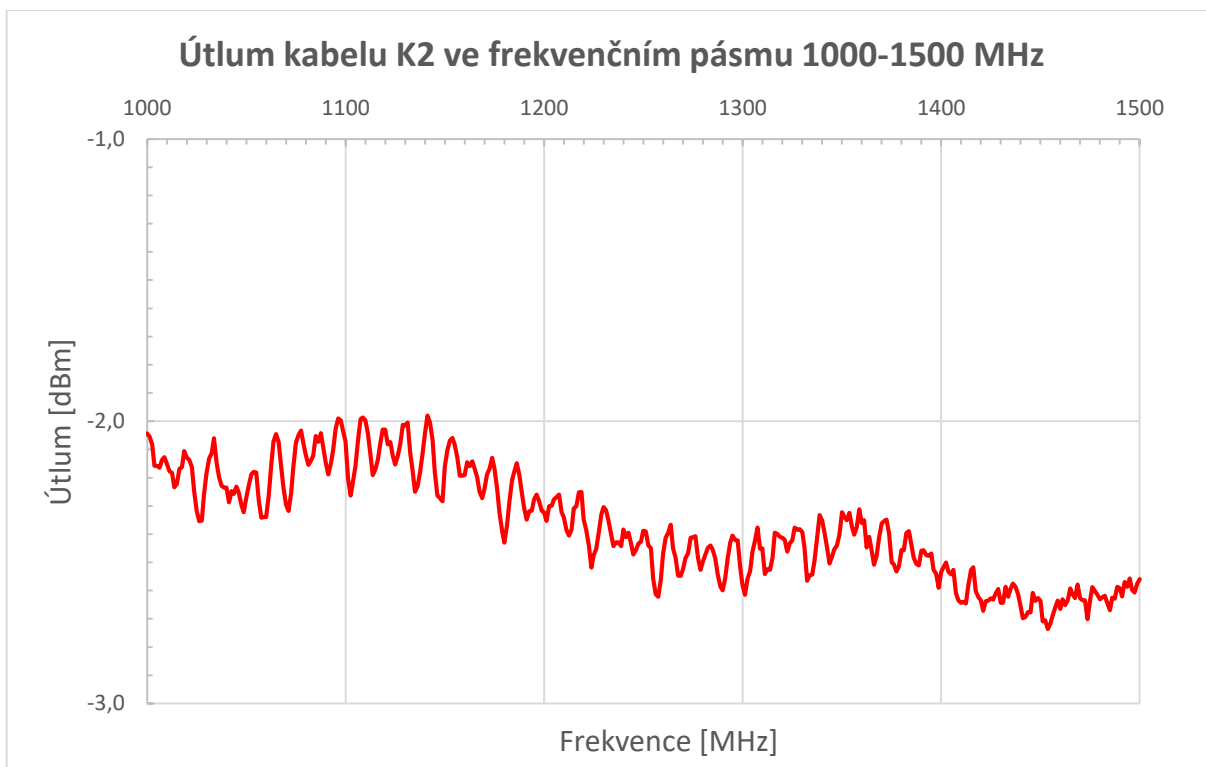


Obr. 50 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 1000-1500 MHz

První způsob určení útlumu kabelu:

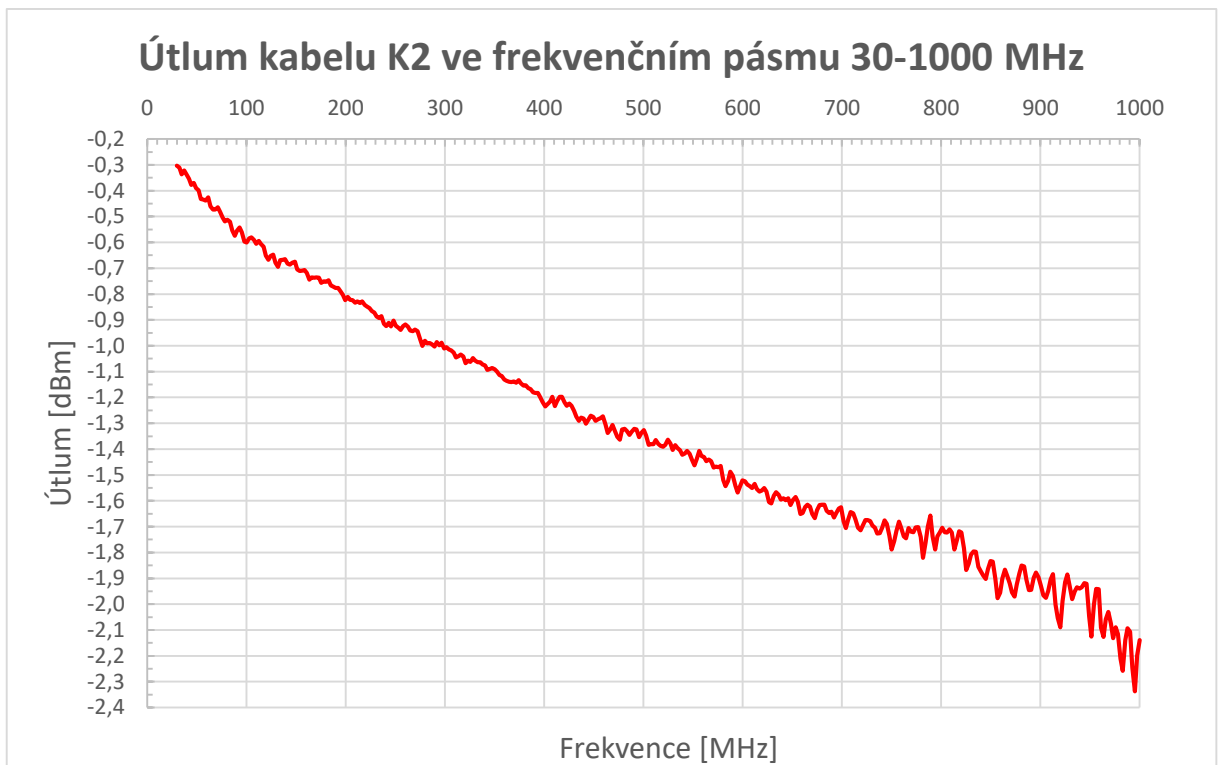


Obr. 51 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz

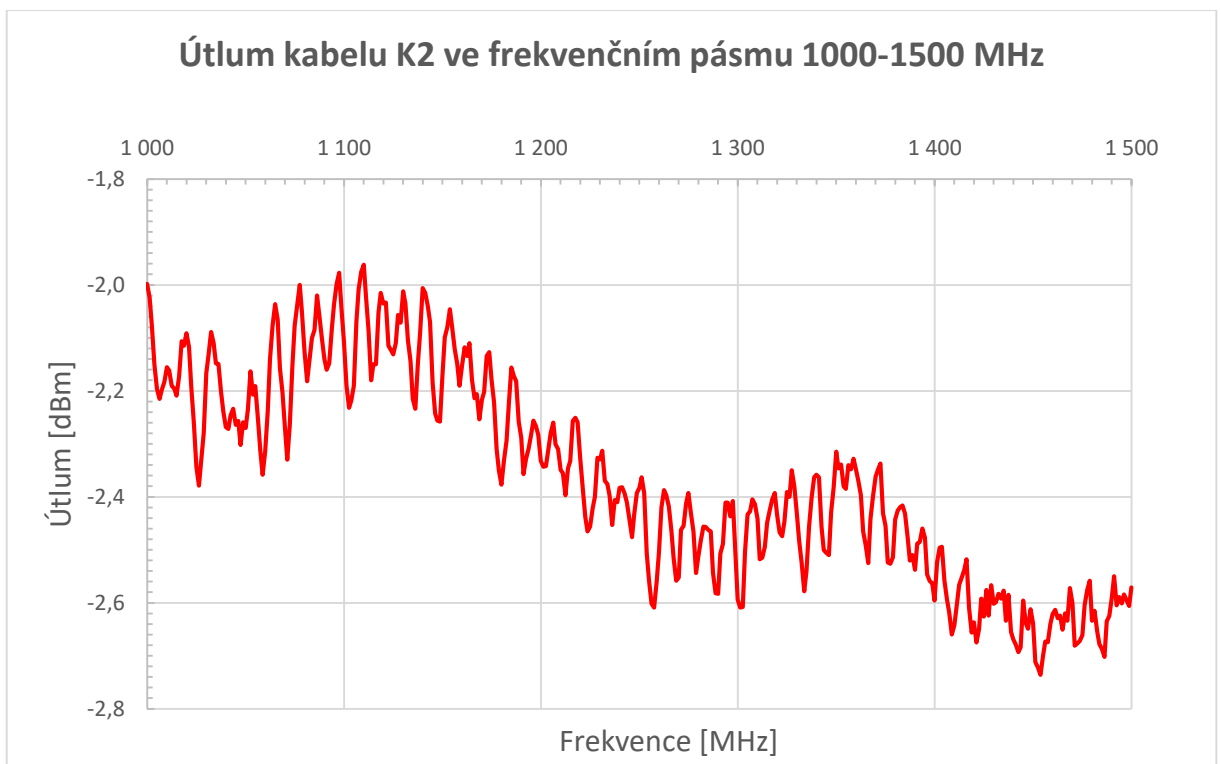


Obr. 52 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 1000-1500 MHz

Druhý způsob určení útlumu kabelu:



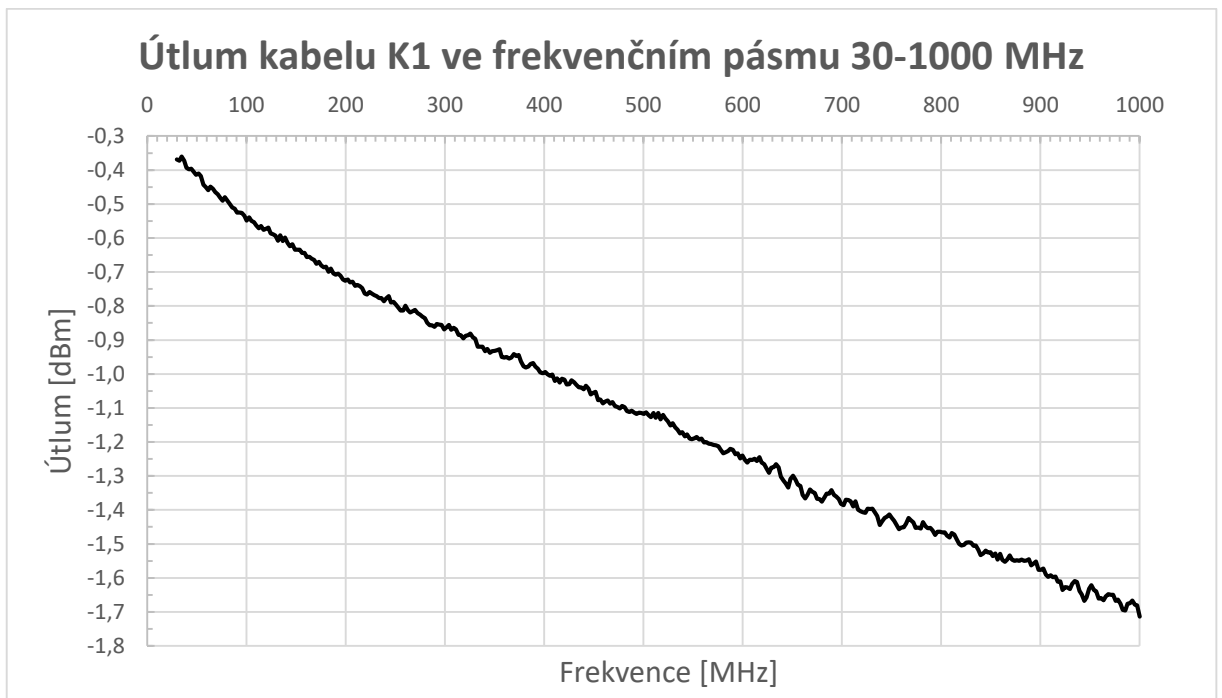
Obr. 53 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz



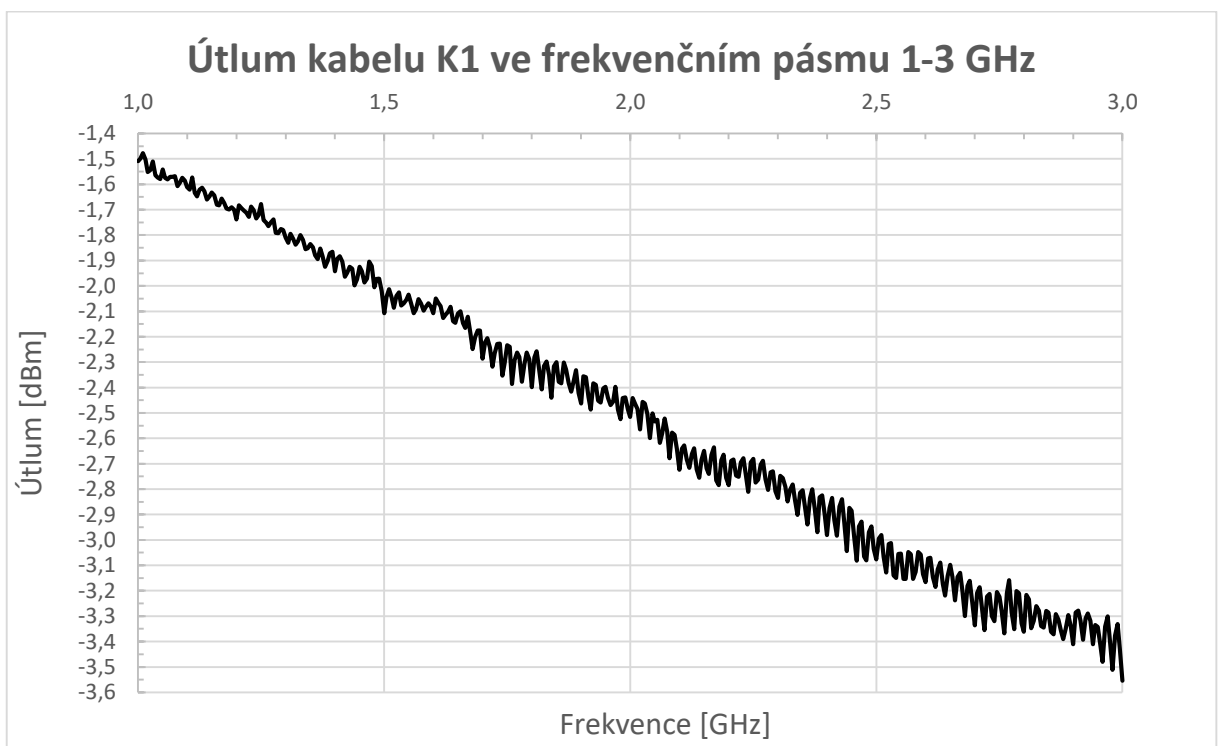
Obr. 54 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 1000-1500 MHz

**Příloha C** - Krátký kabel K1 a delší kabel K2 měřený spektrálním analyzátozem Agilent oběma způsoby v obou frekvenčních pásmech

První způsob určení útlumu kabelu:

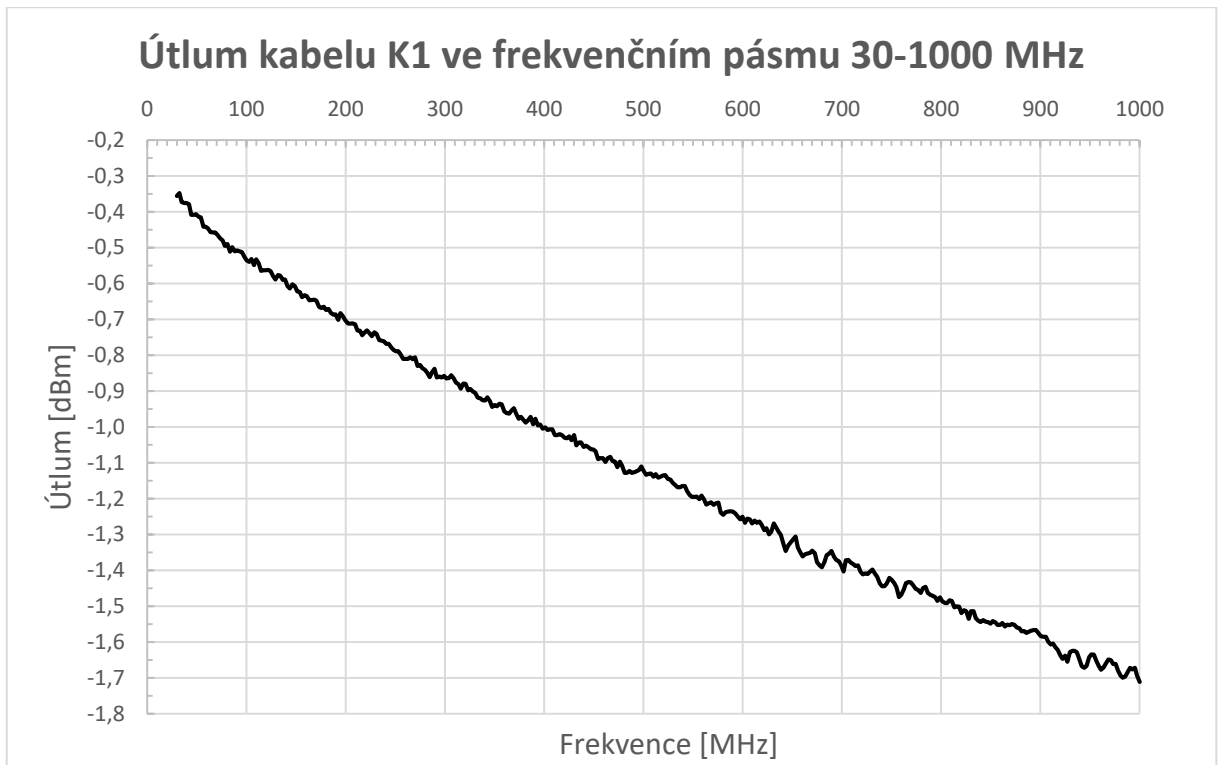


*Obr. 55 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz*

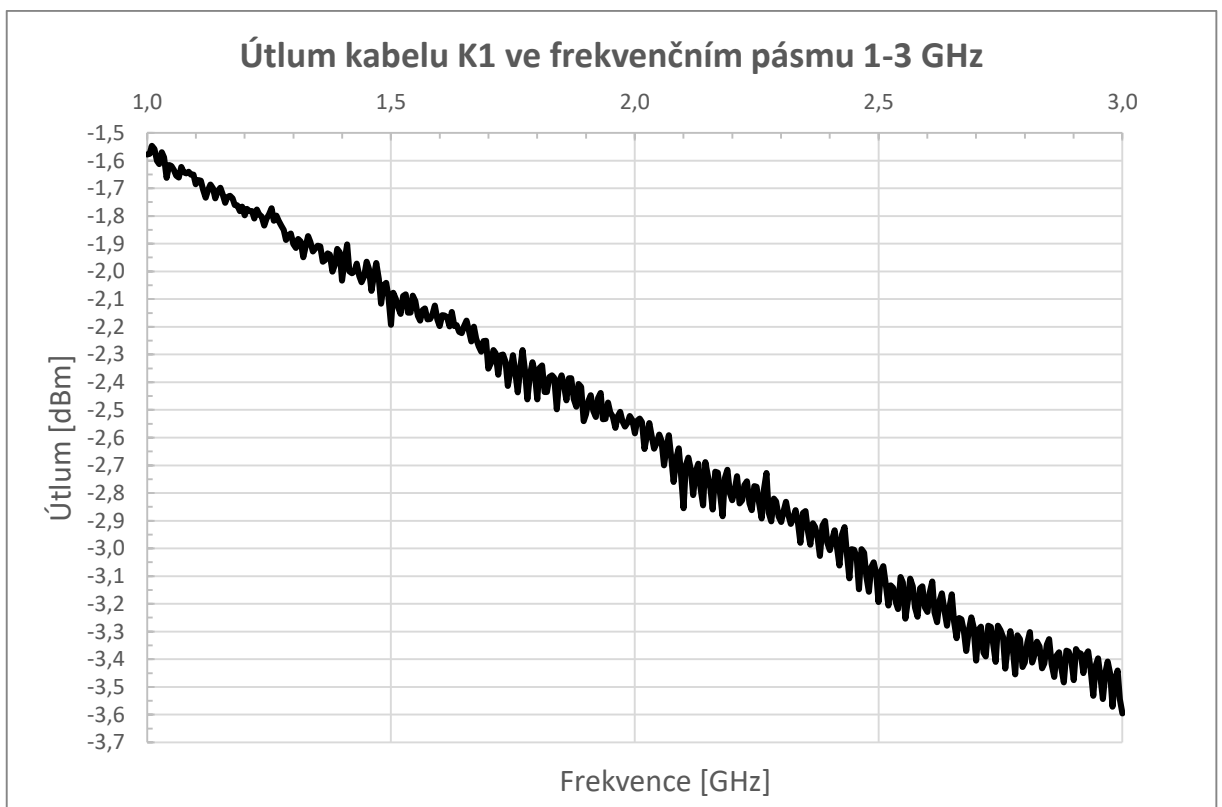


*Obr. 56 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 1-3 GHz*

Druhý způsob určení útlumu kabelu:

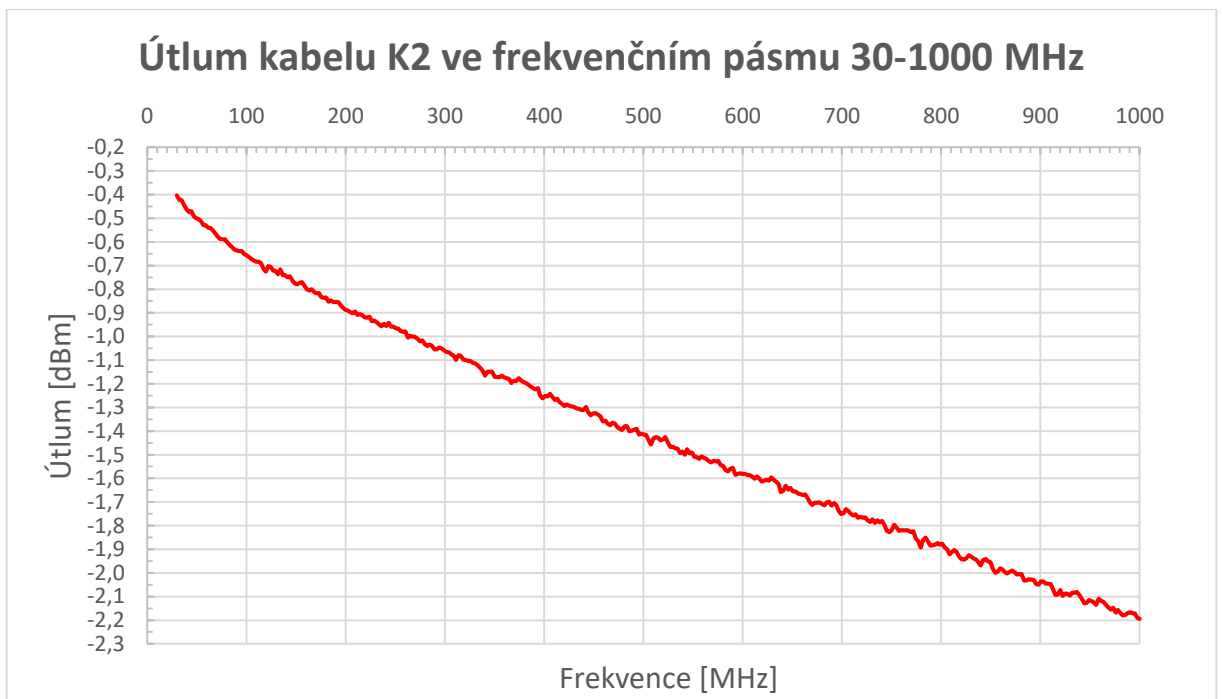


Obr. 57 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz

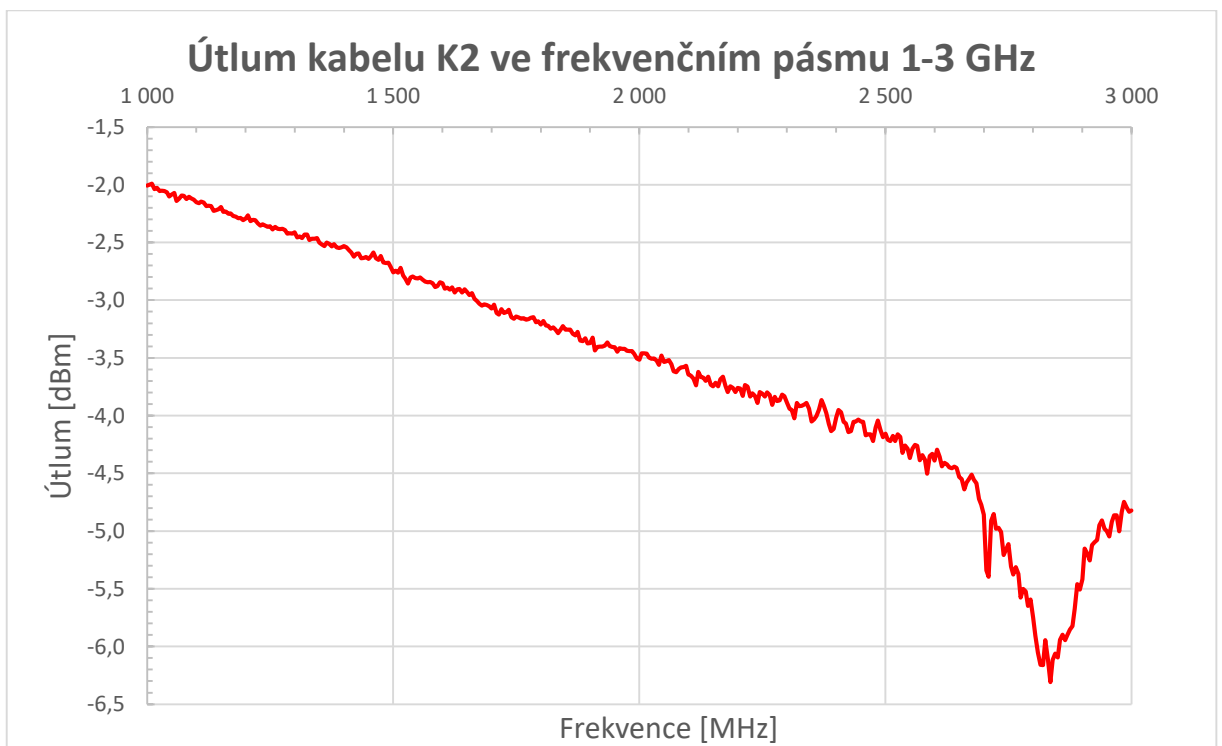


Obr. 58 Graf útlumu kabelu K1 ve frekvenčním pásmu 1-3 GHz

První způsob určení útlumu kabelu:



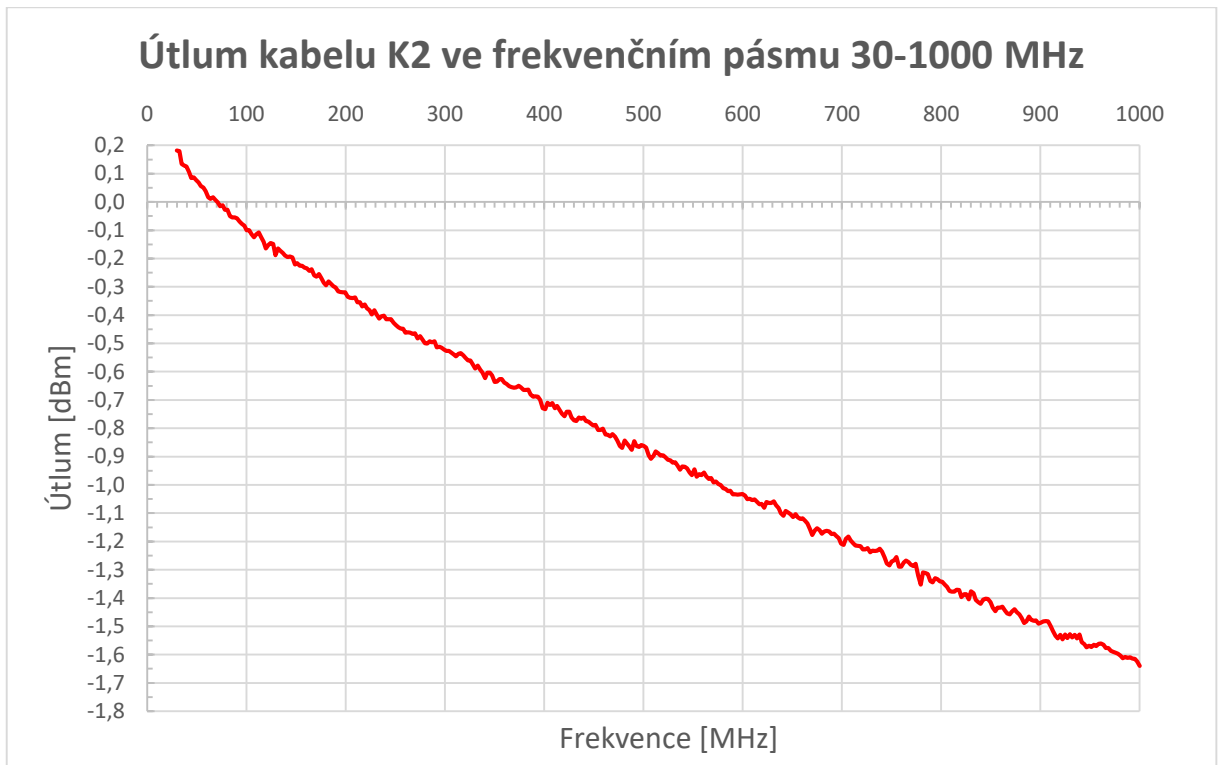
Obr. 59 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz



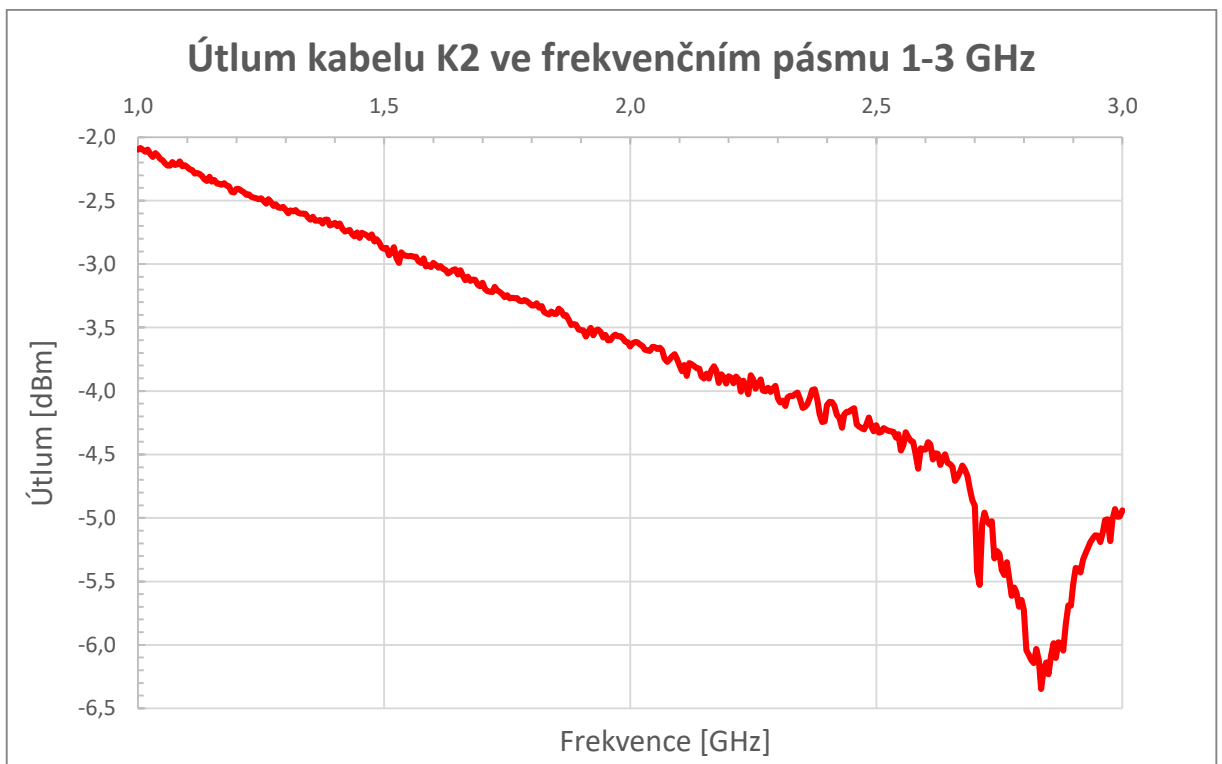
Obr. 60 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 1-3 GHz



Druhý způsob určení útlumu kabelu:

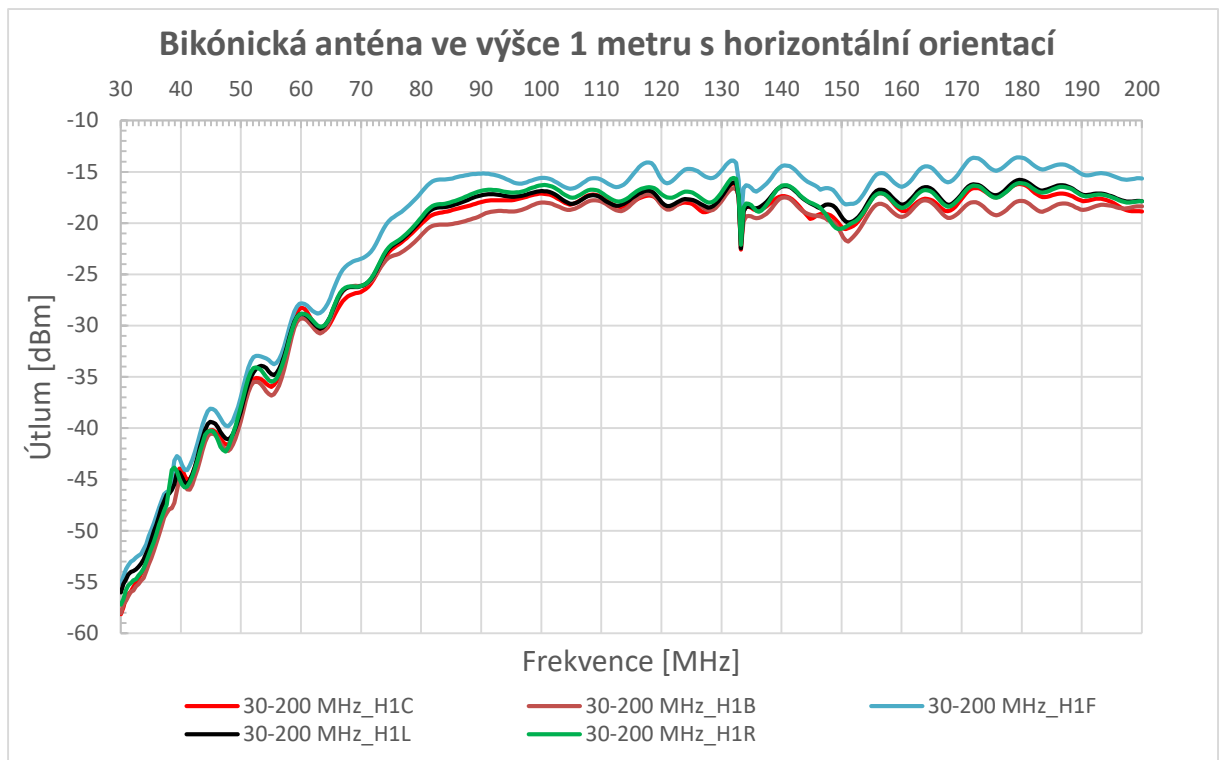


Obr. 61 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 30-1000 MHz

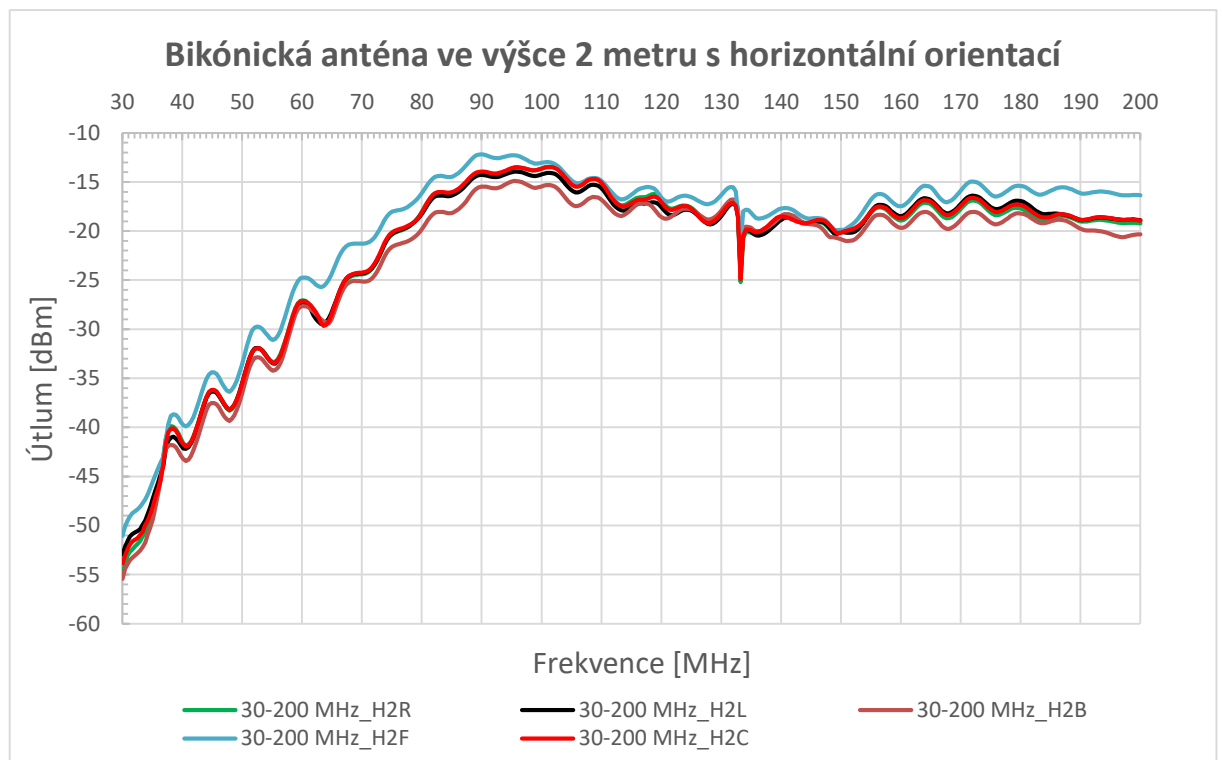


Obr. 62 Graf útlumu kabelu K2 ve frekvenčním pásmu 1-3 GHz

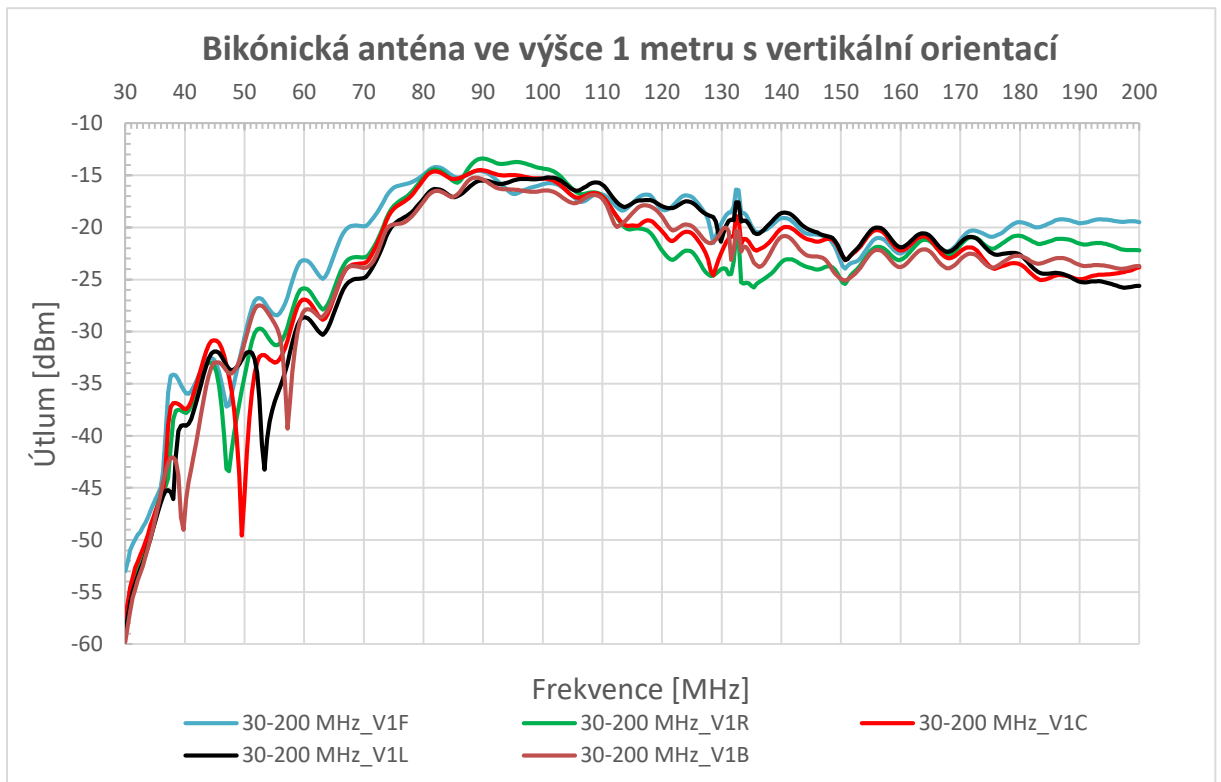
**Příloha D - Naměřený útlum EMC laboratoře bikónickou anténou ve vše pozicích točny**



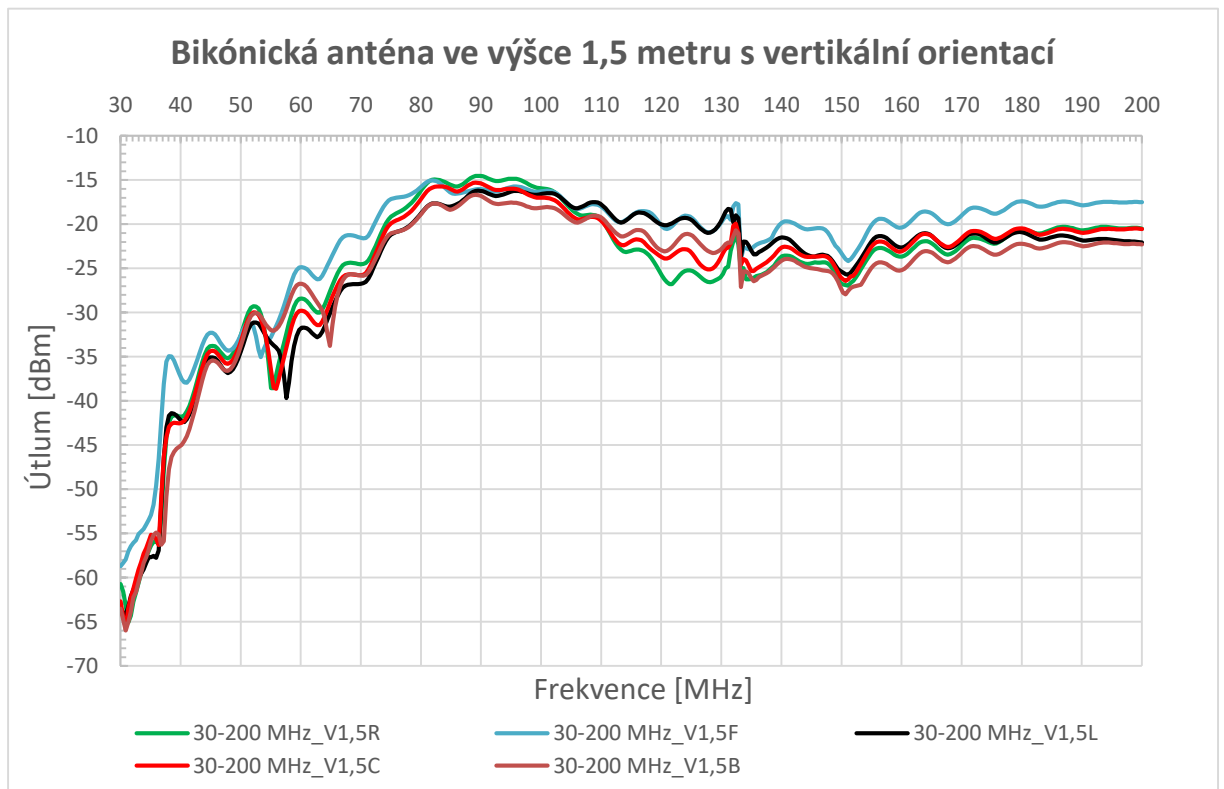
*Obr. 63 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény*



*Obr. 64 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény*

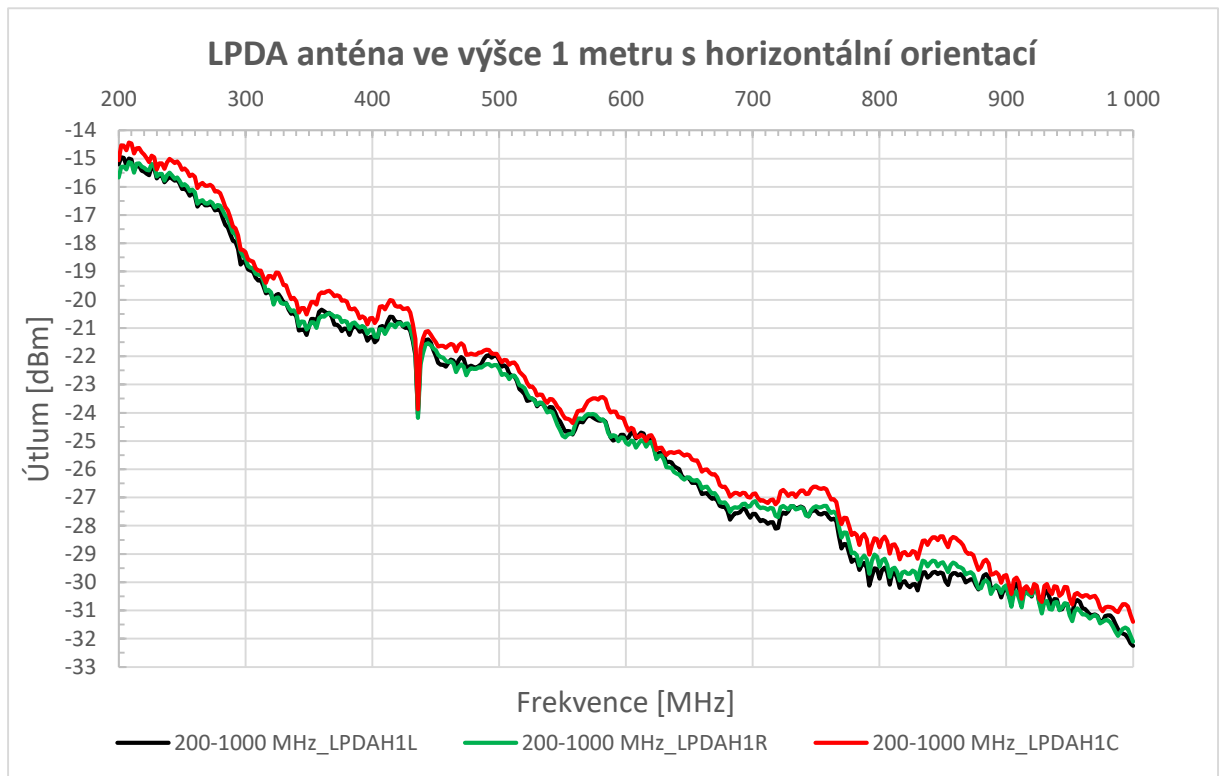


*Obr. 65 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény*

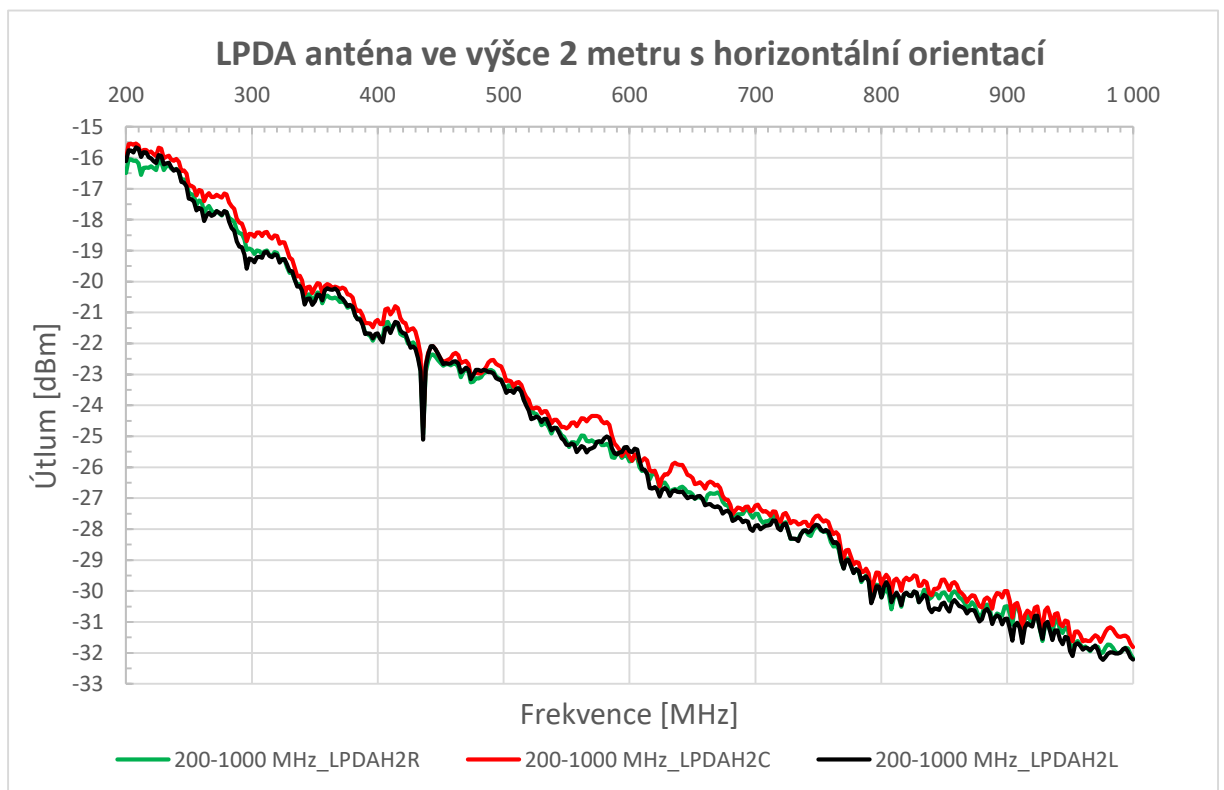


*Obr. 66 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény*

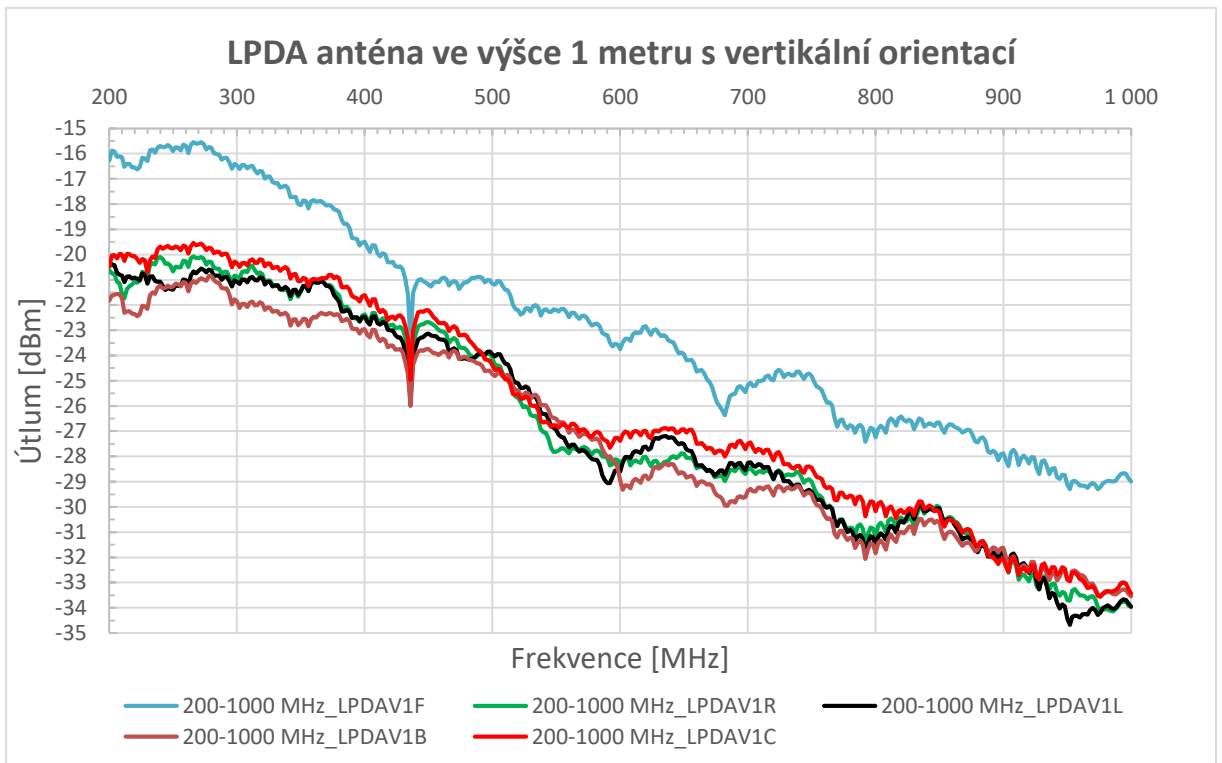
**Příloha E - Naměřený útlum EMC laboratoře LPDA anténou ve vše pozicích točny**



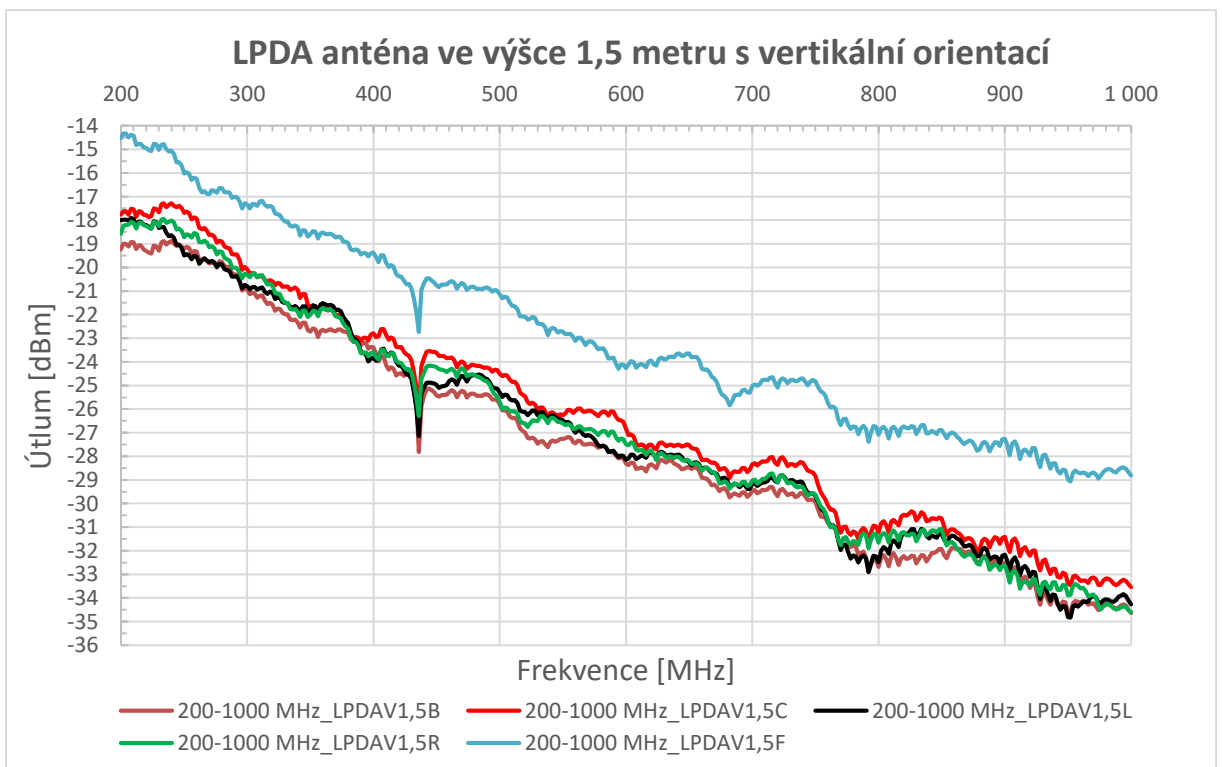
*Obr. 67 Graf útlumu EMC laboratoře ve třech pozicích vysílací antény*



*Obr. 68 Graf útlumu EMC laboratoře ve třech pozicích vysílací antény*



*Obr. 69 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény*



*Obr. 70 Graf útlumu EMC laboratoře ve všech pozicích vysílací antény*