

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroniky a informačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření účinnosti stínění

Autor práce: **Bc. Jan Sedláček, DiS.**
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan SEDLÁČEK, DiS.**
Osobní číslo: **E21N0015K**
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Měření účinnosti stínění**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši možnosti měření účinnosti stínění stínících materiálů.
2. Navrhněte přípravky pro měření účinnosti stínění plochých materiálů.
3. Přípravky realizujte a proveďte měření s různými vzorky stínících materiálů.
4. Zhodnoťte naměřené výsledky a diskutujte použitelnost navržených přípravků.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **5**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**



Seznam doporučené literatury:

1. PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 978-0471755005.
2. CHATTERTON, Paul A. a Michael A. HOULDEN. EMC: Electromagnetic Theory to Practical Design. Chichester: Wiley, 1992. ISBN 978-0471928782.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**


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



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na měření účinnosti stínění a jejím cílem je navrhnout vhodnou metodu měření na základě rešerše. Rešerše obsahuje ucelený přehled aktuálně používaných metod pro stanovení účinnosti stínění, a to jak postupů normalizovaných, tak nenormalizovaných.

Dle rešerše byla vybrána metoda měření sondami blízkého pole, která umožňuje variabilní výběr mezi velikostmi sond, jejich konstrukcí, a především jednoduchost návrhu, který lze realizovat pomocí běžných desek plošných spojů. V průběhu řešení diplomové práce bylo navrženo a realizováno několik typů sond a zároveň bylo provedeno měření na několika vzorcích různých materiálů.

Pro vlastní měření byl navrhnout měřicí přípravek, který definuje opakovatelné podmínky při měření, aby byly výsledky porovnatelné. Zároveň byl při konstrukci přípravku kladen důraz na další použitelnost, především pak při výuce předmětu Elektromagnetická kompatibilita v univerzitních laboratořích.

V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky měření a je diskutováno, jakým způsobem je metoda vhodná pro měření účinnosti stínění. Použitá metoda měření sondami blízkého pole umožňuje levnou realizaci měření, které nevyžaduje speciální prostředí, ale zároveň obsahuje nedostatky, které mohou ovlivnit výsledky měření.

Klíčová slova

Stínění, účinnost stínění, stínění plochých materiálů, elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické ztráty

Abstract

The diploma thesis focuses on the measurement of shielding effectiveness and its goal is to propose a suitable measurement method based on research. The research contains a comprehensive overview of currently used methods for determining the shielding effectiveness, both standardized and non-standardized procedures.

According to the research, the method of near-field probes measurement was chosen, which allows a variable choices between the sizes of the probes, their construction and, above all, the simplicity of the design, which can be implemented using ordinary printed circuit boards. During the process of working on the thesis, several types of probes were designed and implemented, and at the same time, several samples of different materials were used for measurement.

A mechanical fixture was designed for the actual measurement, which defines repeatable conditions during the measurement so that the results are comparable. At the same time, during the design of the product, emphasis was placed on further usability, especially when teaching the subject Electromagnetic Compatibility in university laboratories.

At the end of the thesis, the measurement results are evaluated, and there is discussed how the method is suitable for measuring the shielding effectiveness. The used method of near-field probes enables a cheap realization of the measurement, which does not require a special environment, but at the same time contains a deficiency, which affect the measurement results.

Key Words

Shielding, shielding effectiveness, shielding effectiveness of flat materials, electromagnetic compatibility, electromagnetic losses.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Zdeňkovi Kubíkovi, Ph.D., za jeho příkladné vedení a pomoc při řešení diplomové práce, stejně jako jeho čas, který mi při řešení věnoval.

Velké poděkování patří mé manželce, které bych rád poděkoval za podporu a toleranci nesčetných večerů strávených nad studiem.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Problematika EMC	- 2 -
1.1 Obecně o EMC.....	- 2 -
1.2 Legislativa a normy	- 3 -
1.3 Emise a odolnost elektrických zařízení	- 4 -
2 Účinnost stínění plochých materiálů	- 6 -
2.1 Blízké a vzdálené pole	- 6 -
2.2 Účinnost stínění	- 7 -
2.3 Složky účinnosti stínění	- 8 -
2.3.1 Ztráty absorpcí.....	- 8 -
2.3.2 Ztráty odrazem.....	- 9 -
2.3.3 Ztráty několikanásobným odrazem	- 9 -
3 Rešerše možností měření	- 10 -
3.1 ČSN EN 61000-5-7.....	- 10 -
3.2 ASTM D-4935-99.....	- 11 -
3.3 ASTM D-4935-18.....	- 13 -
3.4 Reverberační (odrazová) komora.....	- 13 -
3.5 Sondy blízkého pole.....	- 14 -
4 Zvolená metoda měření	- 16 -
4.1 Konstrukce sond blízkého pole.....	- 16 -
4.1.1 Sonda magnetického pole.....	- 17 -
4.1.2 Sonda elektrického pole.....	- 17 -
4.2 Příprava pro měření se sondami blízkého pole.....	- 18 -
4.2.1 Návrh sond.....	- 18 -
4.2.2 Realizace sond	- 19 -
4.3 Příprava vzorků.....	- 22 -
5 Přípravek pro měření	- 24 -
5.1 Základní kolejnice.....	- 24 -
5.2 Základna pro měření s H sondami	- 25 -

5.3	Držák sondy	- 25 -
5.4	Držák vzorku.....	- 27 -
5.5	Zarovnávací deska pro DPS.....	- 28 -
5.6	Spojovací materiál	- 29 -
5.7	Kompletní sestava.....	- 30 -
5.8	3D tisk dílů.....	- 30 -
6	Měření účinnosti stínění	- 32 -
6.1	Úvodní měření	- 32 -
6.2	Měření s 30 mm sondou E pole	- 36 -
6.3	Měření s 120 mm sondou E pole	- 39 -
6.4	Měření s 15 mm sondou H pole.....	- 40 -
6.5	Měření s 115 mm sondou H pole.....	- 42 -
6.6	Měření s různými průměry E sond.....	- 43 -
6.7	Měření s různými průměry H sond	- 45 -
6.8	Vliv průměru E sondy na rezonanci bez feritů	- 48 -
7	Vyhodnocení výsledků měření	- 49 -
7.1	Zhodnocení jednotlivých měření	- 49 -
7.2	Dutinová rezonance	- 50 -
7.3	Smyčková anténa	- 51 -
7.4	Mikropásková anténa.....	- 52 -
7.5	Dipólová anténa	- 53 -
7.6	Vyhodnocení PSV (Poměr stojatých vlnění)	- 55 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 57 -
	Literatura	- 59 -

Seznam symbolů a zkratek

Magnetické a proudové pole

<i>I</i>	A	elektrický proud
<i>U</i>	V	elektrické napětí
<i>B</i>	T	magnetická indukce
<i>H</i>	A/m	intenzita magnetického pole

Elektrické pole

<i>Q</i>	C	elektrický náboj
<i>D</i>	C/m ²	elektrická indukce
<i>E</i>	V/m	intenzita elektrického pole

Obecné zkratky

CE	Evropské označení shody (Conformité Européenne)
DPS (PCB)	deska plošného spoje (printed circuit board)
EMC	elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic Compatibility)
EMCD	EMC směrnice (2014/30/EU [6])
EMI	elektromagnetické interference (Electromagnetic Interference)
EMS	elektromagnetická susceptibilita (Electromagnetic Susceptibility)
SE	účinnost stínění (Shielding Effectiveness)
TG	rozmítaný generátor (Tracking Generator)

Úvod

Tato diplomová práce si klade za cíl navrhnout, vytvořit a měřením ověřit přípravek pro měření účinnosti stínění plochých materiálů. Aby bylo možné tohoto cíle dosáhnout, je nutné uvést stručný úvod do problematiky elektromagnetické kompatibility (dále jen EMC), k čemu slouží stínící materiály a jakým způsobem je můžeme měřit a porovnávat. V závěru práce je popsán zvolený způsob měření a zhodnocení provedeného měření.

V první části diplomové práce je uveden stručný úvod do problematiky EMC, která je nedílnou součástí vývoje každého elektrotechnického produktu, který má být uveden na trh. Tato povinnost je uvedena v tržním prostředí evropské unie na úrovni evropského společenství a uplatňována v rámci jednotlivých členských států nařízením jednotlivých vlád. Technické požadavky na elektrotechnická zařízení jsou upravovány pomocí harmonizovaných norem, které se používají při posuzování shody zařízení (označení CE).

V navazující části je provedena rešerše, která vytváří stručný přehled o možnostech měření účinnosti stínění, ať už harmonizovaných nebo neharmonizovaných. Cílem této rešerše je seznámit se s možnostmi měření a následně zvolit vhodnou metodiku řešení této diplomové práce.

V další části je představen přípravek pro měření na základě zvolené metody měření z předchozí rešerše. V rámci diplomové práce byl navržen a vytvořen přípravek, který umožňuje jednoduše realizovat praktická měření.

V závěru práce jsou představeny jednotlivé výsledky měření a porovnání účinností stínění jednotlivých materiálů. Dále je zhodnocena zvolená metoda a výsledky měření provedené na vytvořeném přípravku.

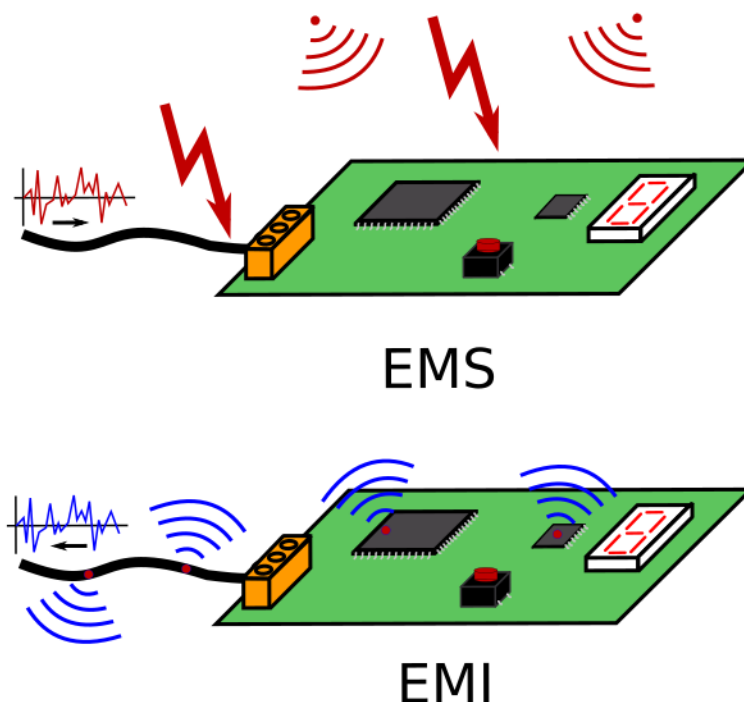
1 Problematika EMC

Elektromagnetická kompatibilita technických systémů je obor zabývající se odolností elektrotechnických zařízení a zároveň jejich schopností rušit okolní přístroje nebo elektroniku obecně (například pro dané prostředí).

Rozvoj elektrotechniky, ať už silnoproudé či slaboproudé, vede na vyšší spínací rychlosti a rychlejší komunikační možnosti současných zařízení. Rychlost spínání výkonových členů nebo rychlosti přenosu dat po komunikačních sběrnicích, sebou přináší elektromagnetické jevy, které mohou rušit okolní zařízení emisí vysokofrekvenčních signálů, pomocí elektromagnetického pole, případně po vedení.

1.1 Obecně o EMC

EMC můžeme rozdělit na dvě základní části. První část se zabývá odolností elektrických zařízení proti okolnímu rušení (elektromagnetická susceptibilita – EMS). Druhá část se zabývá elektromagnetickou interferencí (EMI), tedy schopností zařízení rušit okolní zařízení (vyzařovat elektromagnetické pole).



Obr. 1 Grafické znázornění EMS a EMI

Odolnost elektrických zařízení proti okolnímu rušení bychom mohli definovat, jako schopnost zařízení odolat okolnímu rušení ve stanovených mezích, bez ztráty jeho funkce nebo jen s určitým omezením. Meze a velikost rušení jsou definovány v jednotlivých

normách a specifikují se pro každý typ zařízení. Tedy zařízení určené pro domácnost bude muset odolat jinak silnému rušení než zařízení určené pro průmysl. Stejně tak jsou pro různé typy zařízení definována takzvaná funkční kritéria, která připouští jistou formu ztráty funkce v průběhu působení rušení.

Obdobně jako pro EMS jsou i pro EMI definovány meze a velikosti rušení, které může dané zařízení vyzařovat. Tuto oblast bychom si mohli dále rozdělit na emise šířené zářením a emise šířené vedením. Emise šířené zářením se typicky vyhodnocují ve vzdáleném poli, kde již nelze rozdělit elektrickou a magnetickou složku pole a mluvíme tedy o poli elektromagnetickém. Emisí šířenou vedením se pak rozumí emisí harmonických signálů, šířenou vodivě napájecími nebo datovými kabely. Technické normy opět rozlišují různé typy zařízení a definují pro jednotlivé skupiny různé limity vyzařování.

1.2 Legislativa a normy

Obecně jakékoliv zařízení uváděné na trh musí splňovat místní předpisy a nařízení, aby mohlo být na trh uvedeno. Toto obecné pravidlo platí celosvětově, ať už se jedná o evropský trh (označení CE [1]), anglický trh (UKCA [2]), americký trh (FCC [3]), čínský trh (CCC [4]) nebo další. Zkratky značek, které byly uvedeny v závorkách uvádějí, že daný výrobek je takzvaně shodný s danými předpisy a výrobce se zavazuje, že plní místní předpisy pro uvedení výrobku na trh (proto se většinou označuje jako prohlášení o shodě).



Obr. 2 Značky shody

Česká republika, jako členský stát evropské unie se zavazuje využívat harmonizované normy, které jsou schvalovány pro všechny členské země. Znamená to tedy, že pokud daný výrobek splňuje evropské normy, kterými je definován, může jej výrobce (nebo dovozce) uvádět na trh v rámci celého evropského tržního prostoru. Zavádění těchto požadavků na elektrická zařízení je na evropské úrovni řešeno pomocí takzvaných direktiv [5], které následně jednotlivé členské státy zavádějí již zmiňovanými nařízeními vlády.

Příkladem takového legislativního procesu může být jedna z nejčastěji užívaných evropských direktiv, která je známá pod zkratkou EMCD (EMC Directive). Tato direktiva s označením 2014/30/EU [6] zavádí povinnost výrobcům uvádět na trh pouze elektrotechnické výrobky, které jsou v souladu s harmonizovanými normami. Protože tato direktiva, nemá

žádnou právní oporu, jsou její požadavky zaváděny jednotlivými vládami. V České republice konkrétně tato direktiva vstoupila v platnost nařízením vlády číslo 117/2016 Sbírky [7]. Obecně takových direktiv a nařízení vlády bychom mohli najít velké množství a každá upravuje určitou skupinu výrobků.

Technické normy jsou hlavním nástrojem, který se využívá k takzvanému ověření shody. V praxi to znamená, že dané zařízení (odborně nazýváno jako stanovený výrobek) se ověří, zda splňuje všechny požadavky, které jsou v dané normě uvedeny. V normách můžeme nalézt detailní popisy požadavků na zařízení, a to včetně postupů zkoušek, mezních limitů, povolených měřících přístrojů a vybavení, funkčních kritérií a dalších. Důležitým orgánem pro takové ověřování jsou akreditované laboratoře. Tyto laboratoře mají potřebné vybavení a techniku, pro provádění zkoušek dle norem, pro které mají akreditaci a mohou vydávat výrobcům nebo dovozcům potřebné protokoly, které určují shodu výrobku.

1.3 Emise a odolnost elektrických zařízení

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, každý elektrotechnický výrobek musí splňovat určité limity pro vyzařované emise a zároveň být dostatečně odolný proti okolnímu rušení.

Mezi základní a zároveň nejpoužívanější typy rušení můžeme zařadit:

- elektrostatický výboj (ESD),
- rychlé elektrické přechodové jevy (EFT),
- rázovou vlnu (SURGE),
- krátkodobé poklesy napájení (DIP),
- krátkodobé výpadky napájení (Interrupts),
- magnetické pole síťového kmitočtu,
- vysokofrekvenční rušení elektromagnetickým polem (vyzařovaným či vedeným).

Všechna tato rušení mají za úkol prověřit schopnost zařízení odolat funkčním chybám ve stanovených mezích. Mezi nejznámější bude patřit ESD (definováno v normě ČSN EN 61000-4-2 [8]) se kterým se během svého života setká nejen každé elektrické zařízení ale též každý člověk. Uvedená norma rozlišuje výboj kontaktní a vzduchový, kde pro kontaktní formu se používá hrotová elektroda, která se přímo přikládá na kryt zařízení a poté se aplikuje výboj. Naopak vzduchová metoda využívá kulovou elektrodu a výboj se aplikuje pomalým přiblížením elektrody kolmo k místu působení. Obvyklé velikosti napětí aplikovaného na zařízení jsou ± 8 kV vzduchový výboj (dle normy až ± 15 kV) a ± 4 kV pro kontaktní výboj (dle normy až ± 8 kV). Rychlé přechodové jevy EFT (ČSN EN 61000-4-4

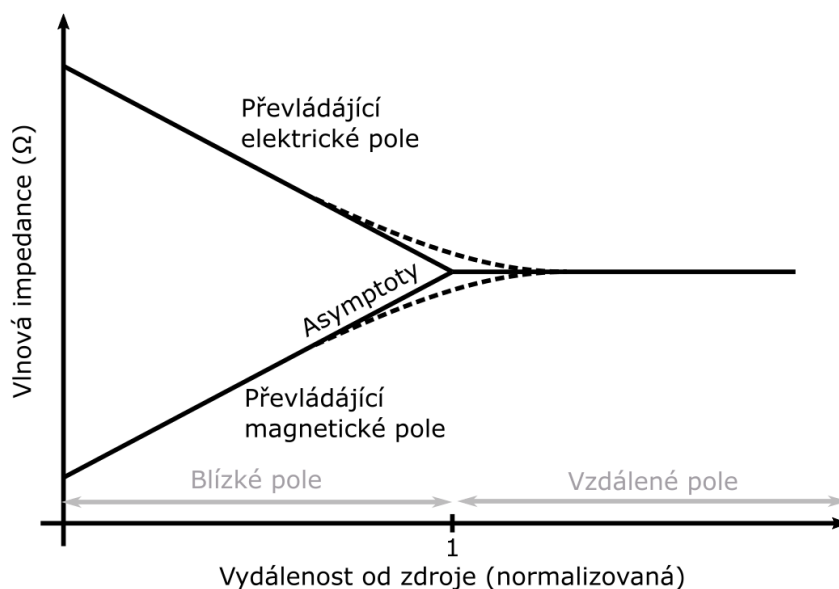
[9]) slouží k simulaci spínání rychlých zátěží jako jsou například elektronické předradníky pro domovní osvětlení. Takové zátěže generují v napájecím rozvodu rychlé napěťové špičky, kterým musí zkoušené zařízení odolat. Typické hodnoty aplikovaného rušení jsou ± 1 kV do napájecích svorek zařízení a $\pm 0,5$ kV do datových svorek. Rázová vlna (ČSN EN 61000-4-5 [10]), nebo také rázový impuls, slouží k simulaci blízkého úderu blesku. Tedy blízkého úderu blesku ve smyslu takovém, jaká přepětí se mohou během takové události objevit na napájecích nebo datových svorkách zařízení. Běžnými hodnotami jsou ± 1 kV (Line-to-Line) a $\pm 0,5$ kV (Line-to-Earth). Toto rušení se oproti předchozím liší primárně v délce svého trvání, kdy tvar vlny je definován náběžnou hranou (čelem) běžně okolo $8 \mu\text{s}$, a sestupnou hranou běžně okolo $20 \mu\text{s}$. Tyto hodnoty jsou o několik řádů větší, neboť ESD je definováno pro jednotky až desítky nanosekund a obdobně je definováno i EFT. Krátkodobé výpadky a poklesy napájecího napětí (ČSN EN 61000-4-11 [11]) mají za úkol prověřit zařízení, zdali je schopno vydržet náhlý výpadek nebo pokles napájení bez přerušení svojí činnosti. Jedním typem je výpadek, který je kratší než jednu periodu sítě (< 20 ms) a výpadky nebo poklesy trvající déle než jednu periodu. Jak dlouhé výpadky a poklesy (a na jaké zbytkové napětí sítě) se mají na zařízení aplikovat je vždy možné nalézt v příslušných normách. Magnetické pole síťového kmitočtu (ČSN EN 61000-4-8 [12]) se aplikuje pouze na zařízení, které je citlivé na přítomnost magnetického pole. Typicky se jedná o zařízení vybavené senzory magnetického pole (například Hallovy sondy). Vysokofrekvenční rušení elektromagnetickým polem je pak velice podobné měření vyzařovaných emisí, kdy se anténa nevyužívá jako přijímač ale jako vysílač. Vyzařované emise vzduchem se vyhodnocují ve vzdáleném poli pomocí antény s přijímačem rušení (nebo spektrálním analyzátozem). Norma definuje několik možností měření, neboť přítomnost elektromagnetických signálů je běžným jevem a je zapotřebí tyto rušivé signály, které nesouvisí se zkoušeným zařízením, filtrovat nebo odstínit. V současnosti zřejmě nejpoužívanější metodou je využití částečně či plně bezodrazové komory, které vytváří prostředí, jenž je odstíněné od okolí a zároveň se v ní nevytváří odrazy signálů. Z vysokofrekvenčního pohledu se tedy chová jako nekonečný prostor. Zařízení umístěné před anténou, je pak na nevodivém stole obvykle vzdáleno tři nebo deset metrů a je různě otáčeno, aby se dosáhlo úhlu s největší intenzitou vyzařování. Současně se mění i výška antény a její polarizace. Pro měření emisí šířených vedením se využívá několik metod a měřicích zařízení. Například pro měření na napájecích svorkách zařízení se využívá impedančně stabilizované sítě (LISN – z anglického Line Impedance Stabilization Network), která umožňuje přivést vysokofrekvenční signál na vstup spektrálního analyzátoru nebo přijímače rušení.

2 Účinnost stínění plochých materiálů

Následující kapitola popisuje fyzikální podstatu stínění a chování elektromagnetické vlny při průchodu stínícím materiálem.

2.1 Blízké a vzdálené pole

Nejčastějším zdrojem syntetického elektromagnetického pole je anténa, která udává vlastnosti v blízkém poli. To je primárně dáno konstrukcí antény. Pokud budeme uvažovat anténu typu dipól nebo monopól, pak je elektromagnetická vlna vytvářena vysokoimpedančním zdrojem, a tedy v blízkém poli převažuje elektrická složka. Naopak v případě smyčkové antény se jedná o zdroj nízkoimpedanční, kde výrazně převyšuje magnetická složka.



Obr. 3 Závislost vlnové impedance na vzdálenosti od zdroje

Na předchozím obrázku je uvedena závislost vlnové impedance na vzdálenosti od zdroje. Vzdálenost od zdroje, je normalizovaná ke vztahu uvedeném níže. Důležitý bod, je dán vztahem (2.1)

$$\frac{\lambda}{2\pi} = 1 \quad (2.1)$$

kde λ je vlnová délka dané elektromagnetické vlny. V této vzdálenosti od zdroje, již není možné rozlišit elektrickou a magnetickou složku elektromagnetického pole. Tento předpoklad je platný pouze pro zařízení, která jsou zanedbatelná k vlnové délce.

Z předchozích informací tedy vyplývá, že pokud se bude vyhodnocovat účinnost stínění, je zapotřebí rozlišit, zdali budeme měření provádět v blízkém nebo vzdáleném poli. Při měření v blízkém poli bude nutné rozlišit a samostatně měřit, obě složky elektromagnetického pole. Naopak ve vzdáleném poli budeme vyhodnocovat elektromagnetické pole jako celek.

2.2 Účinnost stínění

Jak je uvedeno v [13], abychom byli schopni efektivně vyhodnocovat účinnost stínění, je vhodné ji vyjadřovat v decibelech. Převedením do těchto jednotek získáme převod z lineárních jednotek do jednotek logaritmických, kde je lépe možné vykreslovat výsledky měření a zároveň získáme větší grafický rozsah. Výkonová úroveň v decibelech je definována ve (2.2).

$$P = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \text{ (dB)}. \quad (2.2)$$

Vzorec nám tedy neudává absolutní hodnotu ale hodnotu poměru mezi dvěma hodnotami (tj. relativní hodnotu). V předchozím případě by tedy tato hodnota mohla definovat hodnotu zesílení ($P_2 > P_1$, $P > 0$) nebo naopak útlumu ($P_2 < P_1$, $P < 0$).

Účinnost stínění tedy definujeme jako jednoduchý poměr mezi velikostí intenzity vstupujícího elektrického pole a vystupující intenzitou elektrického pole. S využitím decibelových jednotek tedy můžeme psát vztah (2.3).

$$SE = 20 \cdot \log \frac{E_{in}}{E_{out}} \text{ (dB)}. \quad (2.3)$$

Analogicky bychom mohli definovat i pro magnetické pole vztah (2.4).

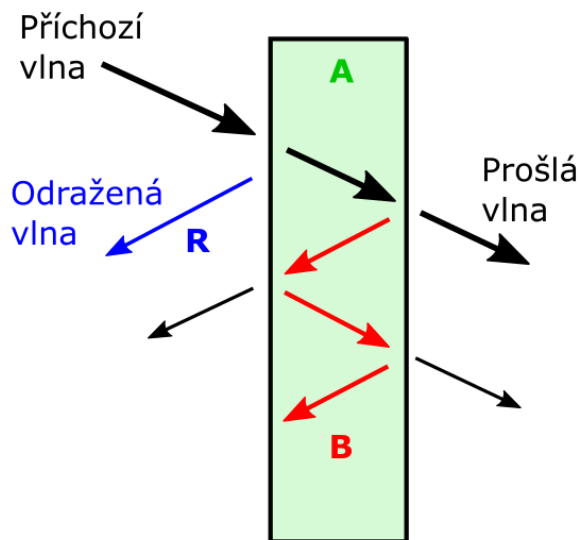
$$SE = 20 \cdot \log \frac{H_{in}}{H_{out}} \text{ (dB)}. \quad (2.4)$$

Fyzikální podstatu stínění bychom mohli definovat pomocí tří jevů, které vznikají v průběhu průchodu elektromagnetické vlny materiálem. Jednalo by se o ztráty absorpcí (A), ztráty reflexí (R) a ztráty několikanásobným odrazem (B). Absorpční ztráty odpovídají ztrátám energie uvnitř daného stínícího materiálu a nejsou závislé na tom, jestli se jedná o blízké nebo vzdálené pole. Ztráty reflexí (nebo také odrazem), jsou ztráty vzniklé odražením elektromagnetické vlny od povrchu materiálu a na rozdíl od absorpčních ztrát jsou závislé na typu pole a vlnové impedanci. Pokud je stínící účinnost daného materiálu nízká a materiál

je velmi tenký, je zapotřebí ještě uvažovat ztráty několikanásobným odrazem, které pokrývají vliv několikanásobných odrazů uvnitř daného materiálu. Celkově bychom tedy mohli definovat vztah (2.5), který všechny komponenty spojuje.

$$SE = A + R + B \text{ (dB)}. \quad (2.5)$$

Graficky by bylo možné tyto složky znázornit následovně.



Obr. 4 Grafické znázornění ztrát

2.3 Složky účinnosti stínění

Níže jsou popsány jednotlivé složky účinnosti stínění tak, jak jsou definovány v [13].

2.3.1 Ztráty absorpcí

Absorpční ztráty jsou ztráty způsobené uvnitř daného materiálu. Amplituda elektromagnetické vlny vlivem průchodu materiálem exponenciálně klesá s tloušťkou materiálu. Indukované proudy ve stínícím materiálu produkují ohmické ztráty a teplo. Pro jednotlivé složky můžeme definovat vztahy:

$$E_{out} = E_{in} \cdot e^{-t/\delta}, \quad (2.6)$$

$$H_{out} = H_{in} \cdot e^{-t/\delta}, \quad (2.7)$$

kde t je vzdálenost uvnitř materiálu a δ je ekvivalentní hloubka vniku, která odpovídá vztahu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \text{ (m)}, \quad (2.8)$$

kde ω je úhlová rychlost, μ je relativní permeabilita materiálu a σ je relativní vodivost stínícího materiálu. Dosazením do předchozích vzorců, tedy dostáváme finální vztah:

$$A = 20 \cdot \log \frac{E_{in}}{E_{out}} = 20 \cdot \log e^{t/\delta}. \quad (2.9)$$

2.3.2 Ztráty odrazem

Ztráty odrazem jsou definovány rozdílnou charakteristickou impedancí dvou materiálů na rozhraní. Při průchodu z jednoho rozhraní do druhého tedy můžeme definovat vztah:

$$E_{out} = \frac{2 \cdot Z_{out}}{Z_{in} + Z_{out}} \cdot E_{in}. \quad (2.10)$$

A obdobně pro magnetickou složku vztah:

$$H_{out} = \frac{2 \cdot Z_{out}}{Z_{in} + Z_{out}} \cdot H_{in}. \quad (2.11)$$

Běžně samozřejmě prochází vlna stínícím materiálem, a tedy dojde ke dvěma odrazům, neboť vlna musí proniknout do materiálu a opět ven. V takovém případě je nutno uvedené vzorce aplikovat dvakrát.

2.3.3 Ztráty několikanásobným odrazem

Pokud budeme uvažovat tenký materiál, vzhledem k jeho ekvivalentní hloubce vniku a zároveň jeho nízkou absorpční stínící účinnost, musíme ještě započítat ztráty několikanásobným odrazem. Tyto ztráty definuje vztah:

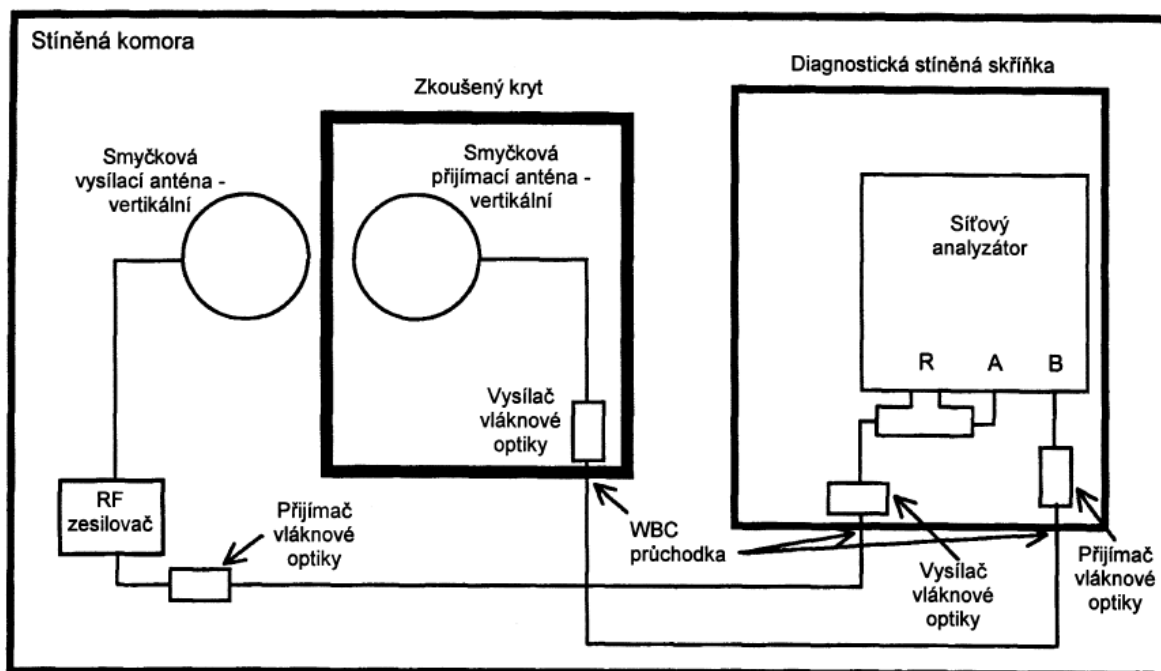
$$B = 20 \cdot \log \left(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \right) \text{ (dB)}. \quad (2.12)$$

3 Rešerše možností měření

Elektromagnetická odolnost a vyzařování jsou klíčovou vlastností každého elektrického zařízení. Jeden z efektivních způsobů, jak snížit emisivitu zařízení nebo zvýšit jeho odolnost je použití stínících materiálů. V této kapitole jsou uvedeny možnosti, jak materiály porovnávat z hlediska jejich stínící účinnosti.

3.1 ČSN EN 61000-5-7

Norma ČSN EN 61000-5-7, celým názvem „*Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 5-7: Směrnice o instalacích a zmírňování vlivů – Stupně ochrany kryty proti elektromagnetickým rušením (EM kód)*“ [14], je norma, která definuje, jakým způsobem lze porovnávat kryty z hlediska stínící účinnosti v různých kmitočtových pásmech. Norma se zabývá pouze prázdnými kryty v pásmu 10 kHz až 40 GHz. Zkušební sestava pro zkoušku dle této normy je uvedena na Obr. 5.



Obr. 5 Blokové schéma měření dle ČSN EN 61000-5-7

Základním principem je měření ve stíněné komoře. Používá se sada dvou smyčkových antén, kdy první je vysílací a slouží ke generování vysokofrekvenčního signálu. Druhá anténa, je pak určena jako přijímací a je umístěna ve zkoušeném krytu. Porovnáním měření s krytem a bez krytu, dostaneme výslednou stínící účinnost v daném kmitočtovém pásmu.

Výsledkem zkoušek definovaných touto normou, je takzvaný EM kód. Tento kód specifikuje stínící účinnost pro dané kmitočtové pásmo, tak jak je definováno v tabulce níže.

Z tabulky bychom tedy mohli například sestavit kód EMx233xx, který by nám označoval, že daný kryt má stínící účinnost minimálně 20 dB v pásmu od 100 kHz do 1 MHz a minimálně 30 dB v pásmu od 1 MHz do 1 GHz. Písmeno „x“ v kódu znamená, že kryt nebyl pro dané pásmo testován.

Kmitočtové pásmo	Označovač stínění	Stínící účinnost dB	Hodnota označovače stínění
10 kHz - 100 kHz	A	nezkouší se	x
100 kHz - 1 MHz	B	<10	0
1 MHz - 30 MHz	C	≥10	1
30 MHz - 1 GHz	D	≥20	2
1 GHz - 10 GHz	E	≥30	3
10 GHz - 40 GHz	F	≥40	4
		≥50	5
		≥60	6
		≥70	7
		≥80	8
		≥100	9

Obr. 6 EM kódy [14]

Cílem této práce je měření plochých materiálů, a tedy tato metoda dle normy ČSN EN 61000-5-7 je pro řešení této diplomové práce nevhodná. Nicméně, základní princip měření, popsáný v této normě lze využít pro stavbu přípravku pro měření. Tedy, použití dvou antén, kde jedna je v přijímacím režimu a druhá ve vysílacím a porovnání výsledků měření s krytem a bez krytu.

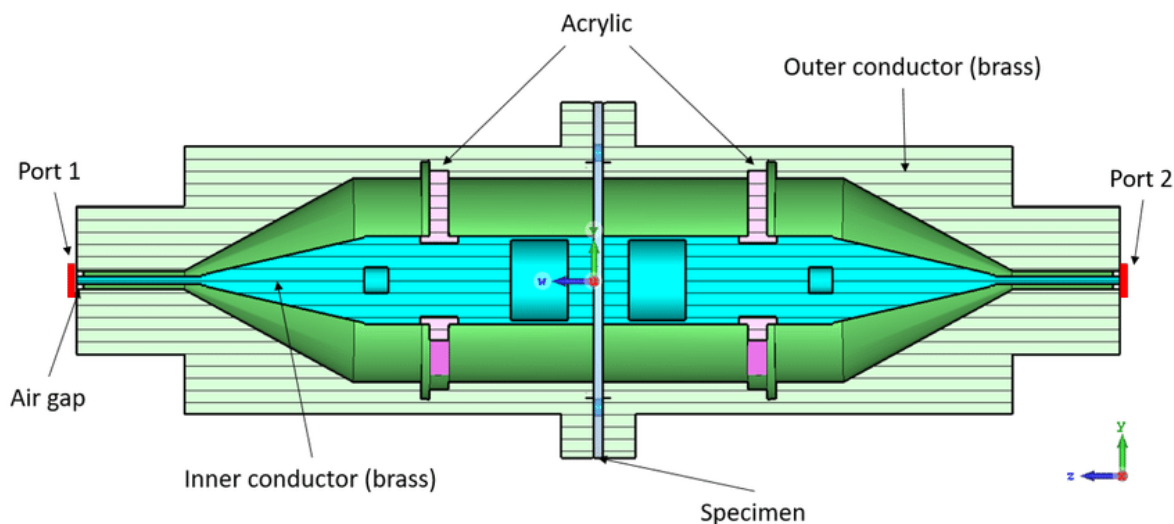
3.2 ASTM D-4935-99

Standard ASTM D-4935-99 [15] je jedním ze starších normovaných postupů pro měření účinnosti stínění, nicméně v současnosti se jedná o nenormalizovaný postup, neboť byla norma vyřazena v roce 2005. I přes její neplatnost je však stále používána některými odborníky pro svoji praktičnost. Obecně norma uvádí svoji použitelnost ve frekvenčním pásmu od 30 MHz do 1,5 GHz. Měřicí sestava je tvořena z následujících částí:



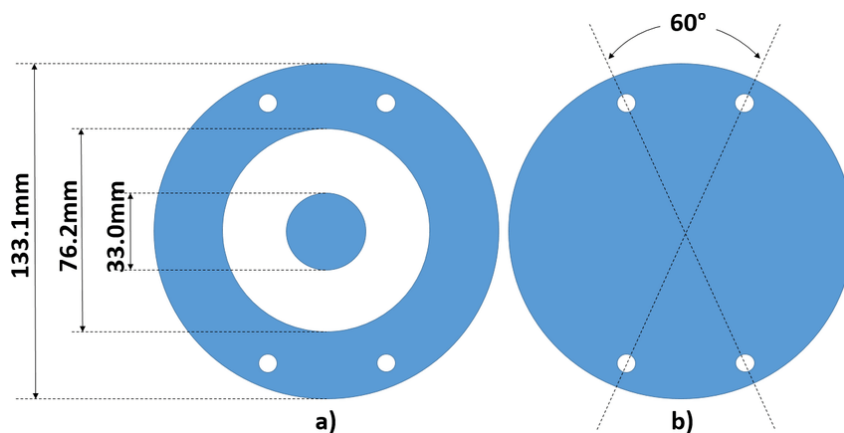
Obr. 7 Blokové schéma měření dle ASTM D-4935 [15]

- signální generátor – zdroj vysokofrekvenčního sinusového signálu s 50Ω výstupem,
- přijímač – přijímač s 50Ω vstupem, typicky spektrální analyzátor,
- měřený vzorek – dva definované vzorky (jeden jako referenční a druhý jako zátěž) se stejnou tloušťkou,
- atenuátory – útlumové články generátoru a přijímače od měřeného vzorku, které zajišťují impedanční přizpůsobení a omezují odrazy.



Obr. 9 Řez měřicím adaptérem ASTM D-4935 [16]

Na obrázku 9 je vidět řez měřicím adaptérem, který svírá měřený vzorek. Na jeho stranách jsou přípojná místa pro generátor a přijímač (Port 1 a Port 2). Jak je z obrázku patrné, bude výsledek měření a jeho opakovatelnost silně záviset na dobré fixaci měřeného vzorku k adaptéru. Čelní pohled na referenční vzorek (vlevo) a zátěžový vzorek (vpravo) je možné vidět na následujícím obrázku. Materiál vzorků musí být stejný.



Obr. 8 Referenční a zátěžový vzorek dle ASTM D-4935 [17]

3.3 ASTM D-4935-18

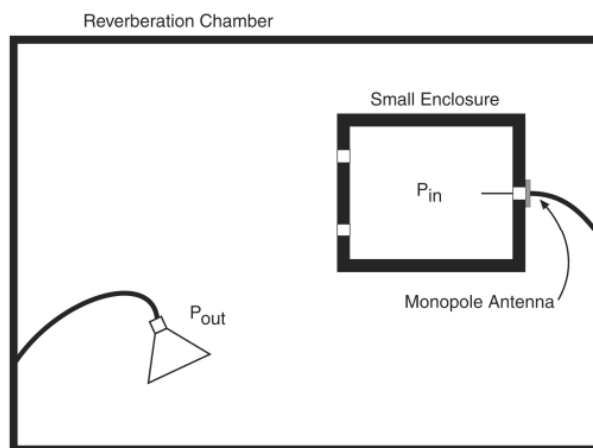
Ačkoliv předchozí zmíněný standard s číslicí 99 na konci (ASTM D-4935-99) byl vyřazen již v roce 2005, tak dle oficiálních stránek organizace ASTM [18] lze dohledat i nový standard s číslovkou 18 na konci, který odpovídá roku vydání (2018). Tento standard se opět zabývá měřením účinnosti stínění plochých materiálů a je v současnosti aktivním standardem. Doba mezi vyřazením původního standardu v roce 2005 a vydáním nového, tak činila celkem 13 let, během kterých vzniklo značné množství vědeckých prací, které se odkazují na původní standard a zmiňují neexistenci aktuálně platného standardizovaného měřicího postupu. Za zmínku stojí například článek *Simple Device for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness Measurement* [19], který vznikl pod záštitou člena organizace IEEE v roce 2009 anebo článek autorů z FEL ČVUT [20] z roku 2010.

Vzhledem k tomu, že tento standard není veřejně dostupný (pouze placená verze), nebylo možné porovnat metodiku měření se standardem původním. Nicméně jeho rozsah (11 stran) oproti původnímu rozsahu (10 stran) a stručný popis na stránkách organizace ASTM naznačuje, že oproti původní verzi nedošlo k zásadním úpravám.

3.4 Reverberační (odrazová) komora

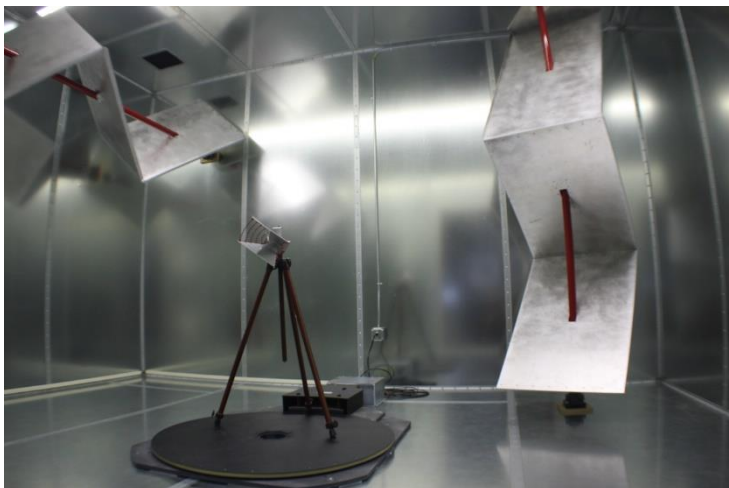
Opačným přístupem, než bezodrazová komora je právě komora plně odrazivá. V takovém případě nejsou stěny tvořeny absorbéry ale vysoce odrazivými plochami v kombinaci s natáčivými plochami uvnitř komory, které pomáhají vytvářet homogenní pole. Výsledkem takové metodiky je možnost dosáhnout vyšší intenzity pole s nižším vstupním výkonem.

Postupy měření a potřebné vybavení definuje norma IEEE Std. 299.1 TM-2013 [21]. Tato metoda je vhodná pouze pro uzavřené kryty velikosti od 0,1 do 2 metrů. Frekvenční pásmo pak dle normy začíná na 9 kHz a končí na 18 GHz.



Obr. 10 Blokové schéma měření v reverberační komoře [22]

Měření je velice podobné jako tomu je v případě ČSN EN 61000-5-7. Kryt se umístí do komory společně se zdrojem vysokofrekvenčního signálu a komora je utěsněna. Zdrojem signálu je obvykle signální generátor v kombinaci s budící anténou (například hřebenovou – ale není podmínkou, záleží na kmitočtovém rozsahu). Monopólová anténa, umístěná v krytu, pak slouží k připojení k přijímači a účinnost stínění je pak dána rozdílem mezi dodanou energií (P_{OUT}) a přijímanou energií (P_{IN}) měřenou s krytem a bez krytu, jak je uvedeno na obrázku 10.



Obr. 11 Ukázka vnitřku reverberační komory [23]

3.5 Sondy blízkého pole

Další možností měření účinnosti stínění, je využití sond blízkého pole. Tyto sondy jsou konstrukčně velmi jednoduché a jsou často využívány při lokalizaci zdroje elektromagnetického rušení. Jelikož se sondy používají v blízkém poli, existují samostatné sondy elektrického a magnetického pole. Sonda elektrického pole je většinou tvořena koaxiálním kabelem, který má na svém konci odizolovaný hrot nebo plochu a umožňuje tak vytvořit vysokoimpedanční vstup pro elektrické pole. Konstrukce se podobá klasické monopólové anténě. Naopak sonda magnetického pole je tvořena smyčkou z koaxiálního kabelu, která je přímo zakončena do stínění kabelu. Touto formou se vytváří nízkoimpedanční vstup pro magnetické pole, které prochází danou smyčkou. Konstrukce se tedy naopak podobá smyčkové anténě.

Forma měření touto metodou v podstatě vyplývá z předchozích možností měření. Jedna sonda bude využívána jako vysílací a druhá jako přijímací. Porovnáním přijímané intenzity pole se stínícím materiálem a bez stínícího materiálu dostaneme výslednou stínící účinnost.

Výhodou této metody je její jednoduchost a nízká náročnost. Sondy a přijímač totiž nemusí být kalibrovány, neboť se bude jednat o komparativní měření. Dále pak i vlastní konstrukce sond není náročná. Měření je taktéž možno provést pouze na jednom zařízení, pokud se použije například spektrální analyzátor s funkcí TG (Tracking Generator). Tato funkce umožňuje využít výstup generátoru, který je naladěn na shodnou frekvenci, jakou aktuálně používá vstup analyzátoru.



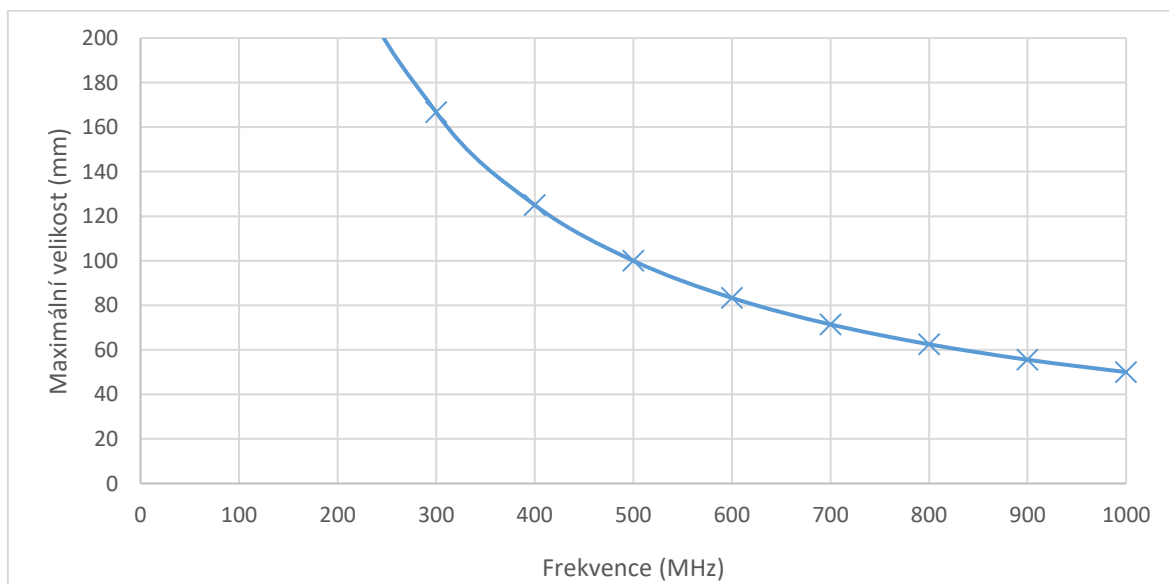
Obr. 12 Ukázka sond blízkého pole [24]

4 Zvolená metoda měření

První možnou metodou je měření podle ASTM D-4935-99. Výhodou této metody je známost zkušebního postupu, který je definován normou a výsledky tedy budou porovnatelné s jiným měřením, provedeném například v jiné laboratoři. Velkou nevýhodou tohoto řešení je vysoká konstrukční náročnost na přípravu testovací sestavy, především pak měřicího adaptéru pro uchycení vzorků. Druhou možností řešení diplomové práce je použití sond blízkého pole. Tato metoda umožní jednodušší přípravu k měření, a především možnost přizpůsobení sond vzhledem k měřeným vzorkům. Dále přidá možnost vědecktějšího přístupu k diplomové práci vzhledem k nutnosti prověřit, jakou velikost (případně tvar) musí sonda splnit vzhledem k měřenému vzorku. V poslední řadě také toto řešení bude výrazně levnější než dodržení postupu podle ASTM standardu.

4.1 Konstrukce sond blízkého pole

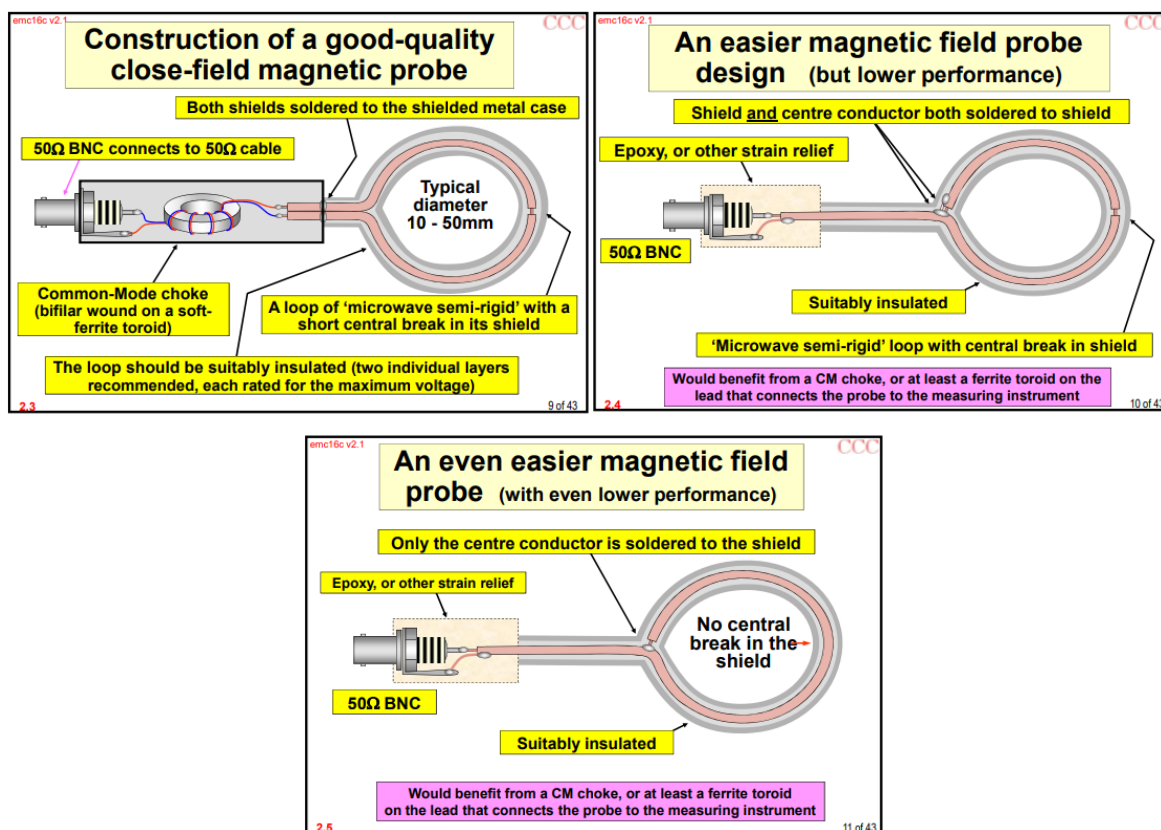
Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1, při konstrukci sond blízkého pole musíme rozlišovat, jestli se jedná o sondu magnetického pole (nízkoimpedanční anténa) nebo o sondu elektrického pole (vysokoimpedanční anténa). V online webinaru [25] můžeme najít důležitou informaci a sice, že největší velikost sondy by neměla přesahovat $1/6$ vlnové délky nejvyšší měřeného signálu. Tedy v případě této práce, kdy je měřeno do 1 GHz, by největší velikost měla být 50 mm (tato práce však půjde přes tento limit). Pokud bychom tuto informaci vynesli do grafu, můžeme pozorovat následující závislost.



Graf 1 Závislost maximální velikosti sondy na frekvenci

4.1.1 Sonda magnetického pole

Bude se jednat o nízkoimpedanční anténu s uzavřenou smyčkou. Pokud se podíváme na typickou konstrukci, jak taková sonda obvykle vypadá (například [24]) můžeme vidět, že se jedná o malou smyčku, která je zakončená připojovacím vysokofrekvenčním konektorem. Tedy z principu konstrukce, bude intenzita snímaného pole závislá i na úhlu natočení sondy. Z online webináře [25], jsou zde uvedeny příklady základních konstrukcí.

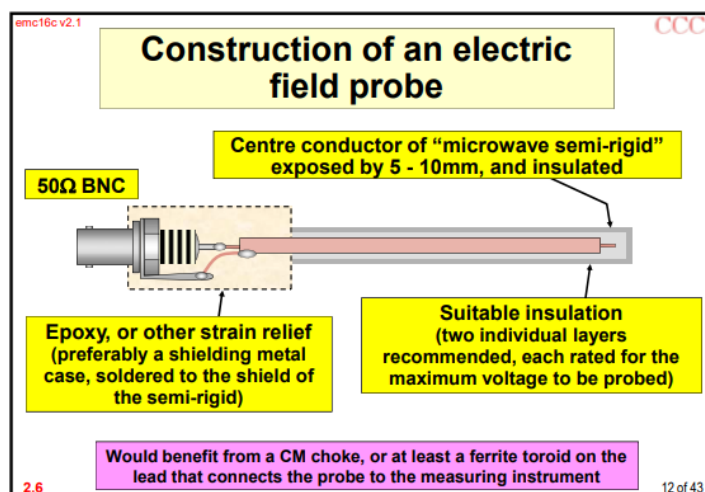


Obr. 13 Různé konstrukce magnetických sond [25]

Vzhledem k tomu, že sondy vyráběné pro tuto práci budou ze standardního plošného spoje, budeme sondy konstruovat podle druhé varianty (tedy s mezerou uprostřed). Z hlediska geometrického tvaru nejsou sondy magnetického pole omezené. V některých případech může být i jiný než kruhový tvar výhodnější.

4.1.2 Sonda elektrického pole

Sonda elektrického pole musí být vysokoimpedanční anténa se strukturou, která opouští stínění. Jak je patrné z obrázku 12, může se jednat o konstrukci podobnou prutové anténě, případně může být sonda zakončena plochou. Příklad antény prutové konstrukce je zobrazen níže.



Obr. 14 Příklad konstrukce sondy elektrického pole [25]

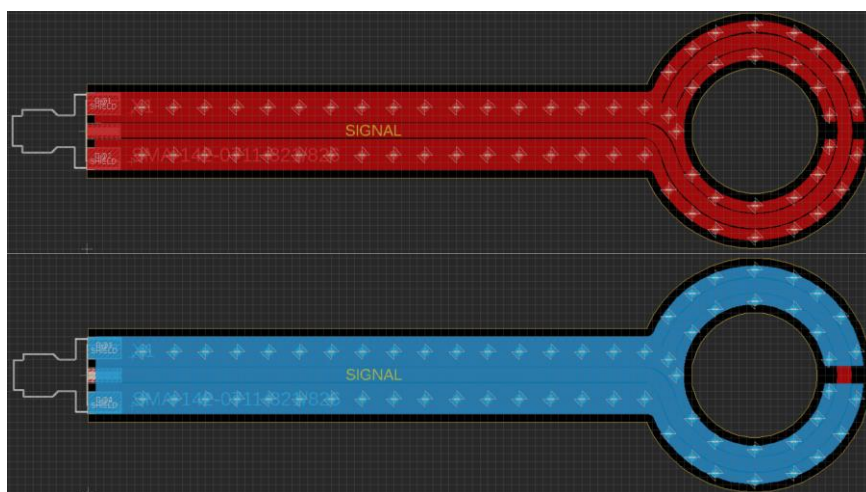
4.2 Příprava pro měření se sondami blízkého pole

Zvolená metoda měření, pomocí sond blízkého pole, vyžaduje rozdělení měření na část, kdy se měří elektrické pole a část kdy se měří pole magnetické. Za tímto účelem byly vytvořeny sady sond, vhodné pro konkrétní typ měření.

4.2.1 Návrh sond

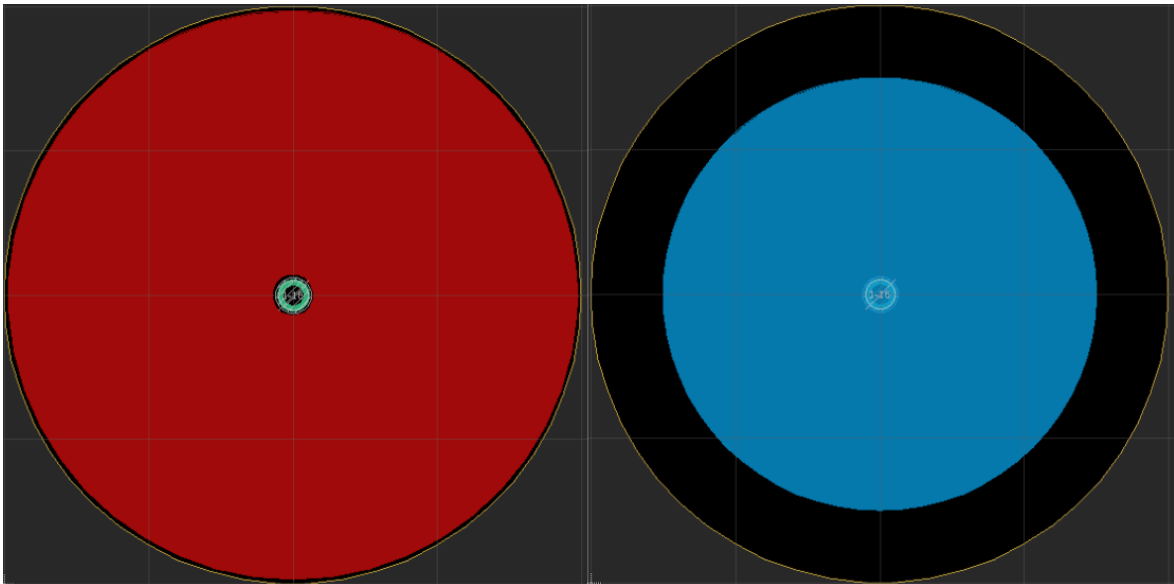
Typické konstrukce sond blízkého pole, jak byly popsány v kapitole 4.1, byly realizovány formou desky plošného spoje. Realizace sond touto formou umožní lepší možnosti parametrizace sond pro zjištění optimální konstrukce k měření účinnosti stínění.

Sondy magnetického pole (dále jen jako H sondy) jsou tvořeny koaxiálním kabelem, který je tvarován do smyčky a terminován do stínění. Následně je ve smyčce vytvořen otvor ve stínění. Obdobnou konstrukci je možné realizovat pomocí dvouvrstvého plošného spoje.



Obr. 15 Horní a spodní strana DPS sondy H pole

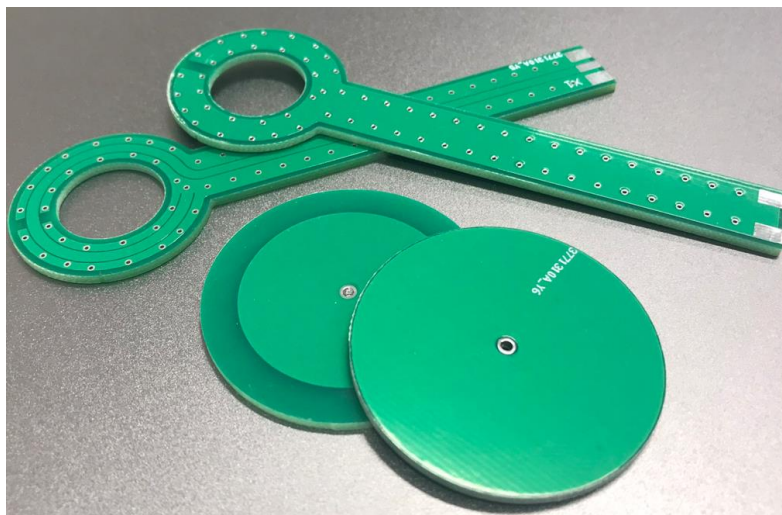
Realizace sondy elektrického pole (dále jen jako E sondy) je inspirována profesionální realizací dle obrázku 12. V takovém případě, je koaxiální kabel přiveden na plochu, která slouží jako vysokoimpedanční vstup nebo výstup. Pro realizaci pomocí plošného spoje využijeme opět dvouvrstvou variantu, kde horní vrstva bude použita pro montáž vysokofrekvenčního konektoru a zároveň bude připojena ke stínění koaxiálního kabelu. Spodní vrstva DPS pak bude připojena k signálovému vstupu nebo výstupu.



Obr. 16 Horní a spodní strana DPS sondy E pole

4.2.2 Realizace sond

Pro realizaci menších sond byla objednána profesionální výroba DPS.



Obr. 17 Menší sondy blízkého pole

Na obrázku 17 je možné vidět oba typy sond. Sondu elektrického pole tvoří kruhový plošný spoj, ke kterému se osadí SMA konektor. Horní strana plošného spoje, která je celá vyplněná

mědí, je zde připojena ke stínění koaxiálního kabelu. Spodní strana je pak připojena k signálové žíle koaxiálního kabelu a slouží jako vlastní sonda. Naopak sonda magnetického pole je tvořena smyčkou, která signálový vodič na konci ukončuje do stínění. Tím se vytváří nízkoimpedanční anténa, která reaguje na přítomnost magnetického pole uvnitř smyčky. Obdobným způsobem byly vytvořeny i sondy s větším průměrem, aby se prověřil možný rozdíl v citlivosti sond.



Obr. 18 Větší sondy blízkého pole

Při přípravě sond elektrického pole bylo zapotřebí důsledně kontrolovat míru pájení ze signálové strany. Jakékoliv větší množství pájky by způsobovalo vytvoření zakřivení sondy, které by následně mohlo zásadním způsobem ovlivňovat výsledky měření. U sond magnetického pole bylo naopak zapotřebí vytvořit důkladné spojení obou stran plošného spoje, aby se tak simulovalo stínění, jaké je na koaxiálním kabelu. Zatímco v prvním případě (menších sond) byla objednána profesionální výroba, která zajišťovala výborné prokovení mezi vrstvami, v případě větších sond se přistoupilo na výrobu na prototypové fréze. V případě větších sond je tedy prokovení zajištěno pájením v kombinaci s protaženým měděným drátkem.

Vzhledem k výsledkům měření, které byly v průběhu práce zjištěny, bylo v průběhu řešení této práce přistoupeno k realizaci několika dalších sad sond, které byly následně měřeny. Níže je tedy v tabulkách přehledně uvedeno, jaké všechny sondy byly v práci realizovány.

Tabulka 1 Seznam realizovaných sond magnetického pole

Číslo	Vnější průměr	Vnitřní průměr	Průměr signálu	Délka signálu	Poznámka
1	30 mm	15 mm	23,0 mm	72,25 mm	viz. kapitola 6.4
2	100 mm	80 mm	90,0 mm	360,0 mm	čtvercová, viz. kapitola 6.5
3	50 mm	35 mm	42,5 mm	133,5 mm	viz. kapitola 6.7
4	70 mm	55 mm	62,5 mm	196,3 mm	viz. kapitola 6.7
5	90 mm	75 mm	82,5 mm	259,2 mm	viz. kapitola 6.7
6	110 mm	95 mm	102,5 mm	322,0 mm	viz. kapitola 6.7
7	130 mm	115 mm	122,5 mm	384,8 mm	viz. kapitola 6.7

Tabulka 2 Seznam realizovaných sond elektrického pole

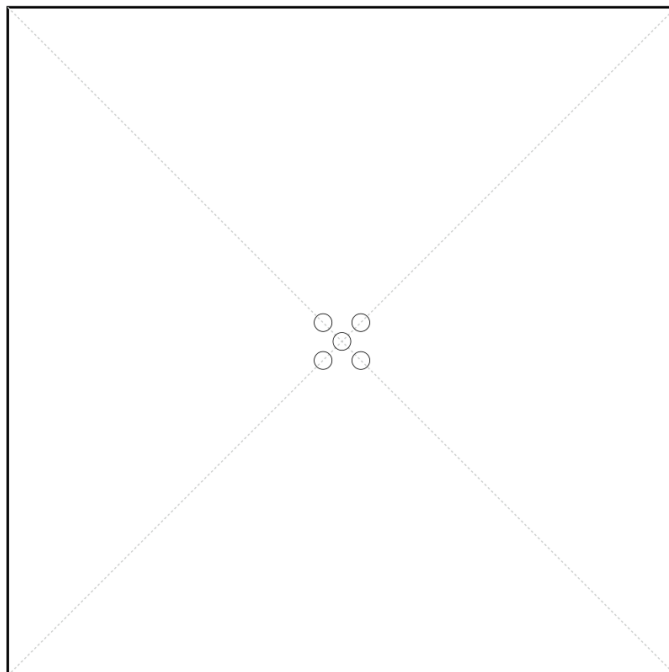
Číslo	Vnější průměr	Vnitřní průměr	Poznámka
1	40 mm	30 mm	viz. kapitola 6.2
2	130 mm	120 mm	čtvercová, viz. kapitola 6.5
3	50 mm	40 mm	viz. kapitola 6.6
4	60 mm	50 mm	viz. kapitola 6.6
5	70 mm	60 mm	viz. kapitola 6.6
6	80 mm	70 mm	viz. kapitola 6.6
7	90 mm	80 mm	viz. kapitola 6.6
8	100 mm	90 mm	viz. kapitola 6.6
9	110 mm	100 mm	Vyřazena (výrobní defekt)
10	120 mm	110 mm	viz. kapitola 6.6
11	130 mm	120 mm	viz. kapitola 6.6
12	140 mm	130 mm	viz. kapitola 6.6

4.3 Příprava vzorků

Dodané vzorky materiálů jsou čtvercového tvaru o straně 150 mm. Pro měření byly použity následující materiály:

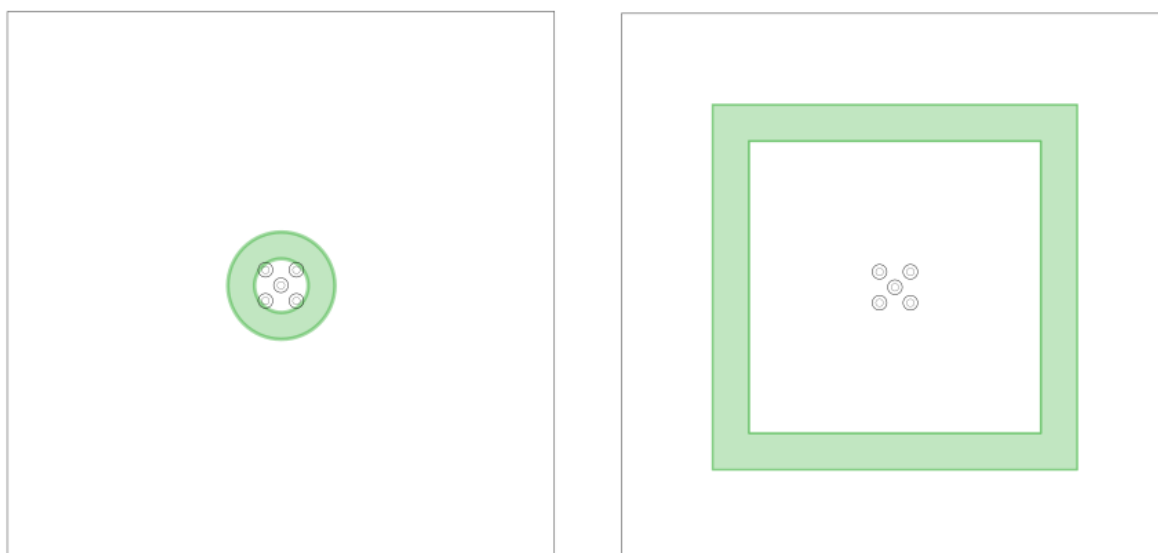
- jednovrstvý plošný spoj,
- dvouvrstvý plošný spoj,
- hliník,
- mosaz,
- železo.

Pro měření účinnosti stínění se vždy od každého materiálu jeden vzorek nechal bez zásahu a do dalších dvou se vyvrtali otvory o průměru 2 a 4 mm. Každý vrtaný vzorek vždy obsahoval pět děr stejného průměru, umístěných ve skupině uprostřed vzorku. Umístění vrtaných otvorů je na obrázku.



Obr. 19 Umístění otvorů v rámci vzorku

Umístění děr uprostřed vzorku pomůže zpřesnit měření, aby nedocházelo k vyřezávání pole okolo hrany vzorku. Další obrázek ukazuje, jaké je při měření umístění vzorku vzhledem k magnetické sondě.



Obr. 20 Porovnání velikostí otvorů a sond

Takovéto umístění tedy umožní porovnat citlivost sondy vzhledem k velikosti vzorků a otvorů. Obdobným způsobem by bylo možné porovnat i sondy elektrického pole, které měly průměry 30 mm a 120 mm. Dále byly změřeny tloušťky vzorků a provedeno průměrování.

Tabulka 3 Měření tloušťky vzorků

Vzorek	Měření 1 (mm)	Měření 2 (mm)	Měření 3 (mm)	Měření 4 (mm)	Výsledek (mm)
Cu 35μm, bez děr	1,241	1,245	1,256	1,247	1,247
Cu 35μm, 2 mm	1,252	1,252	1,244	1,300	1,262
Cu 35μm, 4 mm	1,241	1,232	1,244	1,233	1,238
Cu 2x35μm, bez děr	1,092	1,122	1,126	1,089	1,107
Cu 2x35μm, 2 mm	1,109	1,128	1,086	1,116	1,110
Cu 2x35μm, 4 mm	1,119	1,122	1,123	1,118	1,121
Hliník, bez děr	0,963	0,964	0,952	0,947	0,957
Hliník, 2 mm	0,954	0,953	0,965	0,971	0,961
Hliník, 4 mm	0,966	0,969	0,953	0,949	0,959
Mosaz, bez děr	0,513	0,505	0,505	0,516	0,510
Mosaz, 2 mm	0,511	0,565	0,508	0,505	0,522
Mosaz, 4 mm	0,505	0,501	0,504	0,505	0,504
Železo, bez děr	0,789	0,797	0,882	0,796	0,816
Železo, 2 mm	0,782	0,789	0,773	0,783	0,782
Železo, 4 mm	0,777	0,803	0,803	0,787	0,793

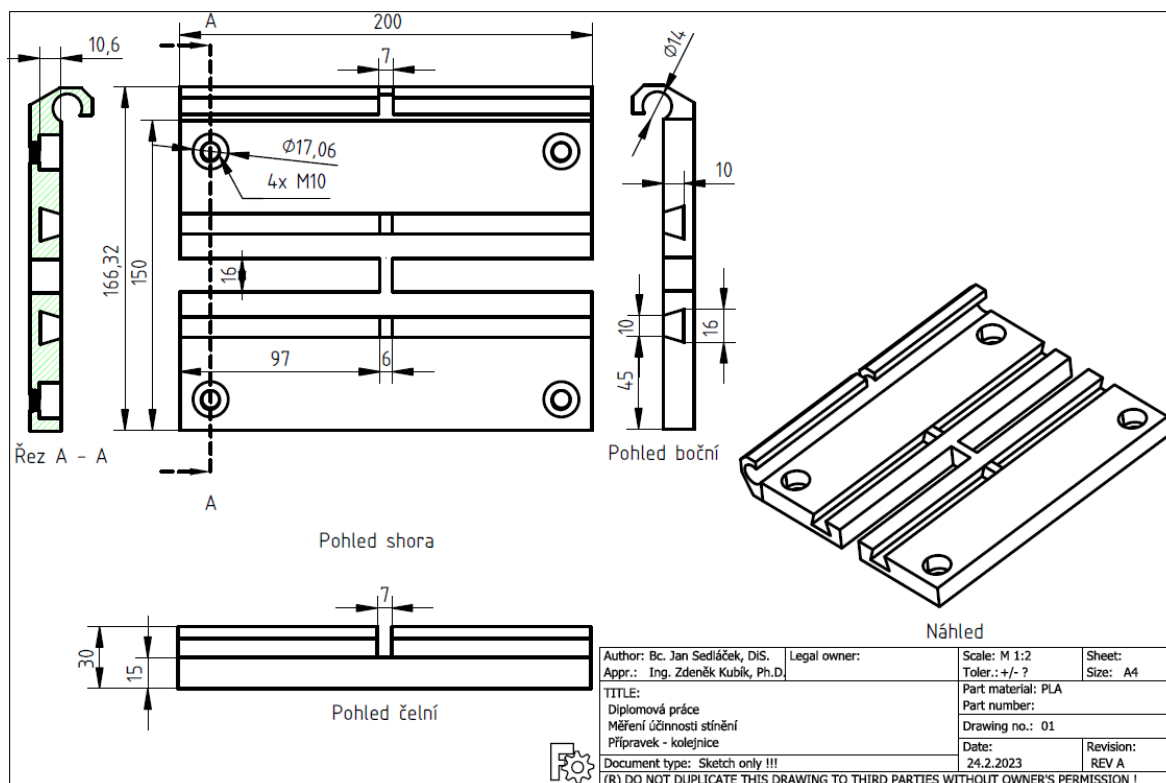
5 Přípravek pro měření

Pro zajištění dobré opakovatelnosti měření, byl vytvořen přípravek, který umožňuje sondy a vzorky zajistit v konkrétní pozici, aby nedocházelo k ovlivňování jednotlivých vzdáleností mezi prvky měřicí sestavy.

5.1 Základní kolejnice

První částí, ze které vychází celá sestava je základní kolejnicový díl. Tento díl plní základní a nejdůležitější funkci, kterou je možnost nastavení vzdálenosti mezi vzorky a poskytuje možnost jejich aretace. Pro tuto funkci byla zvolena konstrukce s pojezdovými kolejnicemi, které jsou ve tvaru lichoběžníku. Tato konstrukce umožní snížení počtu stupňů volnosti, kde držákům sond zbude právě jeden stupeň volnosti.

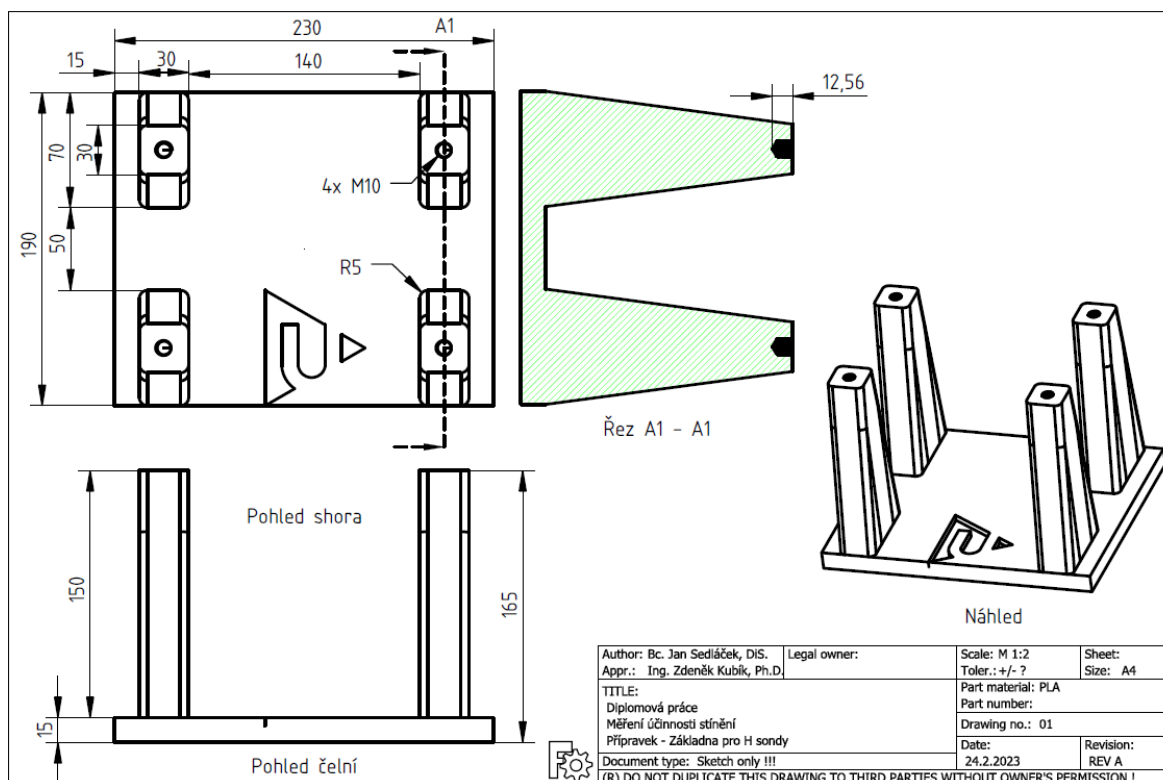
Kromě výše uvedeného, poskytuje tento díl aretační kloub, který se využívá pro držák vzorku. Tento prvek vytvoří kloubovou vazbu a umožní druhému dílu vyklápění vzorku měřeného materiálu. Kolejnicový díl je možné upevnit pomocí čtyř šroubů M10 k základně, která je uzpůsobená k tomuto dílu. Vzhledem k tomu, že díl obsahuje závit a kolejnicovou součást citlivou na přesnost, je nutné tento díl tisknout pouze z PLA (více v kapitole 5.8).



Obr. 21 Skica základního kolejnicového dílu

5.2 Základna pro měření s H sondami

Tato základna slouží pouze k uchycení kolejnicového dílu. Hlavním důvodem jeho použití je fakt, že sondy magnetického pole mají výstupní konektor směrem dolů a tato základna tedy vytváří dostatečný manipulační prostor pro připojení sond ke spektrálnímu analyzátoru. Důvodem pro použití této konstrukce je využití dostatečné tuhosti držáku sondy právě v tomto směru. Otvor, do kterého se sondy vkládají (v držáku sondy) je tvořen tenkými stěnami, aby bylo možné dosáhnout co největšího přiblížení sond k měřenému vzorku. Tato tenkostěnná konstrukce je tedy náchylná na případné otvory, které by narušovali její celistvost a způsobovali by kroucení držáku.



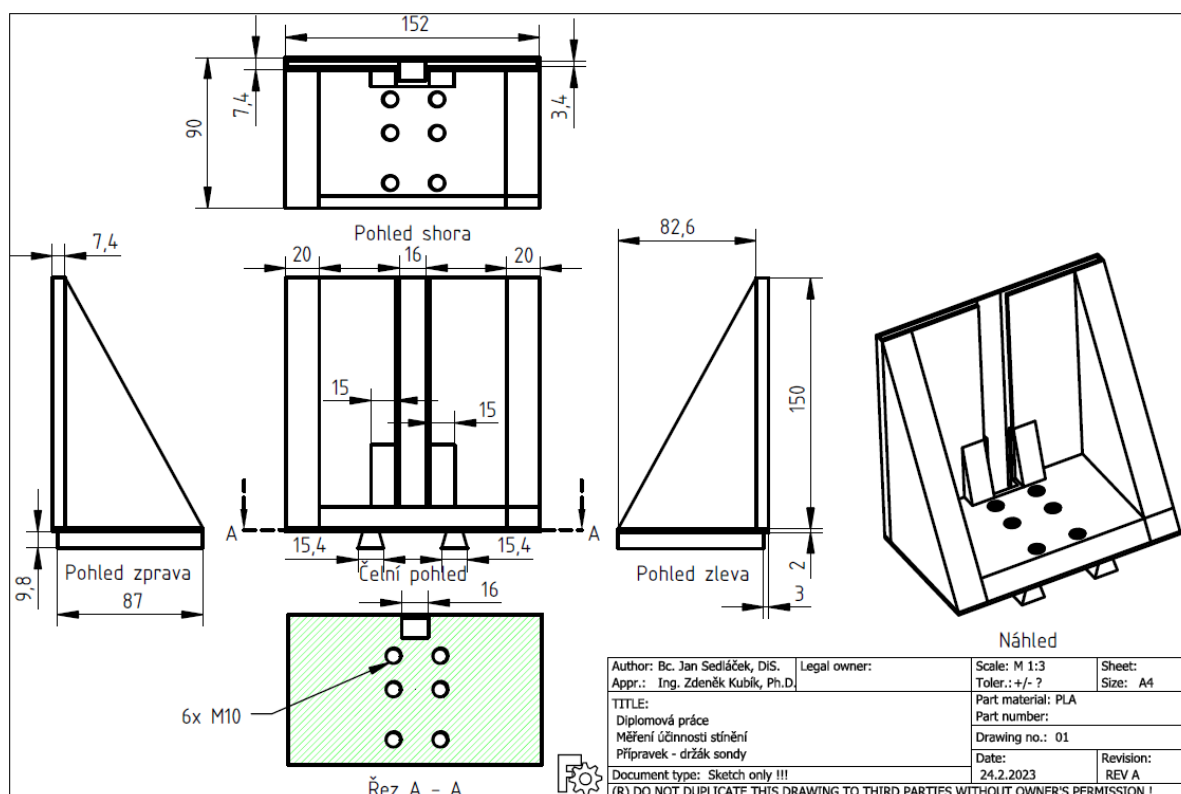
Obr. 22 Skica základny pro měření s H sondami

5.3 Držák sondy

Držák sondy je nejsložitější součástí sestavy ale zároveň zajišťuje nejvíce funkcí přípravku. Jeho prvořadou funkcí je upevnění samotné sondy, aby v průběhu všech měření byla stále ve stejné pozici. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.1, kolejnicový díl nám omezuje stupně volnosti. Tento díl má za úkol snížit počet stupňů volnosti právě na nulu. Samotný držák sondy má díky kolejové vazbě právě jeden poslední stupeň volnosti, a jsou zde umístěny otvory se závitem M10, které pomocí aretačních šroubů zajistí omezení i tohoto posledního stupně volnosti (pojezd po kolejnici). Vzhledem k tomu, že modelově by toto bylo

dostatečné, musíme ještě započítat i jistou toleranci výroby dílů. Právě k pokrytí těchto tolerancí, které by mohli způsobovat naklápění držáku sondy, je zde umístěno celkově šest otvorů pro aretační šrouby. Díky těmto otvorům je tedy možné vhodným zašroubováním provést kalibraci těchto nepřesností a držák sondy vyrovnat do roviny vzhledem k vzorku. Vzhledem k tomu, že je držák koncipován jako univerzální, musíme počítat s vkládáním různých sond, tedy nám zde vznikají nové stupně volnosti. Ty jsou dostatečně omezeny vkládacím otvorem na čelní straně držáku. Tento otvor umožní omezení stupňů volnosti právě na nulu. V kombinaci s aretačními šrouby tak máme kompletně zajištěnou konstrukci a jsme schopni provádět opakovaná měření se zaručením stejných podmínek v průběhu celého měření.

Otvor pro umístění sondy je možné použít univerzálně, jak se zarovnávací deskou (uvedenou dále), tak i pro vložení vlastní sondy. Z toho důvodu je konstrukce tenkostěnná a je ze všech stran (krom vkládací strany). Tato tenká stěna (směrem ke vzorku) poskytne galvanické oddělení, pokud bychom použili sondu otevřené konstrukce (tedy například s odkrytými měděnými plochami). V poslední řadě jsou v držáku implementovány otvory pro připojení sond ke spektrálnímu analyzátoru.

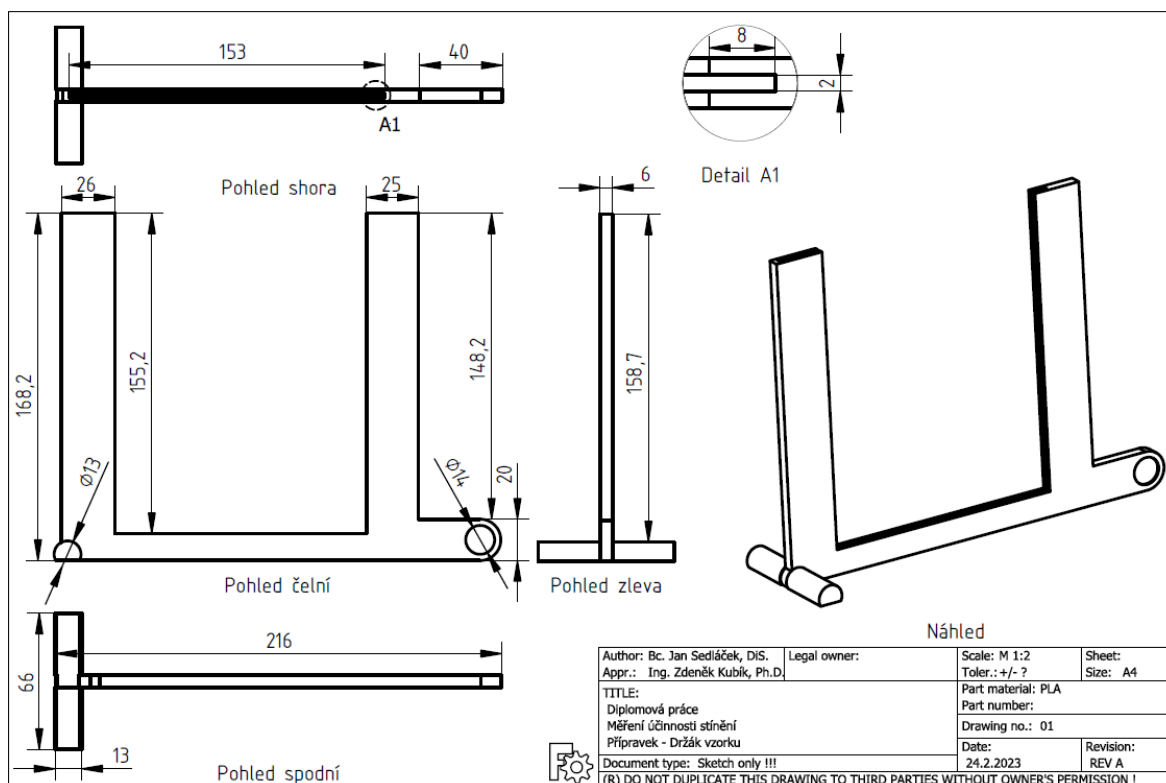


Obr. 23 Skica držáku sondy

5.4 Držák vzorku

Držák vzorku je jednoduchá konstrukce, která má za úkol umožnit vkládat v průběhu měření vzorek a zároveň jej držet v definované pozici. Důležitou součástí je umožnění kloubové vazby s kolejnicovým dílem, která umožní pohodlné vkládání a vykládání vzorků pro měření. Nehrozí tak v takové míře, že dojde ke změně pozice sondy vlivem časté výměny vzorků.

Tento držák, vytvořený v rámci řešení diplomové práce, umožňuje uchycení vzorků pouze do tloušťky 2 mm. Při započtení tolerance bychom se dostali na přibližně 1,6 mm. Vzhledem k použitým vzorkům v diplomové práci je to dostatečné (maximální tloušťka byla právě 1,6 mm u vzorků z laminátu FR4), nicméně konstrukce přípravku umožňuje parametrické přizpůsobení tloušťce vzorku. Je tedy možné jednoduše upravit tento držák vzorku a příslušný otvor u kolejnicového dílu a je možné měřit i vzorky větší tloušťky, než byly použity v této práci.



Obr. 24 Skica držáku vzorku

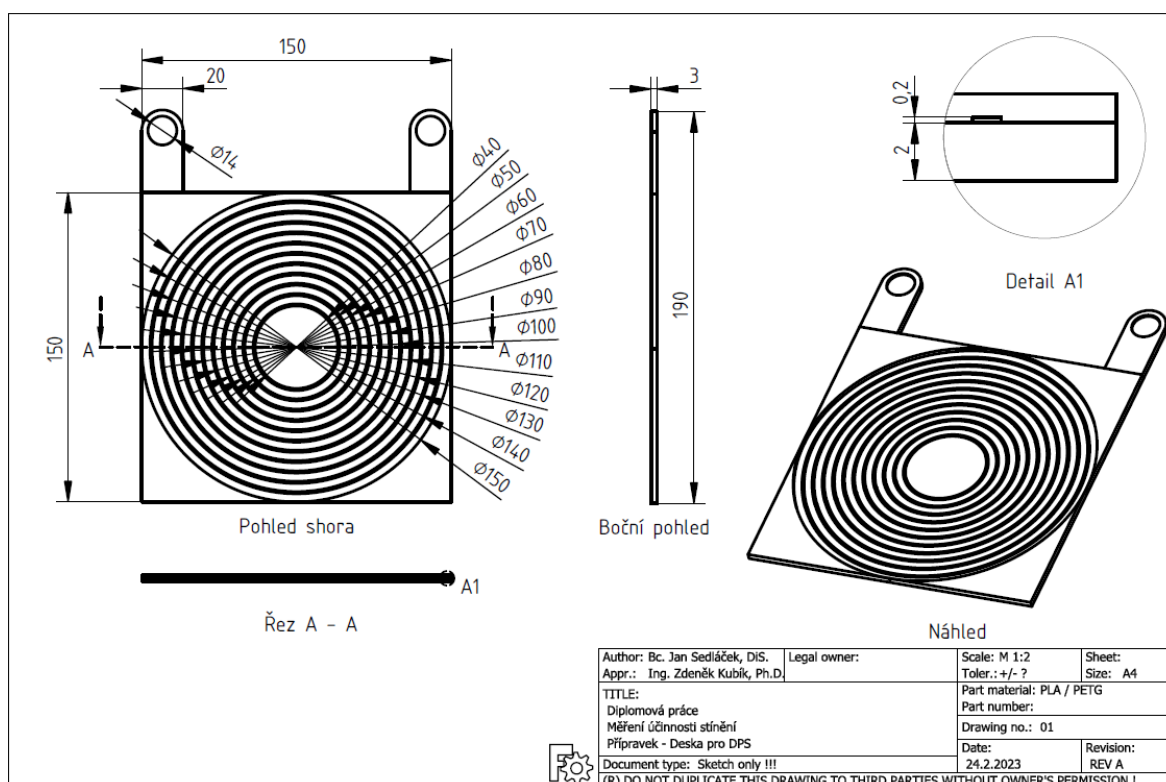
Jednou drobnou nevýhodou této konstrukce je, že umožňuje vložení do kolejnicového dílu dvěma způsoby. Je tedy zapotřebí při skládání přípravku, věnovat pozornost kterým směrem se vkládá (vložení jako při vyklopeném vzorku).

5.5 Zarovnávací deska pro DPS

Tato zarovnávací deska slouží pouze jako adaptér pro sondy, které byly vyrobeny jako DPS. I když je možné vyrobit vždy plošný spoj, který bude mít rozměry laminátu 150 x 150 mm, výroba takových sond bude podstatně dražší, pokud vytváříme sondu o průměru například 40 mm.

Deska má na svém povrchu připravené soustředné kruhy, které pomohou při montáži sondy s vycentrováním. U sondy elektrického pole se počítá s kolmým umístěním konektoru přesně uprostřed desky. U sondy magnetického pole je na každé straně desky (při bočním pohledu) připraven otvor pro vyvedení plošného spoje. Z obrázku toto není zcela zřetelné ale v místech, kde se kruh přibližuje k hraně je stěna natolik tenká, že ji nelze vytisknout na 3D tiskárně a přesně tohoto efektu se využívá.

V poslední řadě obsahuje deska úchyty pro možnost vyjmutí sondy z držáku. Protože je délka držáku 150 mm, dochází k nerovnoměrnému vyjímání sondy a proto jsou zde umístěny úchyty dva, na protilehlých stranách.



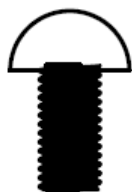
Obr. 25 Skica zarovnávací desky pro DPS

5.6 Spojovací materiál

Cílem při vytváření přípravku pro měření, je minimální (ideálně žádné) využití kovových materiálů. Protože kovové materiály by mohly ovlivňovat měření, je i spojovací materiál vytvořen z plastových materiálů.



Pohled shora



Pohled čelní



Náhled



Pohled shora



Pohled čelní



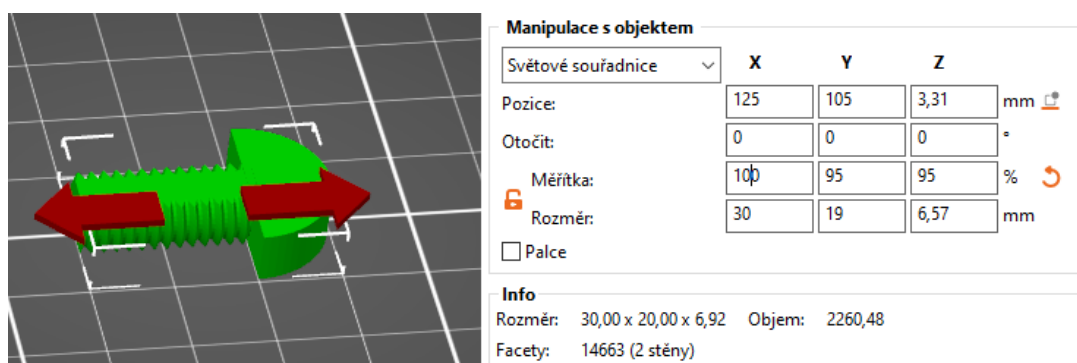
Náhled

Obr. 26 Aretační šroub M10

Obr. 27 Upevňovací šroub základny M10

Pro sestavení přípravku jsou zapotřebí dva druhy šroubů. Oba šrouby používají závit M10 ale liší se hlavičkami. Aretační šroub (Obr. 26) slouží ke korekci upevnění držáku sondy a hlavním předpokladem jeho použití je ruční aretace. Z toho důvodu nemá tento šroub žádné přizpůsobení k použití nástroje, ale obsahuje větší plochu pro lepší úchyt. Upevňovací šroub základny slouží ke spojení základního kolejnicového dílu k základně, tedy v případě měření se sondami magnetického pole. Tento díl naopak slouží k manipulaci výhradně nástrojem, neboť nesmí blokovat posun držáku sondy po kolejnici.

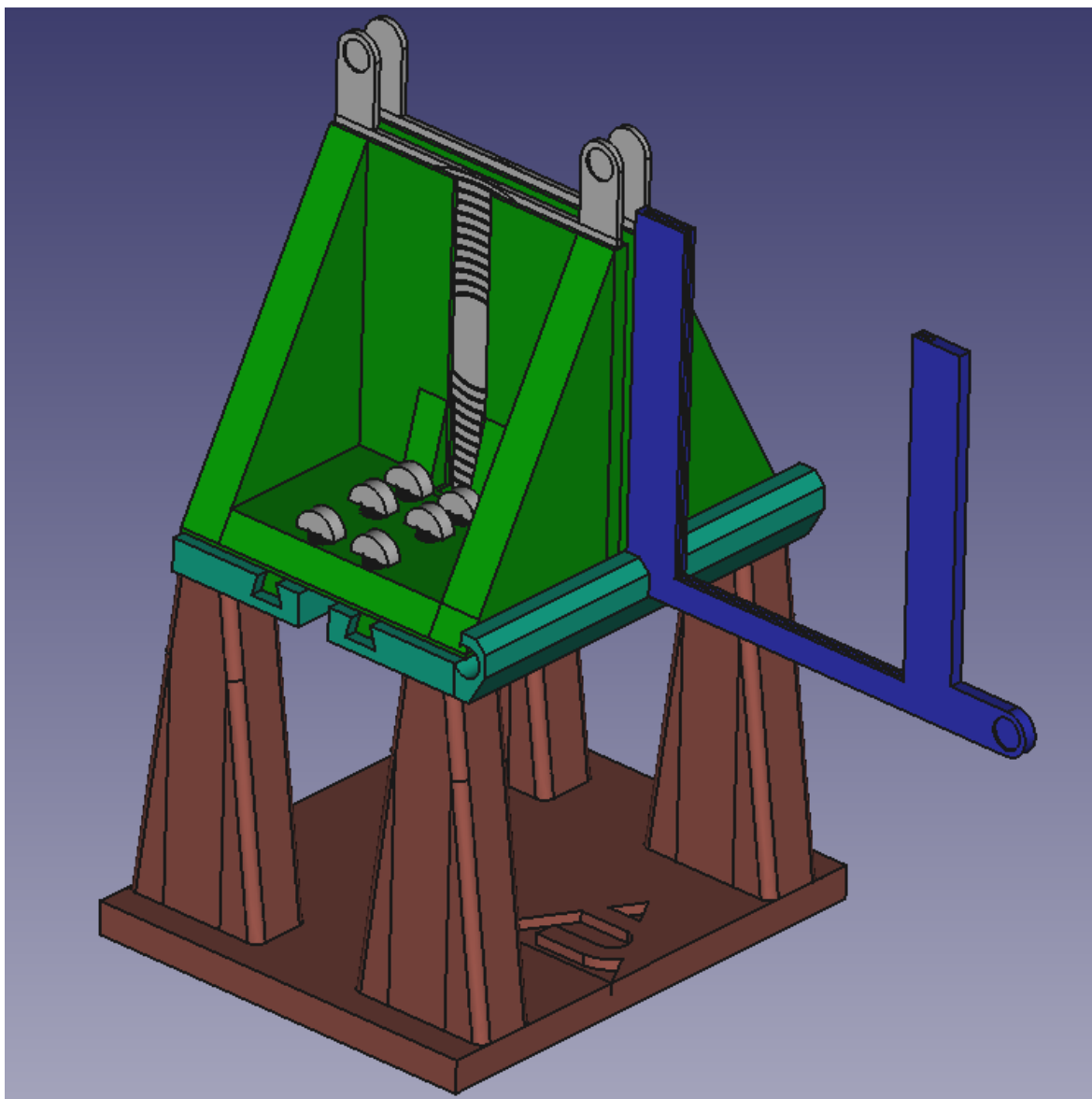
Při tisku těchto dílů bylo zjištěno, že přímé tištění těchto dílů v původní velikosti není optimální. Technologie 3D tisku neumožňuje tisk objektu s takovou přesností a součet tolerancí při tisku závitů způsobí problémy při montáži. Po několika testovacích výtiscích bylo zjištěno, že ideální je šroub zmenšit na 95 %, ale zachovat stoupání závitu.



Obr. 28 Nastavení měřítka v PrusaSlicer

5.7 Kompletní sestava

Všechny výše uvedené díly byly vytvořeny v programu FreeCAD (verze 0.20.1). Na konci konstrukce bylo využito rozšíření pro tento program (A2plus), které umožňuje vytvořené modely spojit do jedné konstrukční sestavy a ověřit jejich vzájemnou kompatibilitu. V této práci bylo této funkci využito primárně pro níže uvedenou vizualizaci kompletní sestavy.



Obr. 29 3D vizualizace sestavy

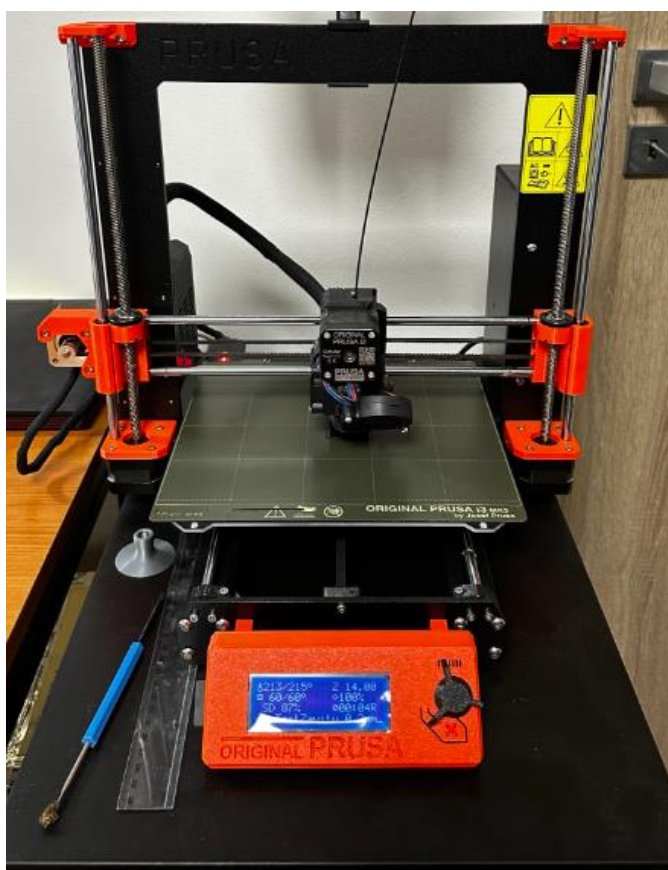
5.8 3D tisk dílů

Kompletní tisk všech dílů, a to včetně spojovacího materiálu, je vhodným způsobem řešení této diplomové práce. Plastový materiál neobsahuje žádné metalické příměsi, které by mohli ovlivnit výsledek měření. Dále technologie 3D tisku umožňuje neustálé vzorkování vytvořených modelů a jejich téměř okamžité ladění vzhledem k ostatním dílům.

V neposlední řadě slouží jako dobrý demonstrátor konceptu mechanického řešení této práce při diskuzi nad jeho vlastnostmi a parametry.

Použitá 3D tiskárna byla Original Prusa i3 MK3S+. Jedná se o celosvětově velmi oblíbenou tiskárnu české výroby, která je ve světě známá především svým kvalitním výstupním tiskem, který nevyžaduje další postprocessing (úpravy modelu po tisku). K tiskárně patří i software PrusaSlicer, který umí převádět 3D modely do podoby souborů, které obsahují příkazy pro tiskárnu (g-code). Tento software umožňuje podrobné nastavení, jakým způsobem se má daný model vytisknout.

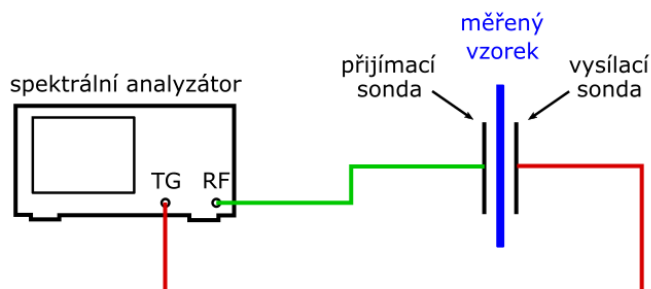
V poslední řadě bylo zapotřebí vybrat konstrukční materiál (filament), ze kterého bude přípravek vyroben. Z nabízených možností byl výběr redukován na PLA (polyaktidová vlákna) a PETG (polyethylentereftalátglykol). I když PETG nabízí výrazně vyšší mechanickou odolnost, která by byla u tohoto modelu důležitá, ukázalo se, že tento materiál se na velkých modelech krouží a pro tisk přesných modelů (například s kolejnicemi) je tedy nevhodný. Zvoleným materiálem je tedy PLA.



Obr. 30 Tisk dílů na 3D tiskárně

6 Měření účinnosti stínění

V této kapitole jsou popsány výsledky měření a jednotlivé postupy úprav metodiky, které bylo v průběhu měření potřeba realizovat. Stručně jsou tyto výsledky shrnuty v další kapitole. Obecně se v průběhu celého měření používalo zapojení z Obr. 31.



Obr. 31 Obecné zapojení pro měření účinnosti stínění

Na obrázku 31 je zobrazeno, jakým způsobem je připojen spektrální analyzátor a měřicí přípravek při měření účinnosti stínění. Jedna ze sond (přijímací) je připojena na vysokofrekvenční vstup analyzátoru (svorka RF). Druhá sonda (vysílací) je připojena na výstup generátoru (svorka TG), který používá při skenování spektra stejnou frekvenci, jaká je právě měřená na vstupu RF. Měřený vzorek se pak umísťuje pomocí přípravku mezi obě sondy a zároveň přípravek zajišťuje jeho vycentrování vzhledem k sondám.

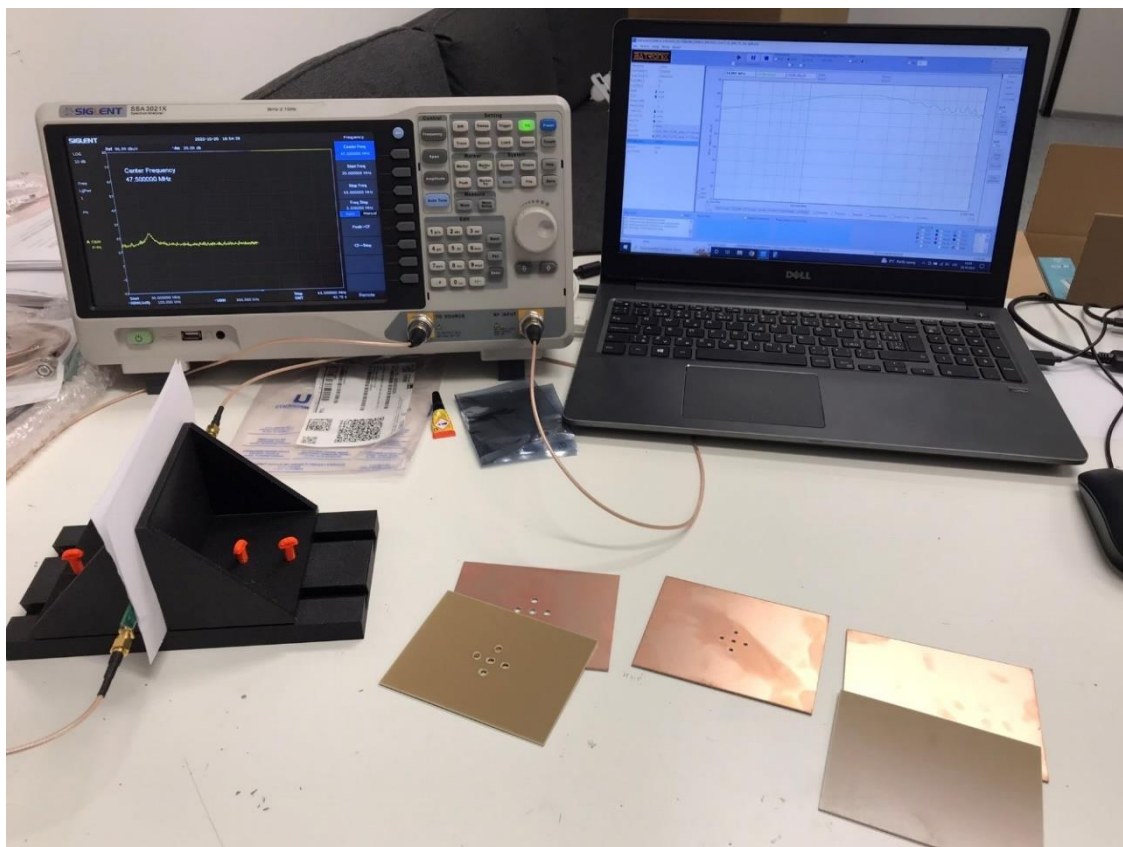
6.1 Úvodní měření

Pro ověření koncepce proběhlo první měření na několika menších vzorcích plošných spojů a první verzi měřicího přípravku. K měření bylo použito:

- spektrální analyzátor Siglent SSA3021X,
- 2x přechodka konektoru N (male) / BNC (female),
- 2x 90 cm kabel BNC (male) / SMA (male).

Měřené vzorky:

- jednovrstvý plošný spoj 100 x 75 mm:
 - bez děr, otvory 2 mm, otvory 4 mm,
- dvouvrstvý plošný spoj 100 x 75 mm:
 - bez děr, otvory 2 mm, otvory 4 mm.



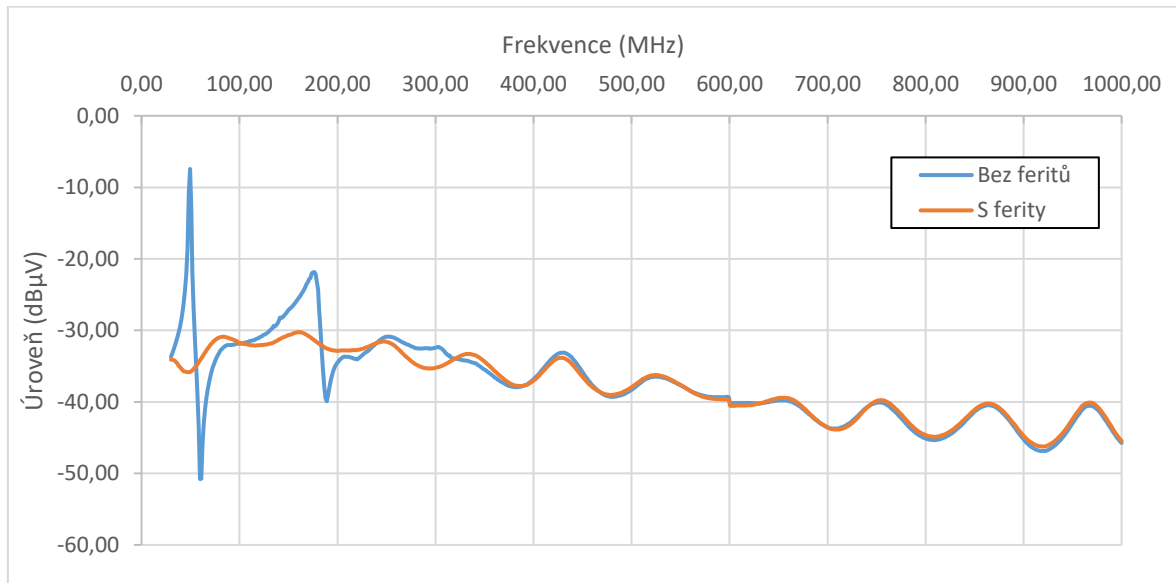
Obr. 32 Prvotní měření pro ověření koncepce

Při tomto měření bylo použito standardního nastavení spektrálního analyzátoru, jaký se používá při měření vyzařování vzduchem (krytem zařízení) dle normy ČSN EN 55016-2-3:

- kmitočtový rozsah od 30 MHz do 1 GHz,
- RBW = 120 kHz,
- VBW = 300 kHz,
- předzesilovač a útlumový článek vypnut,
- vrcholový detektor.

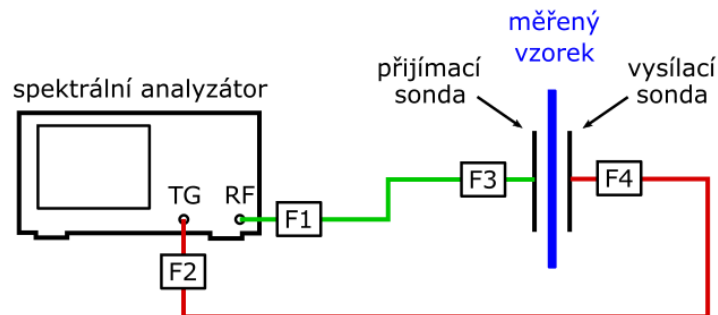
Během tohoto měření bylo zjištěno, že standardní software pro předcertifikační měření emisí je pro tuto aplikaci nevhodný. V první řadě bylo zapotřebí snížit hodnoty RBW a VBW na nejnižší možné, aby se zvýšil dynamický rozsah měření. Po vložení vzorků bez děr a s otvory o průměru 2 mm se totiž ukázalo, že měřené hodnoty padají na hodnoty šumu. Dále bylo zjištěno, že není zapotřebí provádět měření v tolika bodech, jaké vyžaduje norma pro emise vzduchem (například ČSN EN 55032, která vyžaduje v daném pásmu RBW 120 kHz, povoluje maximální krok $\frac{1}{2}$ z RBW – tedy přibližně 16 000 bodů). Při těchto měřeních se očekávají úzkopásmové signály, které generuje měřené zařízení, ale při tomto měření mají průběhy hladký charakter.

Další zjištění bylo se sondami elektrického pole, které ukázalo, že na počátku spektra se nachází špičky měřeného signálu.



Graf 2 Překmit měřeného signálu

Původní domněnka byla, že tyto špičky s největší pravděpodobností pocházejí z rezonanční struktury analyzátor-kabel-sonda, neboť při změně koaxiálního kabelu došlo k jejich změně. Při ověřování chování bylo zjištěno, že umístění útlumových článků do této struktury (jako je tomu u normy ASTM D-4935-99) nemá na tyto překmity vliv. Pouze dojde k vertikálnímu posunu charakteristiky, v závislosti na použitém útlumovém článku. Naopak největší přínos mělo umístění feritových kroužků na přívodní kabely, a to v následující konfiguraci:

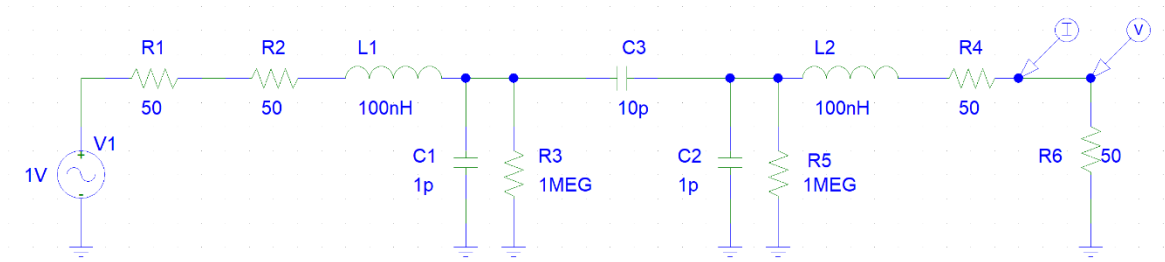


Obr. 33 Zapojení s ferity

Použité ferity byly:

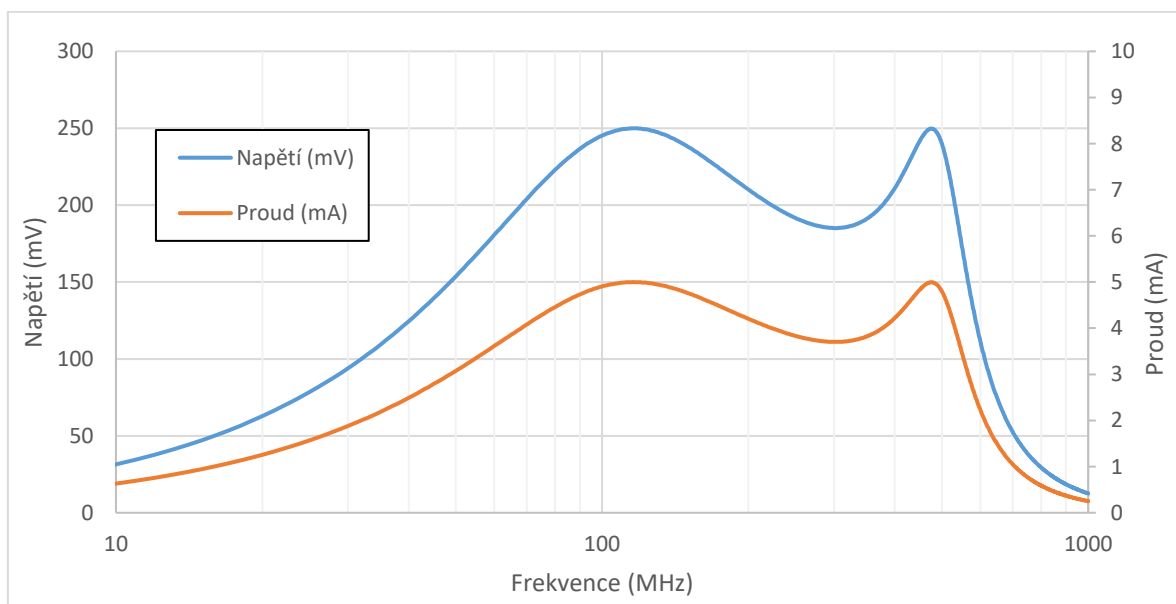
- F1 – Würth Elektronik, 742 712 22,
- F2 – Würth Elektronik, 742 712 22 S,
- F3 – Würth Elektronik, 742 711 32,
- F4 – Würth Elektronik, 742 711 32 S.

Pro ověření této domněnky bylo sestaveno jednoduché simulační schéma, které simuluje zmíněnou strukturu analyzátor-kabel-sonda.



Obr. 34 Simulační schéma rezonanční struktury

Schéma začíná zdrojem sinusového signálu (V1) a jeho vnitřní impedancí 50Ω (R1). Tyto dva prvky nahrazují výstup TG spektrálního analyzátoru. Dále je zde potřeba vytvořit model koaxiálního kabelu. V tomto případě se hlavními prvky modelu stává jeho charakteristická impedance (R2, 50Ω), parazitní indukčnost jádra kabelu (L1, zvoleno 100 nH) a parazitní kapacita mezi jádrem kabelu a stíněním (C1, zvoleno 1 pF). Odpor R3 pak svod mezi jádrem a stíněním. Vlastní sonda elektrického pole se bude primárně chovat jako parazitní kapacita, neboť se jedná o dvě desky umístěné těsně u sebe a v podstatě pouze měníme dielektrikum (vzduch nebo vzorek). Následuje druhý model koaxiálního kabelu (zrcadlově otočen) a na závěr vstupní impedance spektrálního analyzátoru reprezentovaná rezistorem R6.



Graf 3 Výsledky simulace rezonanční struktury

Porovnání výsledků zjednodušené simulace a naměřených dat, ukazuje jistou podobnost. Pokud bychom model dále zpřesnili, ať už přesnější simulací struktury nebo přesnějšími

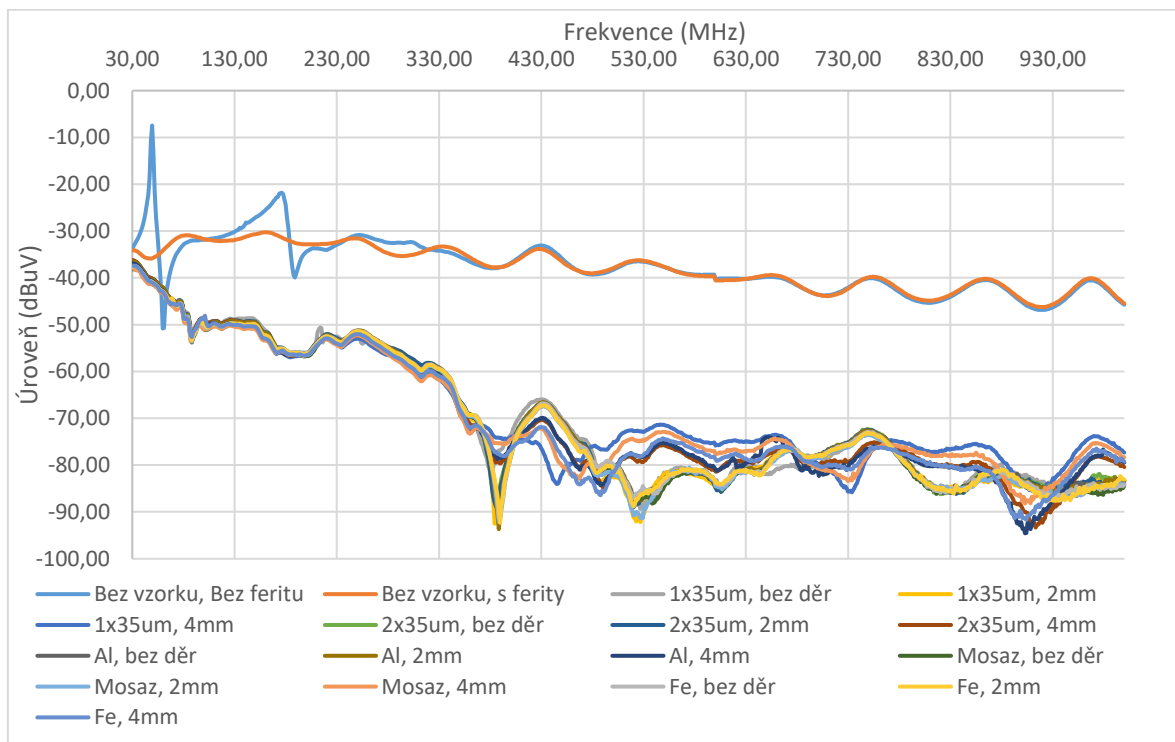
hodnotami jednotlivých součástí, mohli bychom se pravděpodobně dostat na velice podobné výsledky jako v případě reálného měření.

V následujících kapitolách budou blíže uvedeny výsledky jednotlivých měření, které byly provedeny s těmito parametry, které vzešly z úvodního měření:

- Kmitočtový rozsah od 30 MHz do 1 GHz,
- RBW = 9 kHz,
- VBW = 100 kHz,
- předzesilovač vypnut,
- útlumový článek 15 dB pro měření s H sondou,
- útlumový článek vypnut pro měření s E sondou,
- vrcholový detektor.

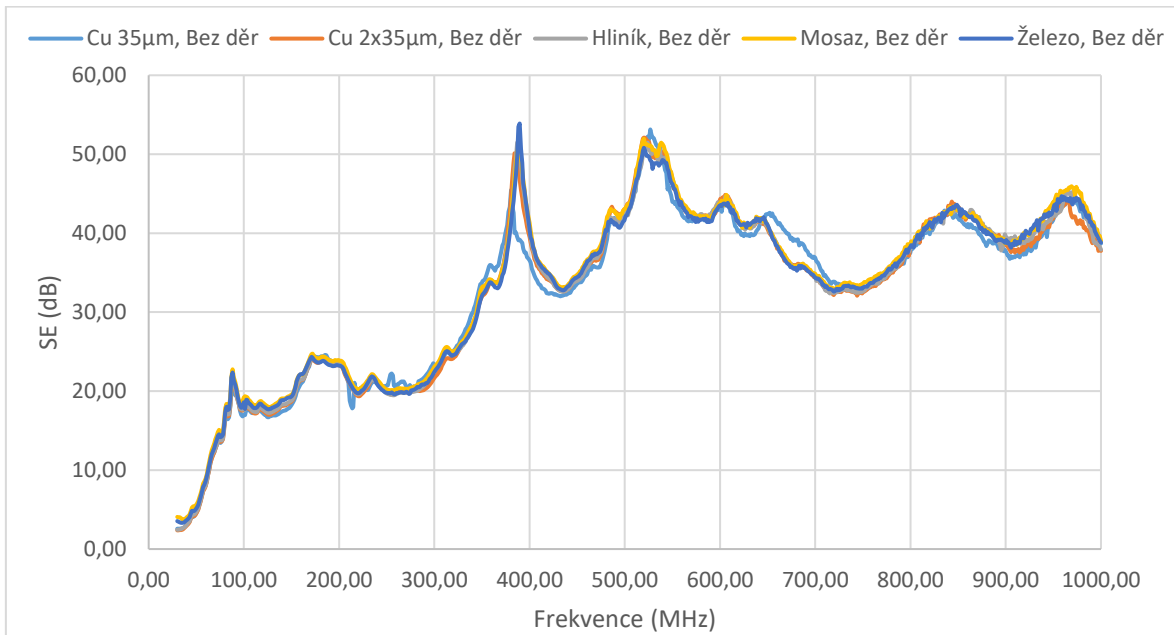
6.2 Měření s 30 mm sondou E pole

Při pohledu na výsledky všech měření s menší sondou elektrického pole (průměr 30 mm), je možné konstatovat, že až do frekvence přibližně 350 MHz není mezi vzorky téměř žádný rozdíl. Dále je možné pozorovat u všech vzorků trend zvyšujícího se útlumu v závislosti na frekvenci. Pro další analýzu provedeme přepočítání na hodnotu útlumu.

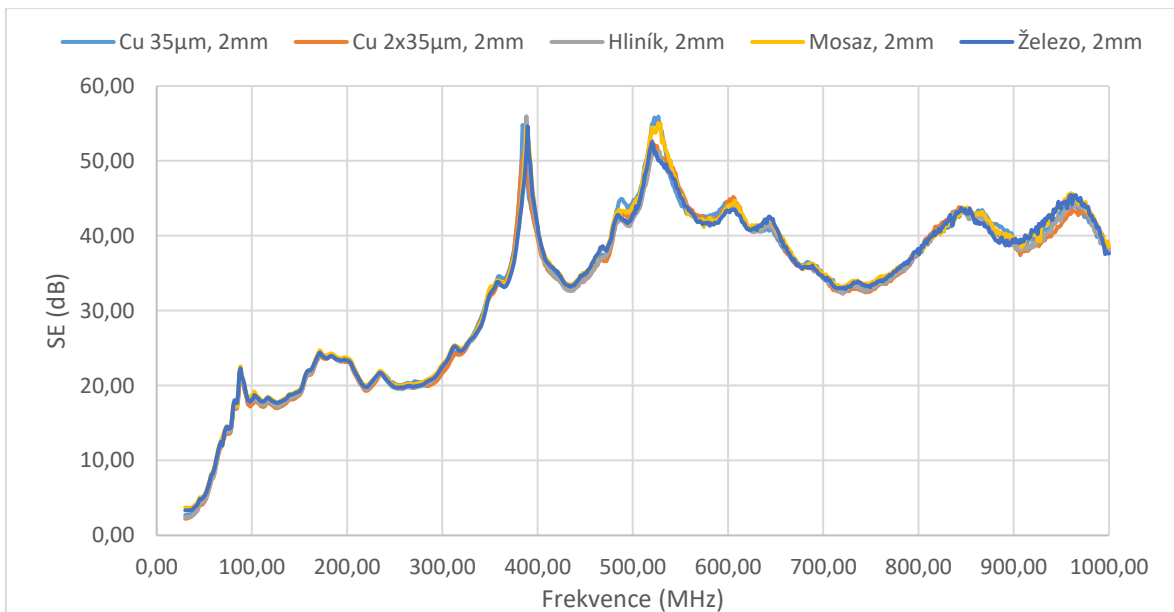


Graf 4 Měření menší E sondou – všechny výsledky

Na následujících grafech je možné porovnat hodnotu útlumu mezi vzorky různých materiálů, ve verzi bez vrtaných otvorů a s otvory o průměru 2 mm.

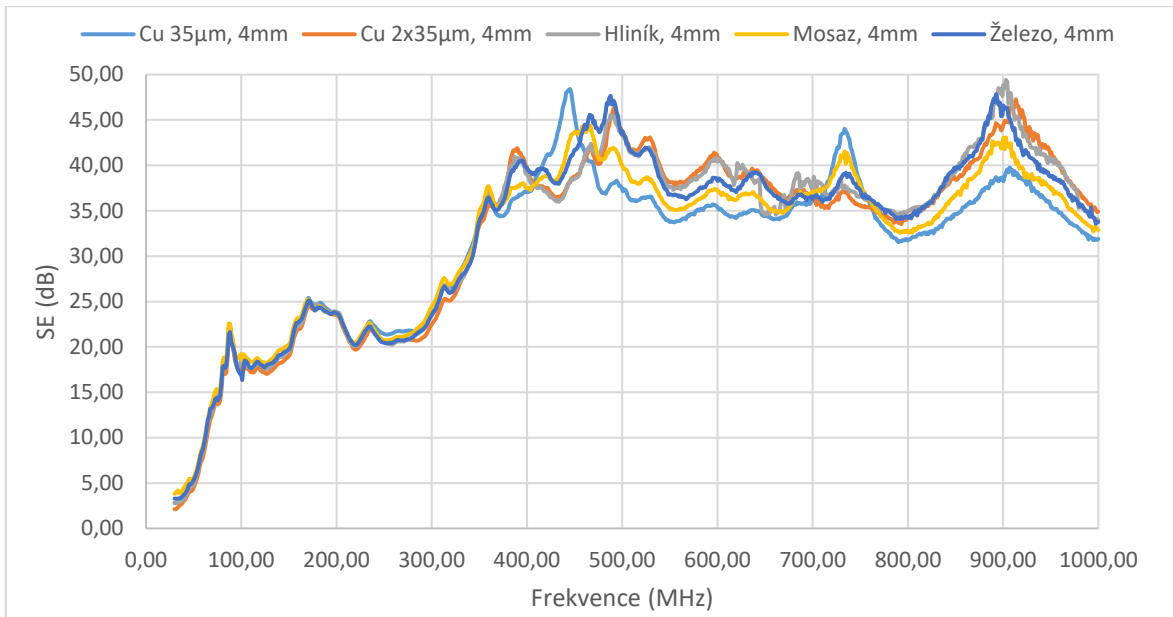


Graf 5 Porovnání vzorků bez vrtaných otvorů



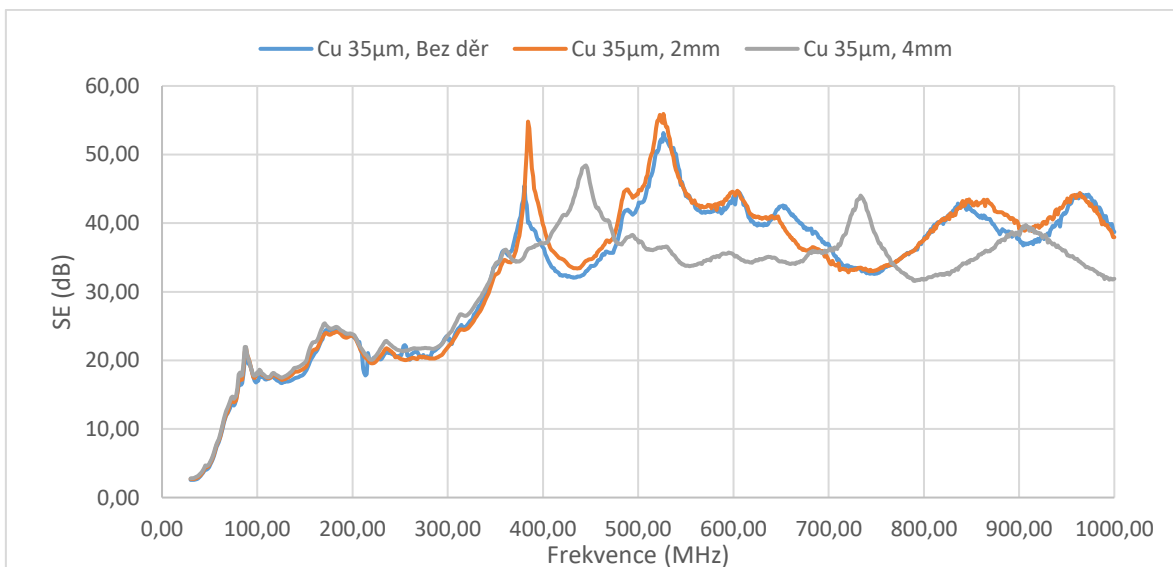
Graf 6 Porovnání vzorků s vrtanými otvory 2 mm

Při pohledu na grafy můžeme vidět zachovaný trend zvyšujícího se útlumu v závislosti na frekvenci. Tento trend je stejný pro všechny měřené materiály. Dále můžeme pozorovat, že mezi naměřenými daty není téměř žádný rozdíl. Z pohledu měřeného pásma tedy hodnota útlumu elektrické složky není ovlivněna vyvrtanými otvory. Změnu můžeme pozorovat až na vzorcích s otvory o průměru 4 mm.



Graf 7 Porovnání vzorků s vrtanými otvory 4 mm

U vzorků s otvory o průměru 4 mm, můžeme pozorovat od frekvence 400 MHz odlišnosti mezi jednotlivými materiály.

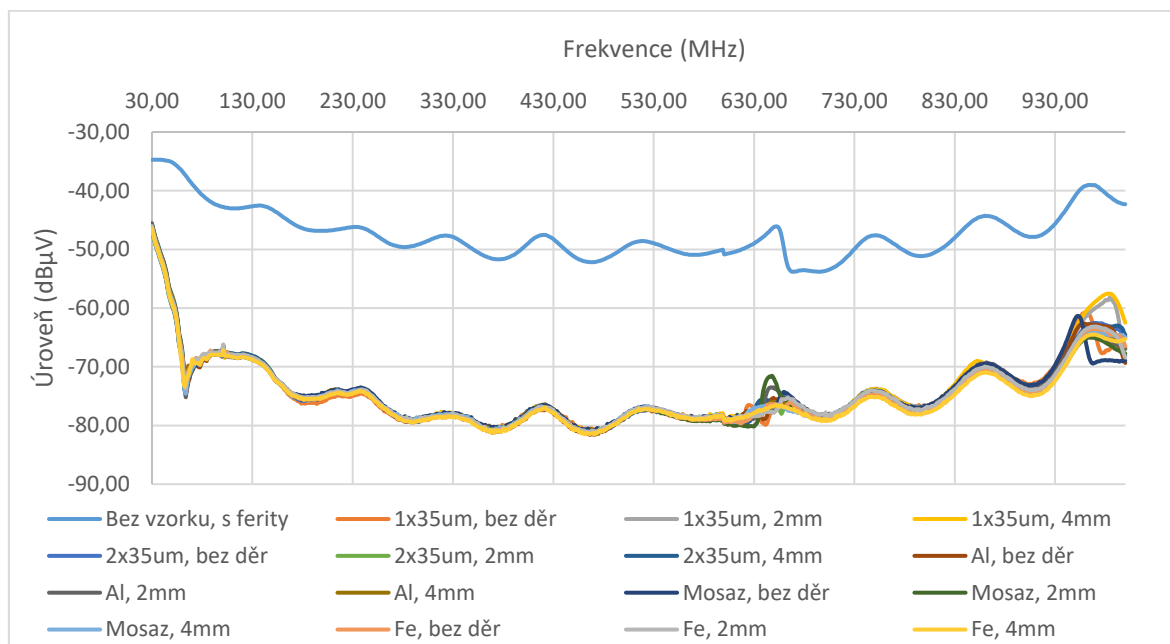


Graf 8 Porovnání výsledků jednovrstvého DPS

Vzhledem k tomu, že výsledky ukazují největší míru změny útlumu pro jednovrstvé DPS, můžeme porovnat jednotlivé výsledky pouze pro tento materiál. Jak je z obrázku výše patrné, mezi vzorkem bez otvorů a s otvory průměru 2 mm, není pozorovatelný žádný zásadní rozdíl. Zásadní změna charakteristiky nastává při měření s posledním vzorkem. Tento vzorek s otvory o průměru 4 mm, vykazuje menší útlum o přibližně 7 dB. Další důležitou změnou je posun dvou předchozích špiček v charakteristice. Zde pravděpodobně došlo k přeladění rezonanční struktury vlivem změny parazitní kapacity sondy.

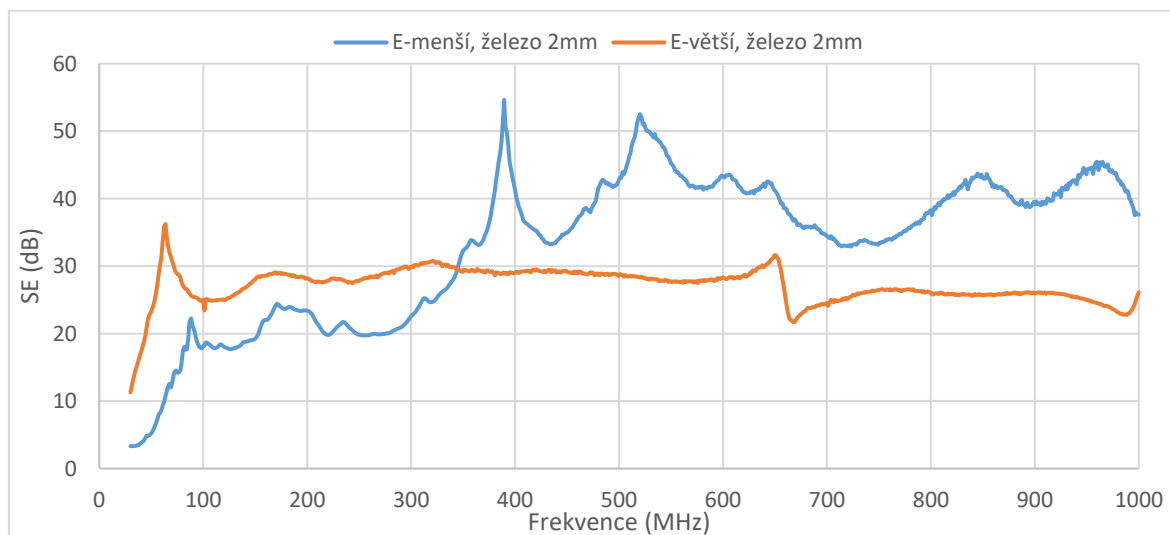
6.3 Měření s 120 mm sondou E pole

Při pohledu na všechny výsledky měření s větší sondou elektrického pole (průměr 120 mm) je patrné, že měřené vzorky nevykazují žádné rozdíly.



Graf 9 Měření větší E sondou – všechny výsledky

Oproti předchozímu měření s menší sondou bychom mohli konstatovat, že větší sonda elektrického pole vykazuje nižší citlivost, neboť nezaznamenala žádné změny mezi vzorky.

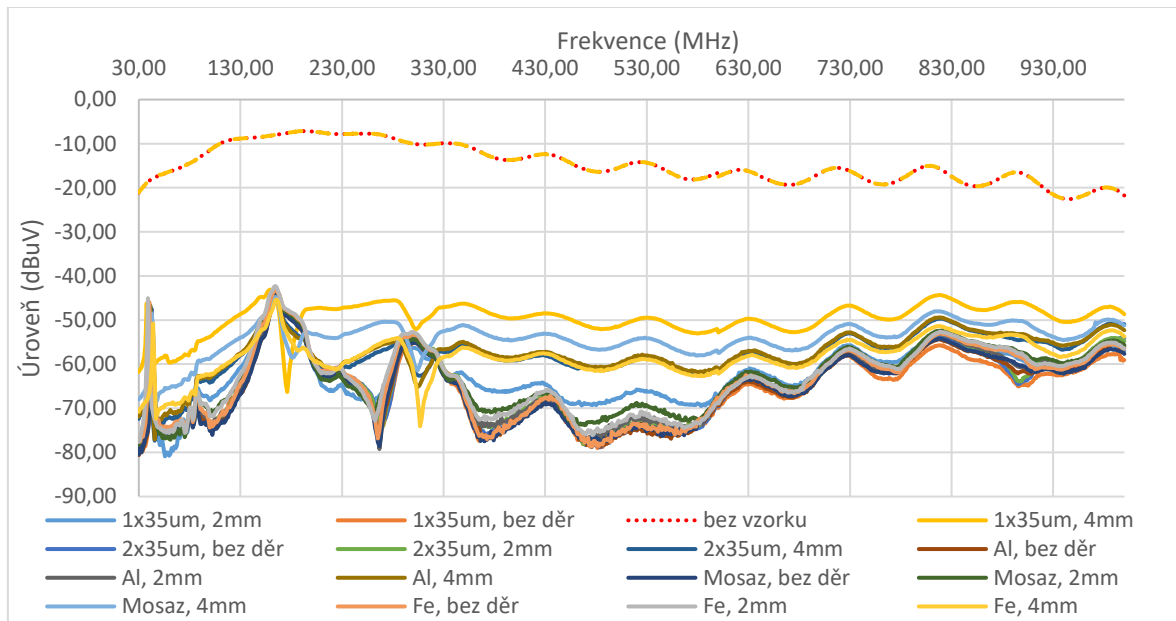


Graf 10 Měření stejného vzorku různými E sondami

Při porovnání měření stejného vzorku dvěma různými sondami můžeme vidět, že i v případě větší sondy zde vzniká obdobná rezonance, která nám ovlivňuje výsledky měření. I přesto, že při všech měření byly použity ferity pro potlačení těchto nežádoucích jevů, dojde zřejmě vždy k určitému přeladění této struktury a výsledky jsou tak ovlivněny.

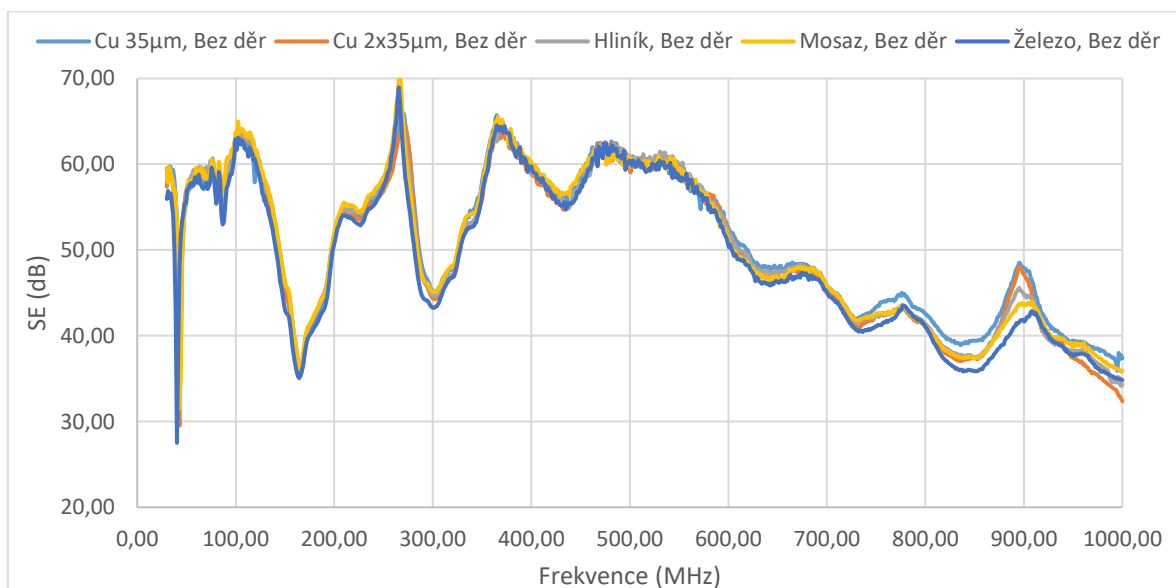
6.4 Měření s 15 mm sondou H pole

Měření pomocí menší sondy magnetického pole (průměr 15 mm) ukazuje, že obecně se hodnota útlumu se zvyšující frekvencí snižuje. Toto je opačný trend oproti měření sondou elektrického pole.

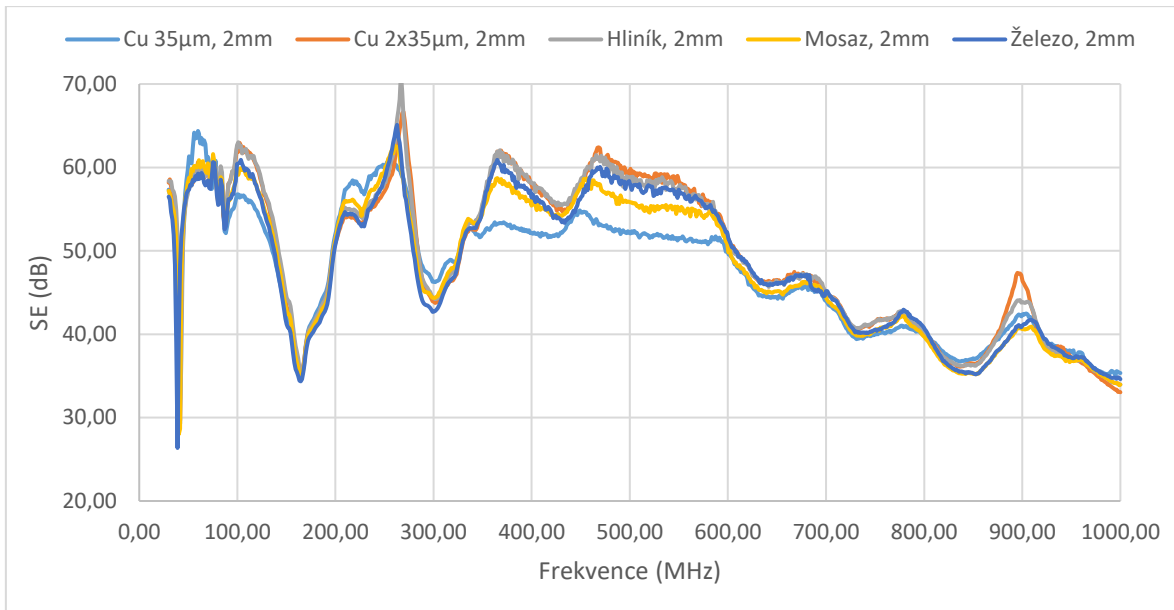


Graf 11 Měření menší H sondou – všechny výsledky

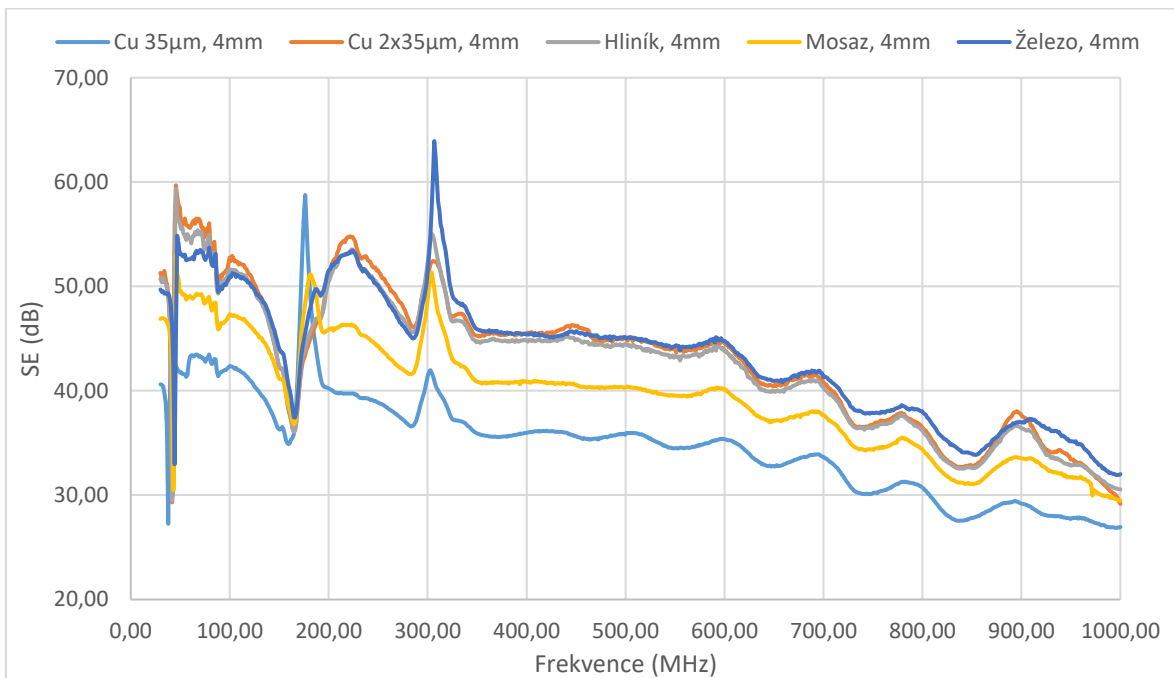
Stejně jako v případě měření se sondami elektrického pole, můžeme pozorovat, že mezi vzorky bez otvorů není z hlediska útlumu velký rozdíl. Částečnou materiálovou závislost lze pozorovat ke konci spektra, kde největší rozdíl představuje zhruba 5 dB. Zde se tedy nabízí prostor pro další měření ve vyšším frekvenčním spektru, pro ověření dalších průběhů.



Graf 12 Porovnání vzorků bez vrtaných otvorů

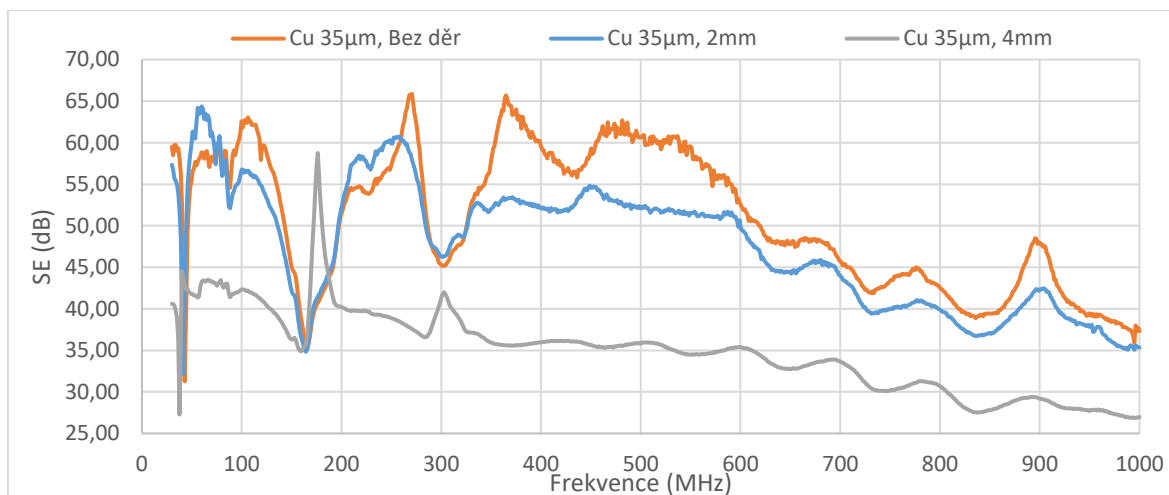


Graf 13 Porovnání vzorků s vrtanými otvory 2 mm



Graf 14 Porovnání vzorků s vrtanými otvory 4 mm

Z měření je možné sledovat, že změna útlumu je v omezené míře patrná už pro menší otvory o průměru 2 mm. Dalším důležitým poznatkem je přítomnost špiček v měřených charakteristikách. Tento problém je s největší pravděpodobností obdobný, jako v případě měření se sondami elektrického pole.

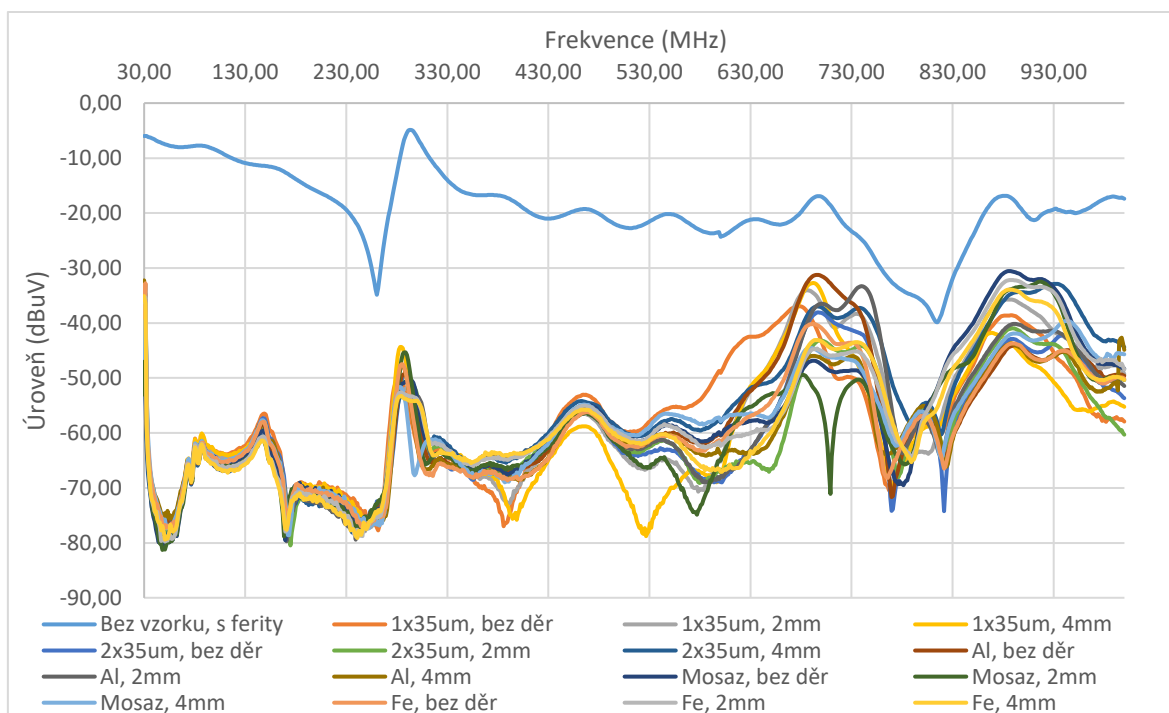


Graf 15 Porovnání výsledků jednovrstvého DPS

V grafu 15 je možné vidět porovnání měření pouze pro jednovrstvý DPS. Je zde vidět změna hodnoty útlumu v závislosti na perforaci vzorku otvory. Srovnáním s měřením pomocí sond E pole je možné si všimnout podstatně větší závislosti útlumu na perforaci vzorku. Stejně jako v předchozích měření je i zde vidět změna pozice špiček charakteristik.

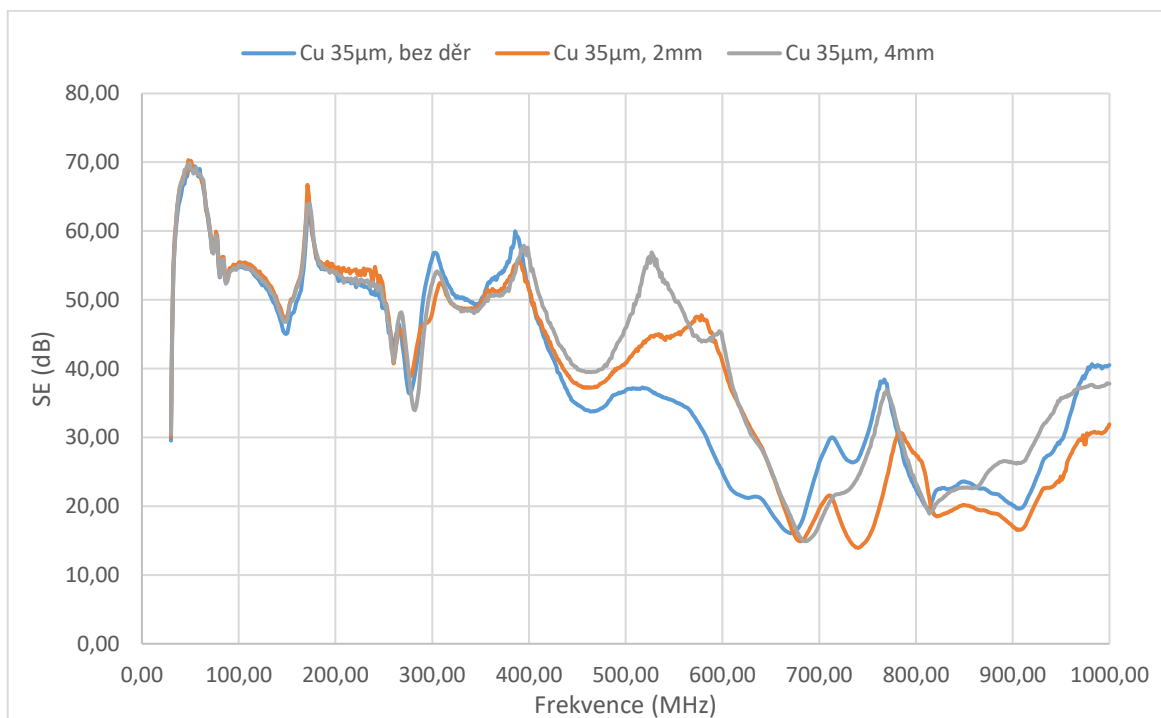
6.5 Měření s 115 mm sondou H pole

Již při prvním pohledu na celkové výsledky měření, je možné vidět opětovné vytvoření špiček charakteristiky, které následně ovlivňují všechna měření.



Graf 16 Měření větší H sondou – všechny výsledky

Následující výsledky nejlépe ukazují, jakým způsobem může dojít k ovlivnění výsledků. Při měření větší sondou si při porovnání výsledků jednovrstvého spoje můžeme všimnout, že vzorky s otvory, mají dokonce vyšší SE než vzorek bez perforace.



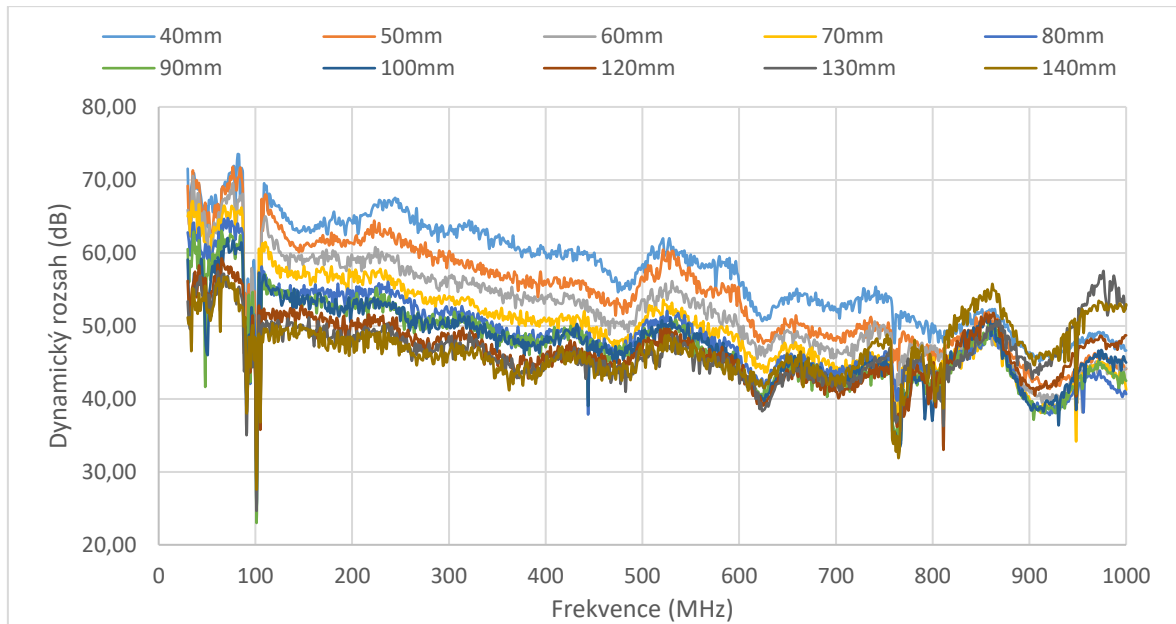
Graf 17 Porovnání výsledků jednovrstvého DPS

6.6 Měření s různými průměry E sond

Při porovnání měření v kapitolách 6.2 a 6.3, bylo měření sondami elektrického pole, které mezi sebou vykazovali značné rozdíly. Z toho důvodu bylo rozhodnuto vytvořit sadu sond E pole, které budou mít různé průměry.

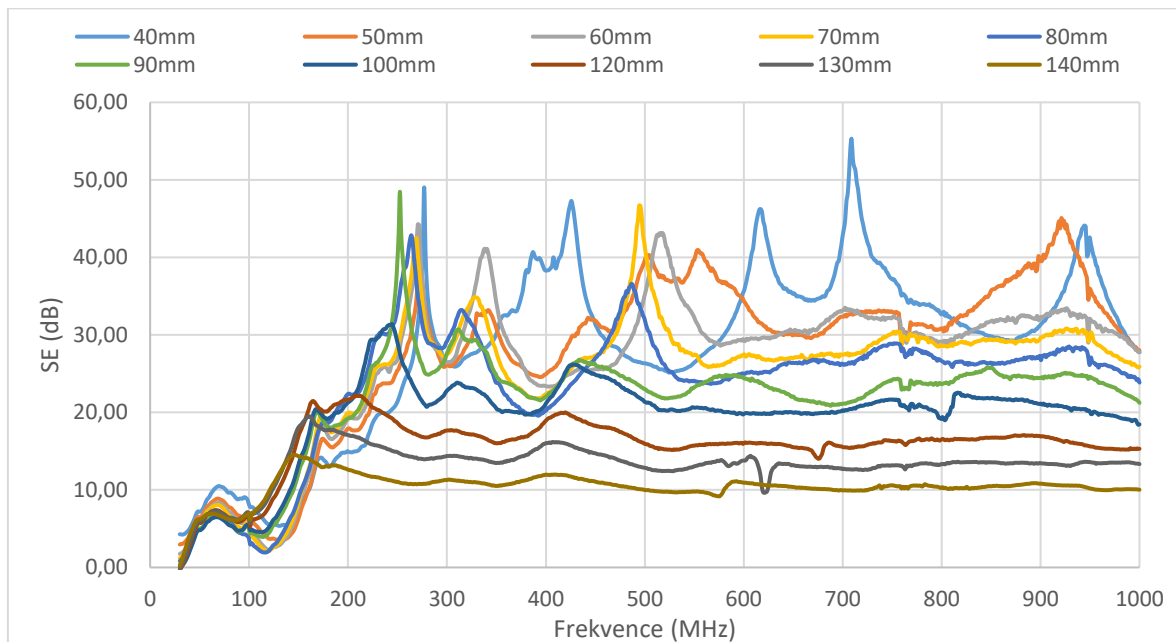
Zmíněná sada obsahovala sondy o průměru od 40 mm do 140 mm (průměr 110 mm byl vynechán z důvodů výrobní vady). Každá sonda byla z druhé strany, stejně jako v předchozím případě, opatřena stínící plochou, která byla připojena ke stínění koaxiálního kabelu. Tato stínící plocha měla ve všech případech průměr větší o 10 mm.

V tomto měření bylo cíleno na ověření chování sond o různém průměru s důrazem na změnu dynamického rozsahu měření a dále odlišnosti ve výsledcích měření mezi zvoleným materiálem bez otvorů a s otvory o průměru 4 mm. Vzhledem k odlišné struktuře při každé výměně sond, bylo vždy zapotřebí opět provést měření bez vzorku a následně až s měřeným vzorkem.



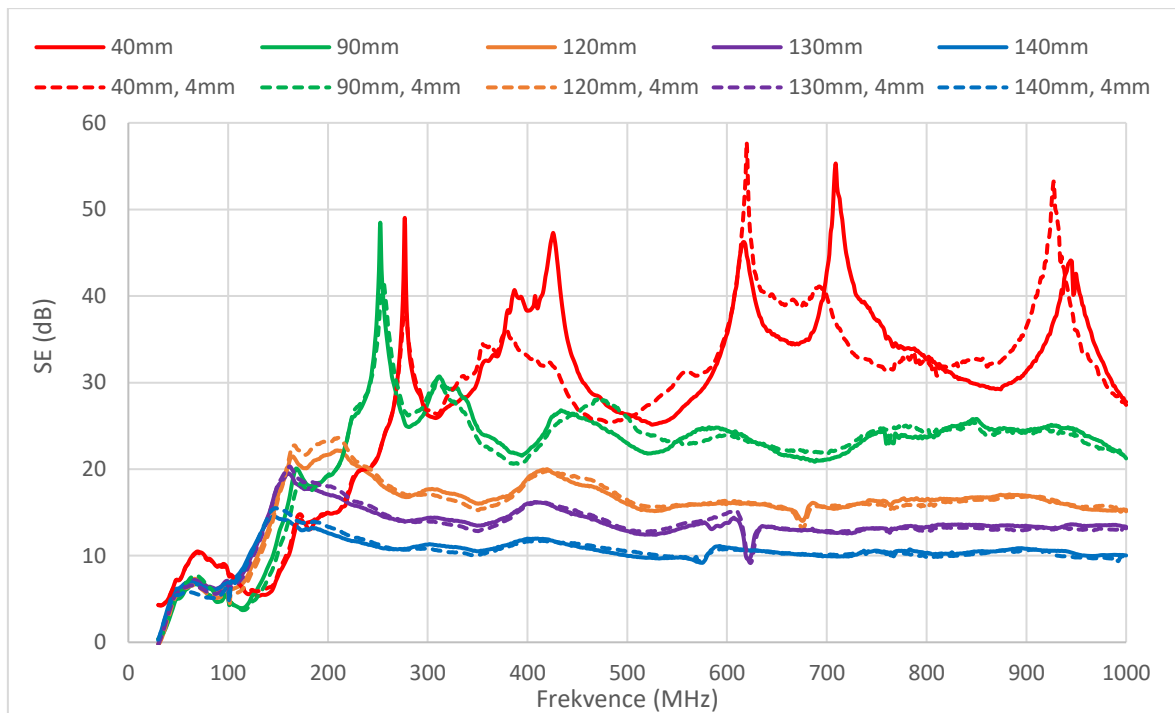
Graf 18 Dynamický rozsah s různými sondami E pole

Z ověření rozdílu dynamického rozsahu mezi jednotlivými sondami, si můžeme všimnout exponenciální závislosti průměru sondy na dynamickém rozsahu. V tomto případě tedy platí, že čím menší průměr sondy, tím větší dynamický rozsah můžeme využít. Špičky v měření okolo 100 MHz jsou způsobeny příjmem rádiového vysílání.



Graf 19 Měření plátu mědi 35 µm různými průměry E sond

Při měření neporušeného plátu mědi (jednovrstvého DPS) různými sondami, je možné z výsledků vidět, že změřená absolutní hodnota útlumu postupně klesá se zvětšujícím se průměrem sondy.



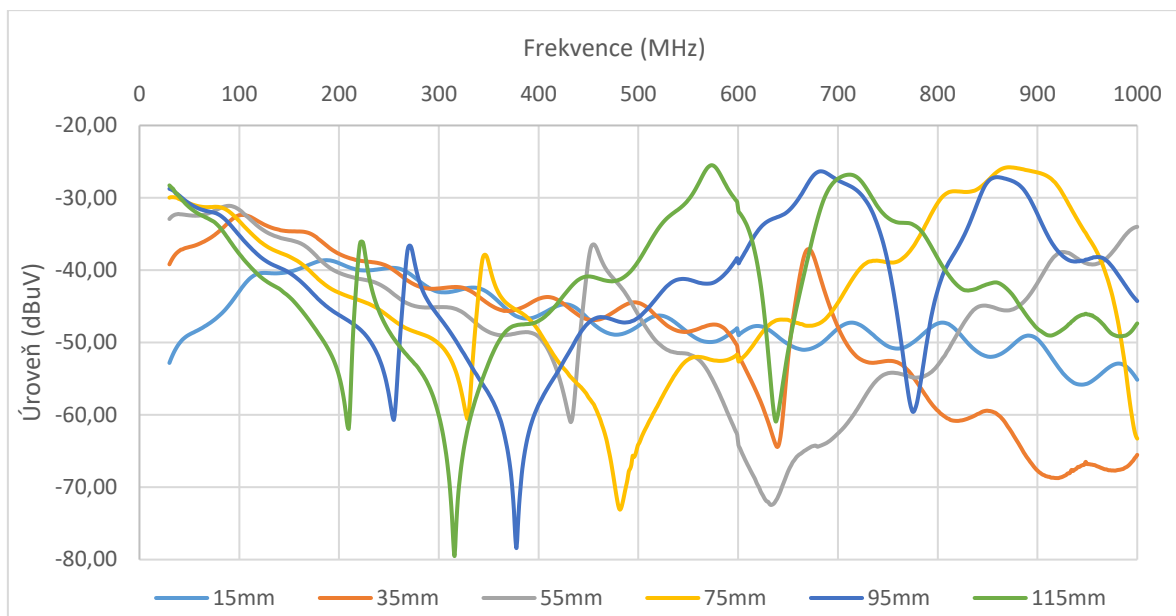
Graf 20 Porovnání útlumu vzorku bez otvorů a s otvory různými E sondami

Výsledky měření s různými průměry sond, které jsou uvedené v grafu 20, ukazují porovnání sond vybraných průměrů a jejich druhé měření s perforovaným vzorkem (čárkovaně). Jak je možné sledovat, sondy větších průměrů změnu v perforaci vzorku nezaznamenají.

6.7 Měření s různými průměry H sond

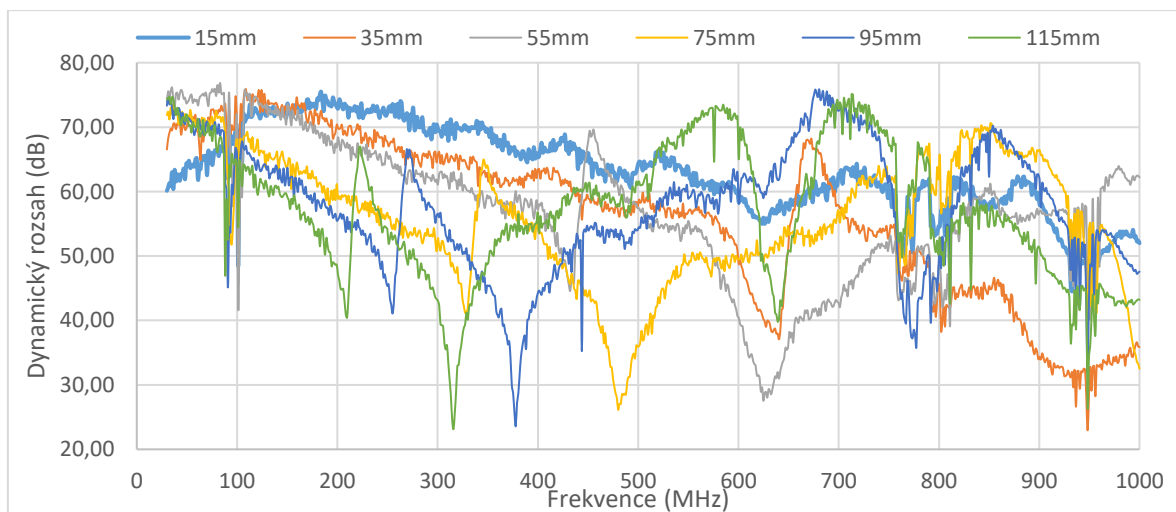
Stejně jako v případě rozdílů mezi sondami E pole, bylo možné pozorovat odlišnosti mezi výsledky měření i u dvou velikostí sond H pole (kapitola 6.4 a 6.5). Ze stejného důvodu tedy byly vytvořeny různé průměry sond H pole a porovnány.

V případě těchto měření se u referenčních hodnot (měření bez vzorku mezi sondami) opět objevily širokopásmové špičky. Oproti měření se sondami E pole ovšem nebylo možné je ztlumit pomocí feritových kroužků. Všechna měření tedy byla provedena bez feritů. Dalším poznatkem byla vysoká intenzita pole, generovaná těmito sondami. Spektrální analyzátor tedy bylo vždy potřeba se zvětšující se velikostí sondy více ztlumit. Při použití nejmenší sondy byl použit útlumový článek 5 dB a u největší 15 dB. Úroveň TG byla nastavena na maximum, tedy -20 dB.



Graf 21 Referenční měření jednotlivých sond

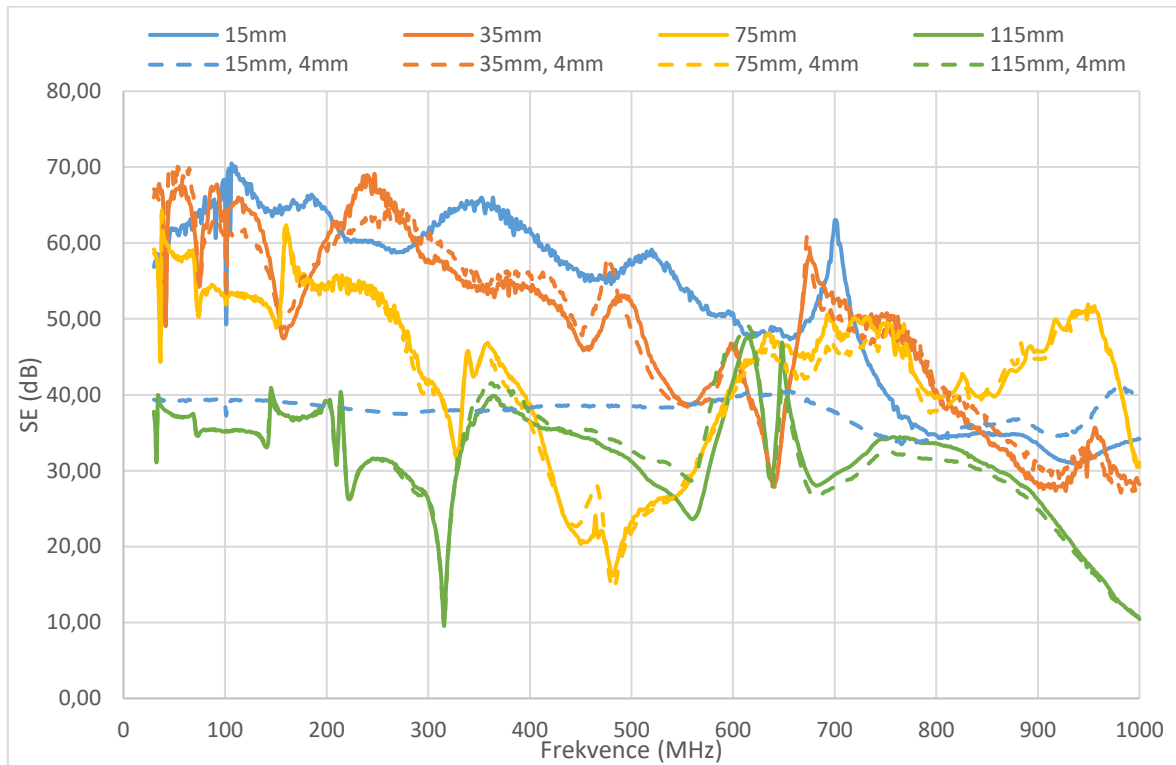
Měření kompletní sady sond magnetického pole ukázalo, že se zvětšujícím se rozměrem sondy, klesá první rezonanční kmitočt. V grafu 21, je možné tento trend sledovat právě z měření referenčních hodnot. Pro úplnost graf 22 ukazuje dynamický rozsah sond.



Graf 22 Dynamický rozsah s různými sondami H pole

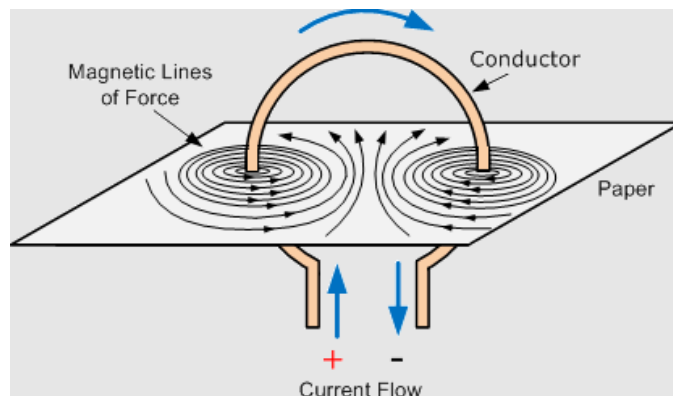
V grafu 23, jsou zobrazeny vybrané výsledky měření účinnosti stínění s různými průměry sond magnetického pole. V grafu jsou plnou čarou výsledky měření plátu mědi bez perforace a čárkovaně měření plátu mědi s pěti otvory o průměru 4 mm. Barevně jsou pak sjednoceny výsledky podle velikosti použité sondy. Podstatnou částí grafu, je vyobrazení výsledků pro nejmenší, tedy 15 mm sondu. Tyto výsledky jako jediné reflektují ve většině spektra předpokládaný výsledek měření. Se zvětšujícím se průměrem sondy je možné vidět, že sondy nejsou schopny detekovat perforaci vzorku a v některých částech dokonce vykazují

vyšší hodnotu útlumu pro vrtaný vzorek materiálu. Dalším viditelným efektem, je právě zkreslení výsledků měření, vlivem rezonančních kmitočtů jednotlivých sond.



Graf 23 Porovnání útlumu vzorku bez otvorů a s otvory různými H sondami

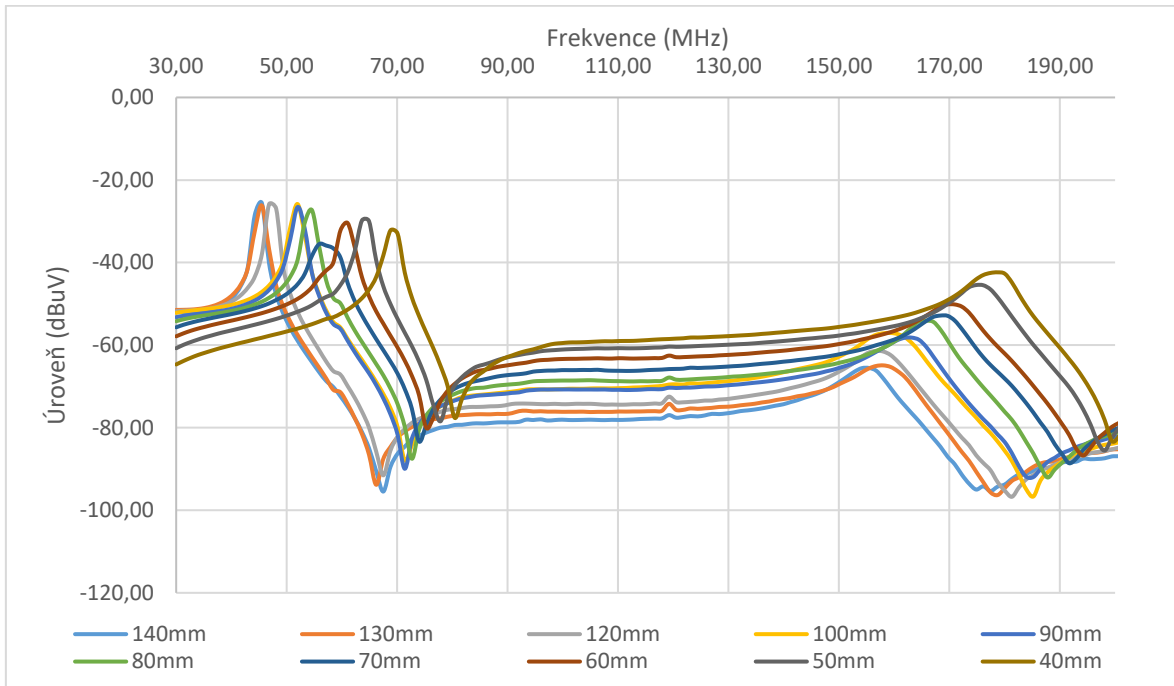
Při celkovém zhodnocení naměřených výsledků různých průměrů H sond z grafu 23 můžeme pozorovat, že pouze nejmenší sonda byla schopna detekovat perforaci uprostřed vzorku. V tomto případě se bude jednat o vlastnost sond magnetického pole, které budou nejcitlivější v okolí vodiče protékaného vysokofrekvenčním proudem. Citlivost magnetických sond se tedy bude radiálně snižovat, směrem ke středu smyčky (jak ukazuje obrázek 35). Souběžně je možné uvažovat tuto problematiku jako nedodržení konstrukčních zásad z kapitoly 4.1.



Obr. 35 Rozložení H pole kolem smyčkové antény [30]

6.8 Vliv průměru E sondy na rezonanci bez feritů

Cílem tohoto měření bylo ověření chování E sond s různými průměry za účelem hledání korelace mezi jednotlivými rezonančními kmitočty.



Graf 24 Rezonanční kmitočty E sond různých průměrů

7 Vyhodnocení výsledků měření

V této kapitole bude provedeno celkové zhodnocení naměřených výsledků pro získání ucelenějšího pohledu na výsledky měření. Následně budou blíže zkoumány některé jevy doprovázející měření.

7.1 Zhodnocení jednotlivých měření

V úvodním měření (kapitola 6.1) byl ověřen koncept použití sond blízkého pole pro měření účinnosti stínění. Tento koncept byl potvrzen a dle tohoto měření byl upraven postup a nastavení měřicí sestavy za účelem zpřesnění měření, optimalizace časové náročnosti měření a zvýšení dynamického rozsahu. Podstatným zjištěním v této kapitole bylo objevení špiček v měřeném spektru, které bylo možné ztlumit feritovými kroužky.

Při měření se sondami elektrického pole (kapitola 6.2 až 6.3) bylo zjištěno, že se vzrůstající frekvencí se účinnost stínění zvyšuje. V tomto měření byl pozorován pouze minimální rozdíl mezi jednotlivými vzorky materiálů, a tedy potvrzen očekávaný výsledek, že ztráty odrazem záleží na rozdílné vlnové impedanci materiálů. Měření se sondami magnetického pole (kapitola 6.4 až 6.5) ukázalo opačný trend účinnosti stínění, tedy že se zvyšující se frekvencí účinnost stínění klesá. Dalším rozdílem byla citlivost na perforaci vzorku, kdy útlum elektrického pole zůstal v podstatě nezměněný, ale útlum magnetického pole se snížil až o 20 dB. Dále byly objeveny zákmity v měřené charakteristice, které ale nebylo možné ztlumit feritovými kroužky (na rozdíl od sond E pole).

Vzhledem k tomu, že výsledky stejných typů sond různých velikostí se mezi sebou zásadně lišily, bylo vyrobeno několik dalších sond obou typů s různými průměry. V kapitole 6.6 je vidět porovnání sond elektrického pole o různém průměru. Bylo zjištěno, že E sonda menšího průměru má obecně vyšší dynamický rozsah, ale zároveň se v měření výrazněji objevují špičky měřeného signálu. Kapitola 6.7 pak pokrývá měření se sondami H pole, které poukazuje na opačnou závislost, tedy se zvyšujícím se průměrem se objevují špičky měřeného signálu. Vysoký dynamický rozsah u H sond pak byl snadno dosažitelný pro každé měření, neboť sondy vykazovali dobrou schopnost (při vyšších průměrech sond) vytvářet silné a dobře měřitelné pole i s použitím útlumových článků. V tomto měření se už od druhé nejmenší sondy objevují špičky, které není možné ztlumit. Zvětšení průměru sondy, posouvá tyto špičky na nižší frekvence.

Závěrečné měření se poté věnuje rezonanci E sond, které bude vyhodnoceno dále.

7.2 Dutinová rezonance

V případě měření se sondami elektrického pole se nabízí jako jedno z možných vysvětlení jev dutinové rezonance. V uzavřených strukturách, jejichž stěny jsou tvořeny odrazným materiálem, může docházet k rezonanci na určitých frekvencích, které jsou dány konstrukčním uspořádáním takové struktury. Tedy obdobným způsobem, jakým funguje reverberační komora (viz kapitola 3.4). V případě tohoto měření, kde jsou použity sondy kruhového tvaru, uvažujme tedy válcovou strukturu rezonátoru.

Vlivem konstrukce a vnitřních odrazů vln tedy uvnitř uzavřené struktury může vznikat elektromagnetické pole uspořádané několika způsoby. Konkrétní uspořádání pole poté nazýváme videm a jeho charakter je dán vidovým číslem. Tato uspořádání můžeme vyjadřovat řeznými rovinami, které nám pomohou charakterizovat rozložení daného pole. Tyto roviny nazýváme transverzálními (příčnými) a rozdělujeme je na dvě složky EM pole, tedy elektrické a magnetické. [26]

Transverzální složky se poté vypočítají následovně [27]:

$$TM: f_{mnp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{X_{mn}}{r}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot \pi}{r}\right)^2}, \quad (7.1)$$

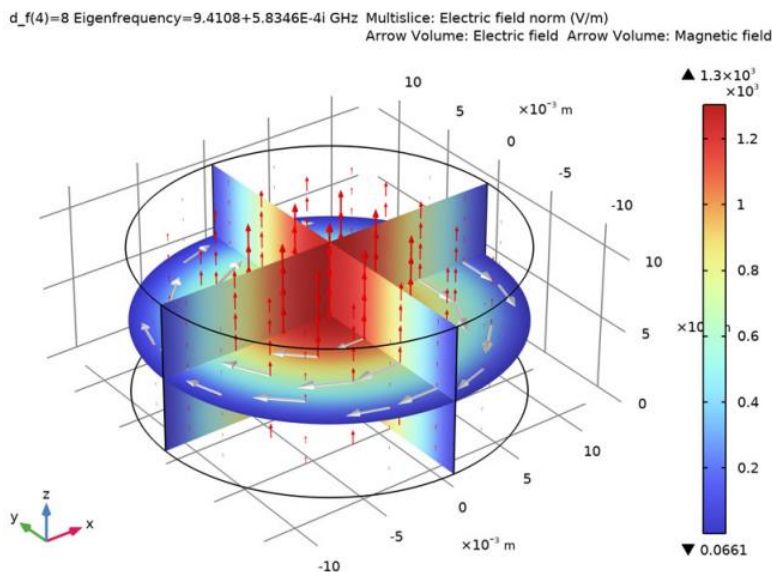
$$TE: f_{mnp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{X'_{mn}}{r}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot \pi}{r}\right)^2}. \quad (7.2)$$

Z rovnic tedy vychází, že mezní kmitočty se bude s rostoucí velikostí sond snižovat. Pokud bychom dosadili velikost největší sondy do rovnice, dostaneme následující hodnoty nejnižších mezních kmitočtů pro TM a TE:

$$TM: f_{110} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{X_{11}}{0,15}\right)^2 + \left(\frac{0 \cdot \pi}{0,15}\right)^2} = 1,219 \text{ GHz} \quad (7.3)$$

$$TE: f_{111} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{X'_{11}}{0,15}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot \pi}{0,15}\right)^2} = 15 \text{ GHz} \quad (7.4)$$

Vzhledem k tomu, že transverzálně elektrická složka (TE) vyšla mnohonásobně vyšší, než je v této práci maximální měřená frekvence, lze předpokládat, že efekt dutinové rezonance nemá vliv na výsledky měření této práce. Stejně tak transverzálně magnetická (TM) složka, která vyšla relativně blízko maximálnímu měřenému kmitočtu. Dále pak fakt, že se nejedná o plnohodnotný dutinový rezonátor, neboť sondy nejsou v uzavřeném prostoru a okraj teoretického válce je otevřený.

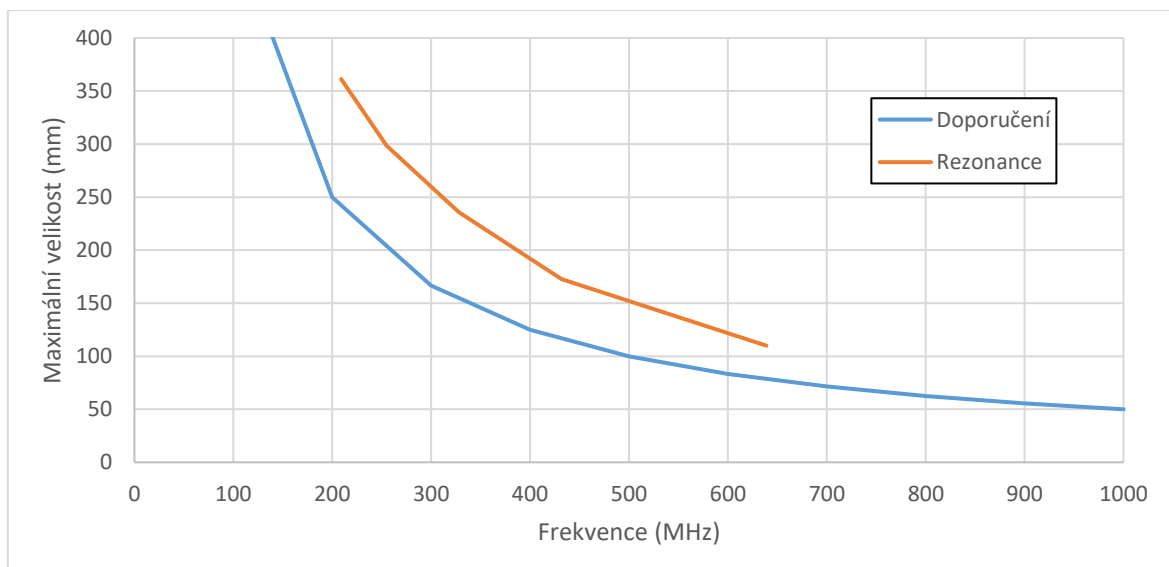


Obr. 36 Šipkové grafy elektrického a magnetického pole [28]

Model dutinové rezonance lze vytvořit i v simulačním programu COMSOL Multiphysics, kterým by bylo možné ověřit předešlé výpočty. K přístupu k těmto výpočtům je ale v programu zapotřebí RF modul, který není aktuálně studentům k dispozici, tedy je zde uveden pouze modelový příklad z webových stránek COMSOL.

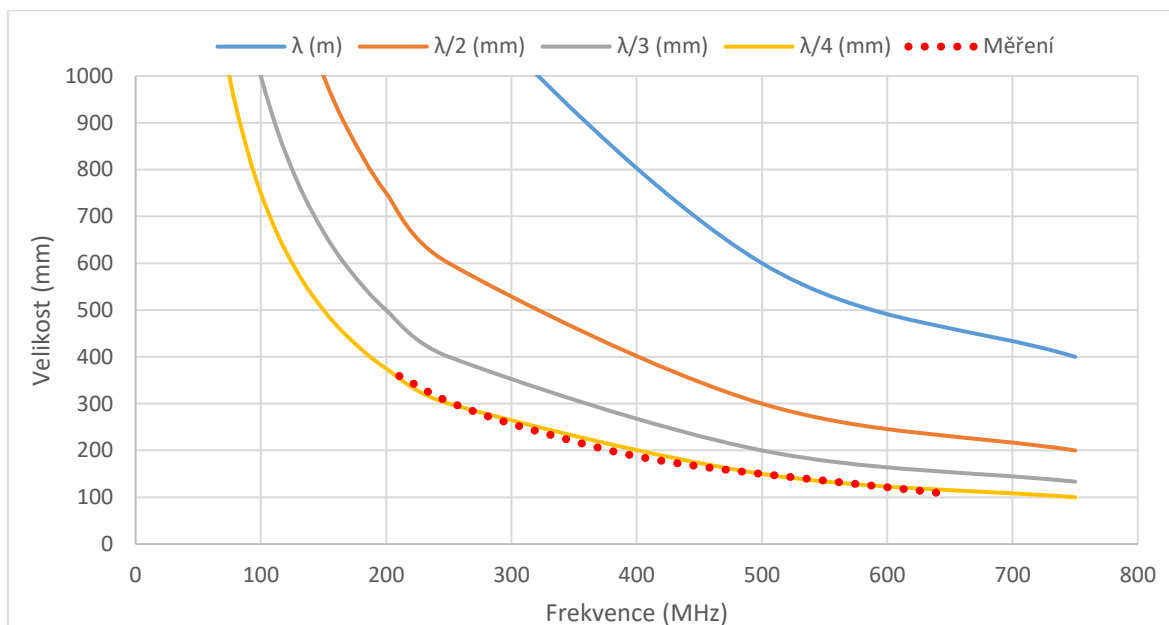
7.3 Smyčková anténa

Při měření různých průměrů magnetických sond (kapitola 6.7), byla sledována závislost prvního rezonančního kmitočtu na obvodu sondy. Pokud srovnáme tyto rezonanční kmitočty s doporučovaným omezením z kapitoly 4.1.1, dostaneme následující graf.



Graf 25 Srovnání měřených rezonancí s doporučením

Z grafu je možné vidět, že pokud nebude dodrženo toto doporučení, budou u sondy magnetického pole vznikat rezonance. Tyto rezonance vznikají konstrukcí sondy, ze které se v takovém případě stává malá smyčková anténa, která by mohla využívat této rezonance jakožto antény. Na následujícím grafu je ukázáno, že výsledky měření téměř přesně kopírují křivku „ $\lambda/4$ “, která odpovídá typickým konstrukcím smyčkových antén.



Graf 26 Srovnání měření s typickými konstrukcemi smyčkových antén

7.4 Mikropásková anténa

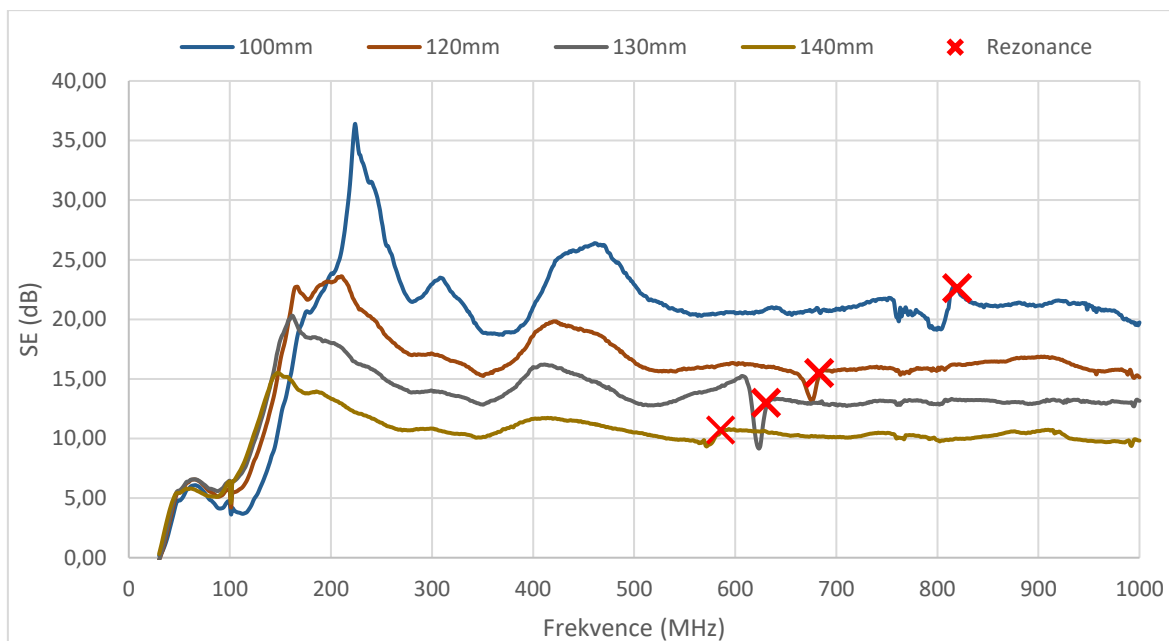
V případě sond elektrického pole je situace odlišná. Používané sondy nejsou nízkoimpedančního charakteru, jako tomu bylo v předchozím případě ale jedná se o vysokoimpedanční typ. V případě použitých sond se konstrukčně velice podobají mikropáskovým anténám. Tyto antény se typicky konstruují v podobě čtvercové plochy na desce plošného spoje s přívodním vodičem. Existují ovšem i konstrukce, využívající kruhovou plochu. V článku [29] je popsáno, jakým způsobem lze numericky zjistit rezonanční kmitočet mikropáskové antény kruhového tvaru. Využijí se následující rovnice.

$$f_r = \frac{K_{nm} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot a_e \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (7.5)$$

kde

$$a_e = a \left\{ 1 + \left(\frac{2 \cdot h}{\pi \cdot a \cdot \epsilon_r} \right) \left[\ln \left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}. \quad (7.6)$$

Pokud bychom proložili data naměřená v kapitole 6.6, výsledky teoretické rezonance, vypočtené podle výše uvedených vzorců (TM_{11}), dostali bychom graf 26.



Graf 27 Zvýraznění rezonančních kmitočtů E sond

Z výsledků je tedy patrné, že teoretické rezonanční frekvence, které bychom u konkrétních sond očekávali byly změřeny. Pokud bychom se při měření pomocí sond elektrického pole, chtěli vyvarovat tomuto efektu mikropáskové antény, museli bychom volit průměr plochy sondy menší než 80 mm. V případě průměru sondy 80 mm, vychází teoretický rezonanční kmitočet na přibližně 1 024 MHz.

7.5 Dipólová anténa

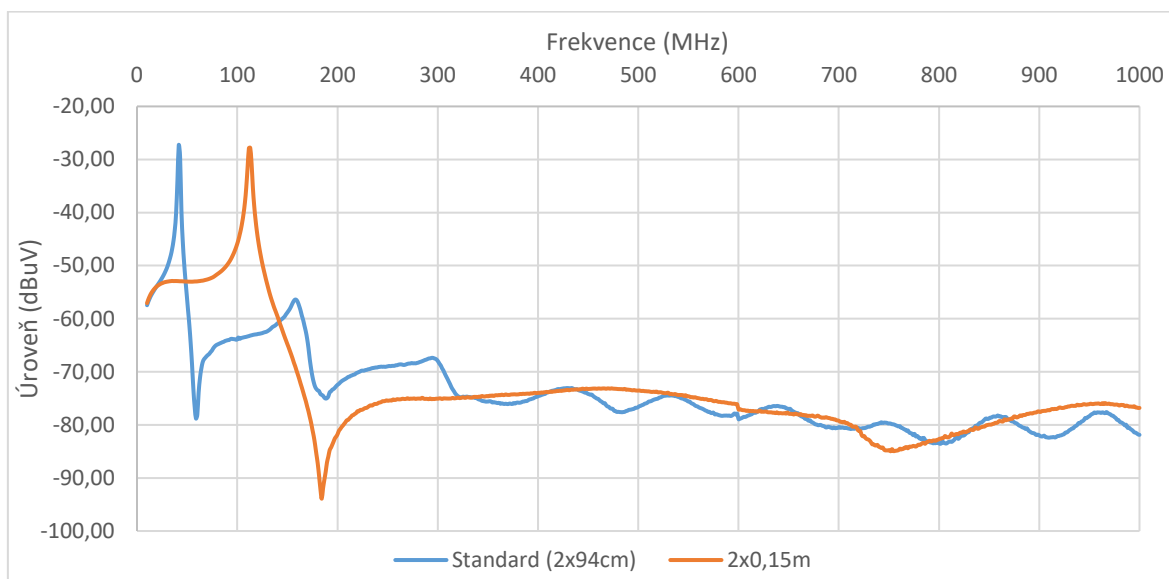
Z měření v kapitole 6.8 vyplývá, že rezonanční kmitočet se snižuje se zvětšujícím se průměrem sondy. Použitá struktura měření může způsobovat, že se daná struktura chová jako dipólová anténa a je tedy důvodem k rezonančnímu chování na určitých kmitočtech. Pokud bychom uvažovali, že použitá struktura obsahuje kabely dlouhé 94 cm, dále konektorové přechodky o délce přibližně 2 cm a nakonec sondy, které teoreticky prodlužují danou strukturu o dalších přibližně 7 cm, dostaneme celkově délku jednoho ramene 103 cm. Resonanční frekvence největší sondy byla přibližně na frekvenci 47 MHz. Vypočteme:

$$\lambda = \frac{c}{f} \cdot k_z = \frac{299\,792\,458}{47\,000\,000} \cdot 0,66 = 4,21 \text{ m}, \quad (7.7)$$

kde koeficient k_z je činitel zkrácení.

Dipólové antény se obvykle konstruují jako půl vlnné dipóly, a tedy pro tuto frekvenci by byla vhodná délka 2,1 m. Když tento údaj srovnáme s předchozím výsledkem, kde struktura má 206 cm (dvojnásobek délky ramene), dostaneme velice podobné výsledky.

Z toho důvodu byla tato domněnka ověřena měřením, kdy se zkoušelo zkrácení i prodloužení koaxiálního kabelu, který je mezi sondou a analyzátozem.

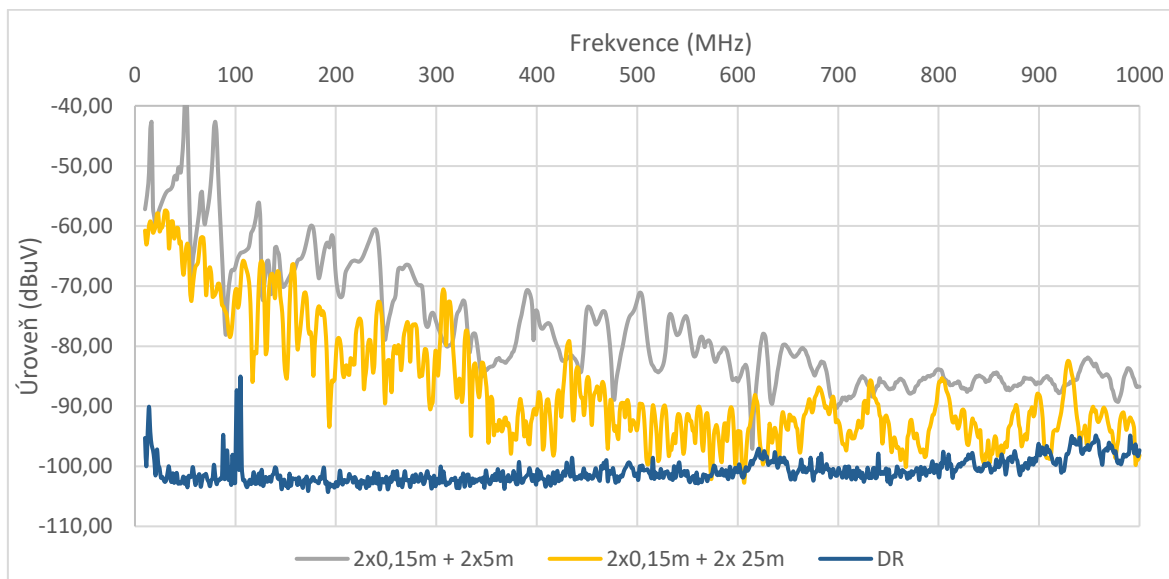


Graf 28 Měření rezonance s kratším koaxiálním kabelem

Z výsledků porovnání dvou různých délek koaxiálního kabelu je patrné, že zkrácením koaxiálního kabelu na délku konstrukčně nejkratší možnou, nedojde k zásadnímu posunu rezonanční frekvence. Očekávaná frekvence, kde bychom očekávali rezonanci by byla:

$$f = \frac{c}{\lambda} \cdot k_z = \frac{299\,792\,458}{0,3} \cdot 0,66 = 659,5 \text{ MHz.} \quad (7.8)$$

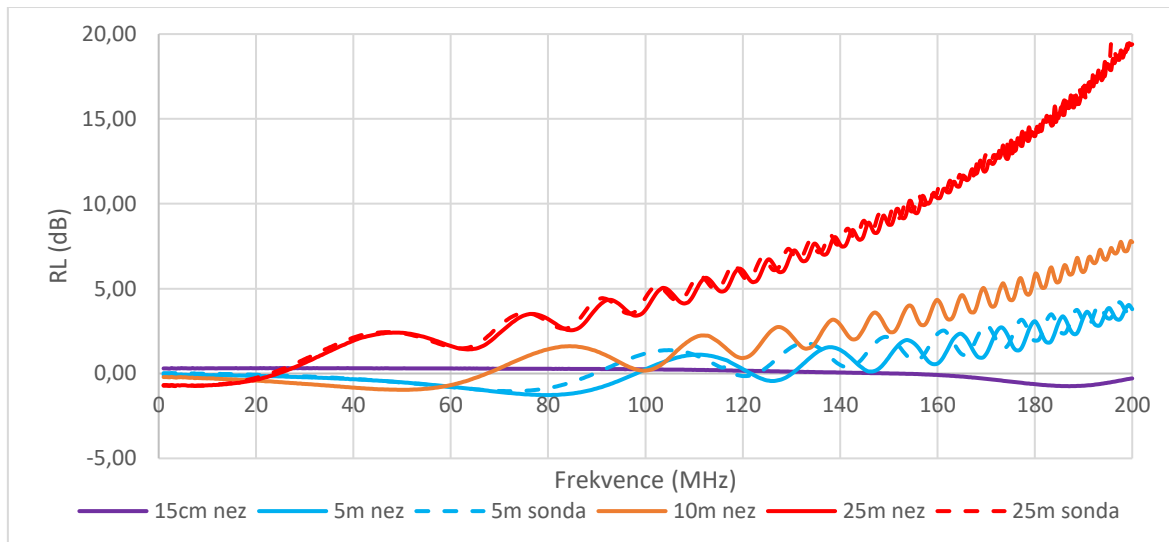
Měření tedy naznačuje, že dipólová struktura nebude v tomto případě efektem, který způsobuje příslušné rezonance. Měření bylo provedeno i s delšími koaxiálními kabely.



Graf 29 Měření rezonance s delšími koaxiálními kabely

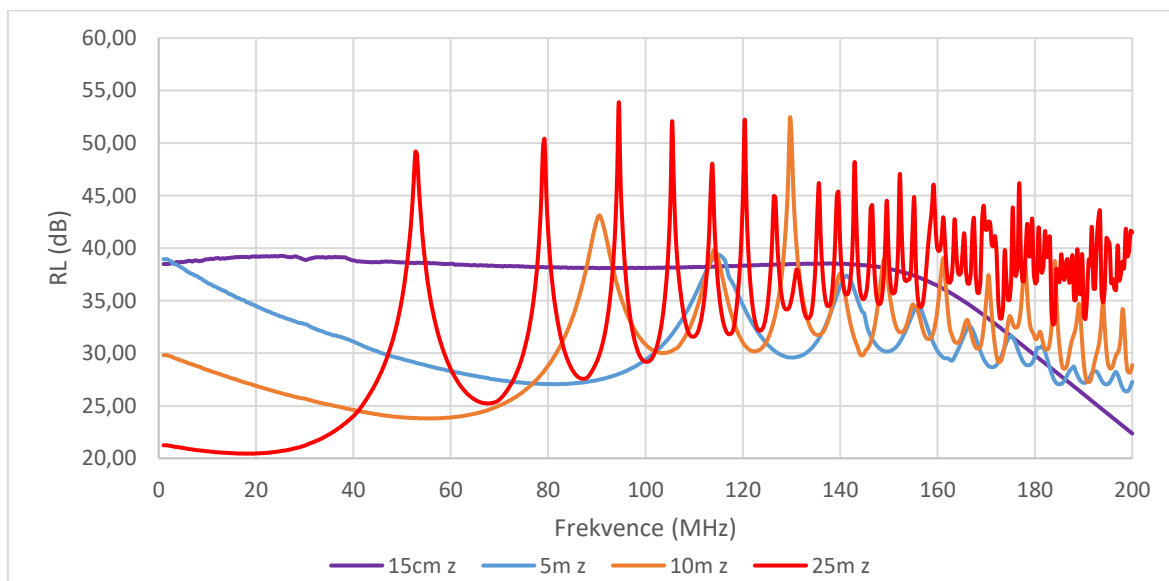
7.6 Vyhodnocení útlumu odrazu (Return loss)

Útlum odrazu (RL) je důležitým parametrem impedančního přizpůsobení vysokofrekvenčního systému. Využívá se hlavně v anténní technice, ale můžeme se s ním setkat i u vysokorychlostních signálových cest.



Graf 30 Měření RL nezakončených koaxiálních kabelů

Vzhledem k tomu, že se E sondy chovají jako nezakončené (neterminované), bylo měření provedeno právě s nezakončeným kabelem. Pro doplnění byly přidány výsledky měření i se sondami (čárkovaně) aby bylo poukázáno na přidání rozdílu mezi kabelem samotným a jeho rozšířením o sondu. V grafu 30 je nejdůležitější výsledek pro kabel délky 15 cm, který nevykazuje žádné rezonance, jaké byly pozorovány ve výsledcích měření.



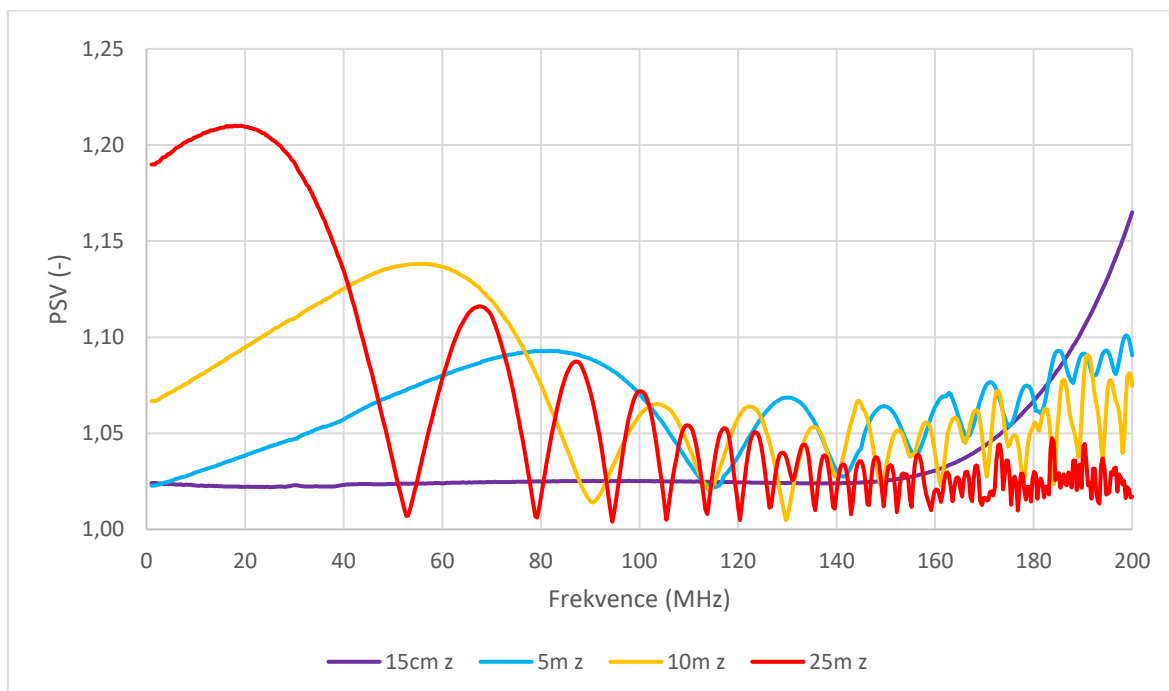
Graf 31 Měření RL zakončených koaxiálních kabelů

7.7 Vyhodnocení PSV (Poměr stojatých vlnění)

Parametr PSV je v anténní technice další velice důležitý pojem. Udává numericky, jak dobře je konkrétní anténa impedančně přizpůsobená oproti přenosové cestě (koaxiálnímu kabelu). Hodnotu PSV lze vypočítat z předchozího měření dle následujícího vztahu:

$$PSV = \frac{10^{RL/20} + 1}{10^{RL/20} - 1} \text{ (dB)}. \quad (7.9)$$

Po přepočtení předchozích výsledků, dostaneme graf níže.



Graf 32 Přepočtené PSV zakončených koaxiálních kabelů

Hlavním problémem s parametrem PSV je jeho divergentnost při průchodu RL nulou. Měření RL je obvykle konfigurováno pro měření vhodně zakončených struktur, jako jsou například antény. Tedy v případě měření nezakončených struktur nemusí být měření úplně vhodné. Naopak pro kabely zakončené je možné sledovat, která část grafu se přibližuje k hodnotě jedna a je tedy vhodně přizpůsobená.

Zhodnocení a závěr

V diplomové práci byl proveden teoretický rozbor, jakým způsobem funguje elektromagnetické stínění a proč je v současné elektrotechnice důležité. Následně byla provedena rešerše aktuálních možností měření účinnosti tohoto stínění. Dále byla zvolena metoda měření, pro kterou se následně realizoval přípravek pro měření. Díky technologii 3D tisku byl vytvořen přípravek vyrobený pouze z plastových dílů (PLA a PETG), které neovlivňují výsledky měření.

Měřením bylo ověřeno, jakým způsobem je možné měření realizovat a jaké jsou jeho vlastnosti. Z hlediska měření materiálů bylo měření útlumu magnetické složky dobře měřitelné a při zachování minimální velikosti sondy bylo možné eliminovat i parazitní vlivy, které ovlivňují měření. V případě sond magnetického pole se jedná především o vytvoření smyčkové antény. I když bylo možné sledovat rozdíly mezi jednotlivými materiály, nebyly tyto rozdíly natolik velké a potvrzovali teoretický předpoklad, že hlavní složky útlumu jsou dány primárně rozdílem impedance různých prostředí. Dále bylo možné pozorovat výrazný vliv perforace vzorku na jeho útlum.

Měření útlumu elektrické složky poukázalo na několik vlivů, které výrazně ovlivňují měření. Výsledky měření s těmito typy sond vykazovali značné špičky v charakteristikách, které sice bylo možné ovlivnit feritovými kroužky, ale zřejmě došlo pouze k přeladění této struktury do části frekvenční charakteristiky, kde se již útlum feritů příliš neuplatnil. Dalším pozorovaným efektem, který měření doprovázel bylo vytvoření mikropáskové antény, která vytvářela rezonanční průběhy na sondách větších průměrů. V práci bylo ověřeno několik možných variant fyzikálních principů, které by mohli způsobovat vytváření rezonancí sond elektrického pole s tímto konkrétním chováním. Výpočtem bylo zjištěno, že princip dutinového rezonátoru (i když se v tomto případě jedná pouze o částečně uzavřenou strukturu) se při této konstrukci bude pohybovat na značně vyšších frekvencích, než bylo změřeno a lze jej tedy vyloučit. Dále byla ověřena možná dipólová struktura měření, která se při změně struktury chovala jinak, než byl teoretický předpoklad. Finální ověření parametru RL a PSV nepoukázalo na výskyt rezonancí v použitých kabelech.

Diplomová práce shrnuje výsledky aktuálního poznání ohledně měření účinnosti elektromagnetického stínění a vzhledem k chybějícímu výzkumu v této oblasti je částečně v tomto pohledu unikátním shrnutím této metody měření. V navazující práci by bylo vhodné se zaměřit na možnosti modelování této navržené struktury a zejména na vysvětlení fyzikální

podstaty vytváření rezonanční struktury při použití sond elektrického pole. Dále by bylo vhodné provést vhodné úvahy nad konstrukčním uspořádáním sondy E pole, která by mohla tento nežádoucí efekt eliminovat. Dalším vhodným krokem by bylo ověření možnosti realizace sond magnetického pole pomocí vícevrstevných plošných spojů, které by mohly zlepšit vlastnosti sondy, aby konstrukčně více odpovídala koaxiálnímu kabelu.

Literatura

- [1] Značka CE – Wikipedie. [online]. Poslední změna 28.4.2022. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zna%C4%8Dka_CE
- [2] Using the UKCA marking - GOV.UK. [online]. Poslední změna 14.11.2022. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://www.gov.uk/guidance/using-the-ukca-marking>
- [3] FCC mark – Wikipedia. [online]. Poslední změna 18.1.2023. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/FCC_mark
- [4] China Compulsory Certificate – Wikipedia. [online]. Poslední změna 30.1.2023. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/China_Compulsory_Certificate
- [5] Types of legislation. [online]. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_en
- [6] EVROPSKÁ UNIE. Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2014/30/EU. In: Official Journal of the European Union, L 096 [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014L0030>
- [7] ČESKO. Nařízení vlády č. 117/2016 Sb., Nařízení vlády o posuzování shody výrobků z hlediska elektromagnetické kompatibility při jejich dodávání na trh. In: *Sbírka zákonů* 28.11.2022 v částce č. 161 pod číslem 350/2022 Sb. s účinností od 01.12.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-117/zneni-20221201>
- [8] ČSN EN 61000-4-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-2: Zkušební a měřicí technika - Elektrostatický výboj - Zkouška odolnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [9] ČSN EN 61000-4-4. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-4: Zkušební a měřicí technika - Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů - Zkouška odolnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013
- [10] ČSN EN 61000-4-5. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-5: Zkušební a měřicí technika - Rázový impulz - Zkouška odolnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015
- [11] ČSN EN 61000-4-11. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-11: Zkušební a měřicí technika - Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí - Zkoušky odolnosti*. Český normalizační institut, 2005

- [12] ČSN EN 61000-4-8. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-8: Zkušební a měřicí technika - Magnetické pole síťového kmitočtu - Zkouška odolnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [13] OTT, Henry W. *Electromagnetic compatibility engineering*. Hoboken: Wiley, c2009. ISBN 978-0-470-18930-6.
- [14] ČSN EN 61000-5-7. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 5-7: Směrnice o instalacích a zmírňování vlivů - Stupně ochrany kryty proti elektromagnetickým rušením (EM kód)*. Český normalizační institut, 2001
- [15] TR 1006 EN 0206 SE ASTM. [online]. Poslední změna 3.2.2006. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Chomerics/Parker-Chomerics-PREMIER-Conductive-Plastic-ASTM-4935-Test-Report_EN.pdf
- [16] ASTM D4935 simulation equipment components. | Download Scientific Diagram. [online]. Poslední změna Květen 2019 [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/ASTM-D4935-simulation-equipment-components_fig10_333179546
- [17] ASTM D4935: a) Reference specimen; b) Load specimen. | Download Scientific Diagram. [online]. Poslední změna Květen 2019 [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/ASTM-D4935-a-Reference-specimen-b-Load-specimen_fig4_333179546
- [18] Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. [online]. Poslední změna 15.5.2018. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://www.astm.org/standards/d4935>
- [19] Horacio Vasquez, Laura Espinoza, Karen Lozano, Heinrich Foltz (IEEE Member), and Shuying Yang, Simple Device for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness Measurement, IEEE EMC Society Newsletter Online, 2009, číslo 220, [online]. Dostupné z: <https://www.emcs.org/acstrial/newsletters/winter09/pp2.pdf>
- [20] Měření elektromagnetické stínicí účinnosti planárních materiálů v pásmu 100 kHz až 1,5 GHz [online]. Poslední změna 26.3.2010. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=mereni-elektromagneticke-stinici-ucinnosti-planarnich-materialu-v-pasmu-100-khz-az-15-ghz&cislocclanku=2010030006>
- [21] 299.1-2013 - IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m | IEEE Standard

- | IEEE Xplore. [online]. Poslední změna 15.1.2014. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6712029>
- [22] "IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m," in IEEE Std 299.1-2013 , vol., no., pp.1-96, 15 Jan. 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6712029.
- [23] Reverberation-Chamber. [online]. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://faradayshielding.com.au/wp-content/uploads/2021/04/Reverberation-Chamber.jpg>
- [24] Review: Rohde & Schwarz HZ-15 near field probes. [online]. Poslední změna 20.10.2014. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://www.edn.com/review-rohde-schwarz-hz-15-near-field-probes/>
- [25] Webinar: Cost-effective uses of close-field probing Part 1 [online]. Poslední změna 20.11.2013. [Cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://interferencetechnology.com/wp-content/uploads/2013/11/Cost-effective-close-field-probing-Handout.pdf>
- [26] HROMÁDKA, Miroslav. *Analýza účinnosti elektromagnetického stínění objektů malých rozměrů*. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [27] LearnEMC Cavity Resonance Calculator [online]. [Cit. 27.3.2023]. Dostupné z: https://learnemc.com/EXT/calculators/Cavity_Resonance_Calculator/cyl-res.html
- [28] Computing Q Factors and Resonant Frequencies of Cavity Resonators [online]. [Cit. 27.3.2023]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/model/computing-q-factors-and-resonant-frequencies-of-cavity-resonators-9618>
- [29] DEVI, R., NEOG, Dipak. *Determination of Radius of Circular Microstrip Antenna Using Clonal Selection Algorithm* [online]. Volume 10, Issue 4, Ver. I (Jul - Aug .2015), PP 52-55 [Cit. 27.3.2023]. DOI: 10.9790/2834-10415255. Dostupné z: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jece/papers/Vol.%2010%20Issue%204/Version-1/I010415255.pdf>
- [30] Draw a labelled diagram showing the magnetic field lines of a loop carrying current [online]. [Cit. 7.5.2023]. Dostupné z: <https://www.toppr.com/ask/question/draw-a-labelled-diagram-showing-the-magnetic-field-lines-of-a-loop-carrying-current-mark/>