

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření stínící účinnosti polymerních a uhlíkových kompozitů

Diplomová práce

2023

Bc. Petr Fous

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Fous**  
Osobní číslo: **I21289**  
Studijní program: **N0714A060018 Komunikační a radarové systémy**  
Téma práce: **Měření stínící účinnosti polymerních a uhlíkových kompozitů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

## Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši na téma stínění elektromagnetických interferencí na ohebné elektronice.
2. Zpracujte literární rešerši na téma metody měření stínící účinnosti.
3. Proveďte měření rozptylových parametrů kompozitních materiálů s elektricky vodivými plnivými.
4. Vyhodnoťte velikost stínící účinnosti měřených materiálů a diskutujte získané výsledky s přihlédnutím k parametrům jako je elektrická vodivost, permitivita, obsah vodivých částic, tloušťka materiálu, atd.
5. Výsledky zpracujte do formy závěrečné práce v maximálním rozsahu 80 stran včetně tabulek a obrázků.

Rozsah pracovní zprávy: **50-80**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Články publikované v domácích a zahraničních odborných časopisech uveřejněných v elektronických databázích např. IEE Xplore, WOS, Scifinder apod., odborné knihy, manuály a odborně zaměřené www stránky.

Specializovaná literatura, např.:

- Maruthi, N.; Faisal, M.; Raghavendra, N. Conducting Polymer Based Composites as Efficient EMI Shielding Materials: A Comprehensive Review and Future Prospects. Synthetic Metals 2021, 272, 116664. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116664>.
- Mathur, P.; Raman, S. Electromagnetic Interference (EMI): Measurement and Reduction Techniques. Journal of Elec Materi 2020, 49 (5), 2975–2998. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07979-1>.
- Chung, D. D. L. Materials for Electromagnetic Interference Shielding. Materials Chemistry and Physics 2020, 255, 123587. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123587>.
- Celozzi, S; Araneo, R.; Lovat, G; Electromagnetic shielding, John Wiley & Sons, 2008, ISBN: 978-0-470-05536-6

Vedoucí diplomové práce: **Dušan Kopecký**  
Výzkumné centrum FEI

Datum zadání diplomové práce: **18. listopadu 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2023**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.** v.r.  
děkan

L.S.

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. listopadu 2022

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Práci s názvem Měření stínící účinnosti polymerních a uhlíkových kompozitů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Dušanovi Kopeckému, Ph.D. za ochotu, vstřícnost a odborné vedení celé diplomové práce a celkovou komunikaci při řešení dané problematiky. Poděkování patří i panu Ing. Tomášovi Zálabskému, Ph.D. za ochotu při měření a rady, které jsem od něj dostával. Dále bych chtěl poděkovat i ostatním členům týmu, kteří se na VŠCHT starali o přípravu materiálů pro mojí diplomovou práci, a také za to, že jsem celý proces mohl sledovat. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině, přítelkyni, kamarádům a všem, kteří mně byli nápomocni nejen při psaní této diplomové práce, ale po dobu celého studia.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou stínění elektromagnetického rušení (EMI). V teoretické části jsou popsány základní fyzikální vztahy pro elektromagnetické záření a stínící účinnost (SE) a diskutovány příspěvky permitivity, permeability a elektrické vodivosti prostředí k SE. Dále jsou zde představeny zdroje EMI, a metody a přístroje pro měření EMI. EMI v teoretické části je rozděleno na vyzařované emise a vedené emise. Značná část teorie se věnuje testování elektromagnetické odolnosti zařízení, tj. schopnosti přístroje pracovat v podmínkách intenzivního zdroje elektromagnetického záření. Jsou zde také diskutovány metody eliminace EMI a dále způsoby měření SE. Hlavní důraz je kladen zejména na měření SE pomocí vlnododné metody, která byla použita v rámci diplomové práce a je zmíněna a detailně diskutována v praktické části. Na závěr teoretické části je představena materiálová základna, která se využívá v oblasti vývoje moderních štítů elektromagnetického záření. Poslední kapitola se věnuje rozrůstajícímu se odvětví ohebné a nositelné elektroniky, která využívá pokroků v oblasti vývoje moderních štítů EMI.

V praktické části jsou pak blíže specifikovány materiály, jejichž SE byla testována. Použity byly nanostrukturované elektricky vodivé částice, zejména polypyrrolové nanotrubky, expandovaný grafit, a uhlíkové částice Vulcan Carbon, Carbon Pearl a SuperP. Je zde popsána příprava ohebných štítů EMI na bázi kompozitů vodivých nanočástic a polydimethylsiloxanu, včetně jejich úpravy pro dané podmínky měření. Součástí experimentu je rovněž popis testovací stanice využívající síťového vektorového analyzátoru, která byla použita pro měření. Uvedeny jsou i metody její kalibrace. Zevrubně jsou rovněž diskutovány použité vlnovody, jejich vlastnosti a pracovní frekvence. Velkou část praktické části diplomové práce pak tvoří shrnutí a diskuze výsledků měření SE vybraných vzorků, výpočty příspěvků reflexe, transmise a absorpce k celkové SE a v neposlední řadě i diskuze vlivu tloušťky štítu na SE.

## **Klíčová slova**

Stínící účinnost, elektromagnetické rušení, stínící materiály, měření elektromagnetického rušení, absorpce, reflexe, transmise

## **Title**

Measurement of shielding efficiency of polymer and carbonaceous composites

## **Annotation**

This Master thesis deals with the issue of electromagnetic interference (EMI) shielding. The theoretical part describes the basic physical relationships for electromagnetic radiation and shielding effectiveness (SE) and discusses the contributions of permittivity, permeability, and electrical conductivity of the medium to SE. It also introduces sources of EMI, and methods and instruments for EMI measurement. EMI in the theoretical part is divided into radiated emissions and conducted emissions. A significant part of the theory is devoted to the testing of the electromagnetic immunity of equipment, i.e., the ability of the equipment to operate under conditions of intense electromagnetic radiation from source. Methods of eliminating EMI are also discussed, as well as methods of measuring SE. In particular, the main focus is on the measurement of SE using the waveguide method, which was used in the thesis and is mentioned and discussed in detail in the experimental section. At the end of the theoretical part, the material base used in the development of modern electromagnetic radiation shields is presented. The last chapter is devoted to the growing field of flexible and wearable electronics, which takes advantage of the advances in the development of modern EMI shields.

In the experimental section, the materials whose SE was tested are specified in more detail. Nanostructured electrically conductive particles were used, in particular polypyrrole nanotubes, expanded graphite, and carbonaceous particles Vulcan Carbon, Carbon Pearl and SuperP. The preparation of flexible EMI shields based on composites of conductive nanoparticles and polydimethylsiloxane is described, including their modification for the given measurement conditions. The experiment also includes a description of the test station using a vector network analyzer that was used for the measurements. Methods for its calibration are also given. The waveguides used, their properties and operating frequencies are also discussed in detail. A large part of the experimental section of the thesis consists of a summary and discussion of the results of the SE measurements of the selected samples, calculations of the contributions of reflection, transmission and absorption to the overall SE and, last but not least, a discussion of the influence of the shield thickness on the SE.

## **Keywords**

Shielding effectiveness, electromagnetic interference, shielding materials, measurement of electromagnetic interference, absorption, reflection, transmission

# Obsah

Seznam ilustrací.....	VI
Seznam tabulek.....	VII
Seznam zkratek a značek.....	VIII
1 Úvod.....	1
1.1 Motivace.....	1
2 Teoretická část EMI.....	2
2.1 Matematicko-fyzikální popis účinnosti stínění EMI.....	2
2.1.1 Stínící účinnost.....	2
2.1.2 Permittivita.....	4
2.1.3 Permeabilita.....	4
2.1.4 Elektrická vodivost.....	5
2.2 Měření elektromagnetického rušení.....	5
2.2.1 Testování emisí.....	5
2.2.2 Vyzařované emise.....	5
2.2.3 Bezodrazová komora.....	6
2.2.4 GTEM komora.....	7
2.2.5 OATS.....	8
2.2.6 Používané antény pro měření rušení.....	9
2.2.7 Vedené emise.....	11
2.2.8 Umělá zátěž LISN.....	11
2.2.9 Proudová sonda.....	12
2.2.10 Napěťová sonda.....	13
2.2.11 Absorpční kleště.....	14
2.3 Testování odolnosti zařízení.....	15
2.3.1 Kontinuální testování odolnosti.....	15
2.3.2 Magnetické pole.....	15



2.3.3	Testování odolnosti vyzářeným magnetickým polem .....	16
2.3.4	Testování odolnosti vedeným magnetickým polem .....	16
2.4	Metody eliminace elektromagnetického rušení .....	17
2.4.1	Elektromagnetické stínění.....	17
2.4.2	Měření účinnosti stínění – koaxiální přenosové vedení.....	18
2.4.3	Měření účinnosti stínění – obdélníkový vlnovod .....	19
2.4.4	Měření účinnosti stínění – test ve volném prostoru.....	20
2.4.5	Rozdílový režim.....	21
2.4.6	Společný režim .....	22
2.4.7	Filtry rozdílového a společného režimu.....	22
2.4.8	Rozšíření spektra.....	23
2.5	Používané materiály pro elektromagnetické stínění .....	23
2.5.1	Funkční a strukturální materiály .....	24
2.5.2	Kovy.....	24
2.5.3	Uhlíkové materiály .....	25
2.5.4	Polymery .....	25
2.5.5	Kombinace materiálů (=Kompozity) .....	26
2.6	Ohebná elektronika .....	26
2.6.1	Pružné senzory a displeje.....	27
2.6.2	Pružný rezistor .....	29
3	Praktická část .....	30
3.1	Použité materiály.....	30
3.1.1	Polypyrrolové nanotrubky .....	30
3.1.2	Expanded Graphite .....	31
3.1.3	Vulcan Carbon .....	31
3.1.4	Carbon Pearl .....	31
3.1.5	SuperP.....	31

3.2	EMI štíty.....	32
3.2.1	Úprava vzorků.....	33
3.3	Měření vzorků .....	34
3.3.1	Vektorový analyzátor.....	34
3.3.2	Kalibrace VNA .....	35
3.3.3	Vlnovody .....	39
3.3.4	Celé pracoviště.....	43
3.3.5	Export dat.....	43
3.4	Výsledky z naměřených dat .....	44
3.4.1	Stínící účinnost vzorku PPy-NT .....	44
3.4.2	Reflexe, transmise, absorpce vzorku PPy-NT .....	46
3.4.3	Vliv tloušťky vzorků.....	48
3.4.4	Porovnání stínící účinnosti na vlnovodu R70 .....	49
4	Závěr .....	51
	Literatura.....	53
	Seznam příloh .....	58

## Seznam ilustrací

Obrázek 1 - Elektromagnetické pole .....	2
Obrázek 2 - Útlum elektromagnetické vlny.....	4
Obrázek 3 - Pracoviště pro testování vyzařovaných emisí .....	6
Obrázek 4 - Polyuretanový absorpční materiál.....	7
Obrázek 5 - Bezodrazová komora .....	7
Obrázek 6 - GTEM komora .....	8
Obrázek 7 - OATS pracoviště z webu EMC FastPass.....	9
Obrázek 8 - Minimální doporučené parametry měření na volném prostranství .....	9
Obrázek 9 - Bikónická anténa .....	10
Obrázek 10 - Logaritmicko-periodická anténa .....	10
Obrázek 11 - Blokové schéma sítě LISN .....	11
Obrázek 12 - Zapojení s umělou zátěží LISN .....	12
Obrázek 13 - Proudová sonda.....	13
Obrázek 14 - Kmitočtová charakteristika admitance.....	13
Obrázek 15 - Zapojení napěťové sondy .....	14
Obrázek 16 - Konstrukce absorpčních kleští .....	14
Obrázek 17 - Zkoušení malého objektu cívkou .....	15
Obrázek 18 - Pracoviště pro testování odolnosti vyzářeným magnetickým polem.....	16
Obrázek 19 - Blokový diagram pro testování odolnosti .....	17
Obrázek 20 - Elektromagnetické stínění přístroje .....	18
Obrázek 21 - Koaxiální přenosové vedení .....	19
Obrázek 22 - Různé druhy vlnovodů.....	19
Obrázek 23 - Měření pomocí vlnovodu .....	20
Obrázek 24 - Metoda volného prostoru pro měření účinnosti stínění .....	21
Obrázek 25 - Rozdílový režim.....	22
Obrázek 26 - Společný režim.....	22
Obrázek 27 - Stínící slitinový materiál .....	24
Obrázek 28 - Pružný plát grafitu.....	25
Obrázek 29 - Chemické struktury vodivých polymerů.....	26
Obrázek 30 - EKG senzory .....	27
Obrázek 31 - Flexibilní elektronický papír.....	28
Obrázek 32 - OLED pružný displej .....	28

Obrázek 33 - Pružná PC RAM .....	29
Obrázek 34 - Snímek PPy-NT z elektronového mikroskopu, zvětšení 10 000× .....	30
Obrázek 35 - Laboratoř na přípravu vzorků .....	32
Obrázek 36 - Elektronový mikroskop Tescan .....	33
Obrázek 37 - Vlnovod R32 se vzorkem.....	34
Obrázek 38 - Vlnovod R140 se vzorkem.....	34
Obrázek 39 - Vektorový síťový analyzátor .....	35
Obrázek 40 - Momentový klíč pro správné dotažení.....	36
Obrázek 41 - Kalibrační sada R&S.....	38
Obrázek 42 - Kalibrace VNA .....	39
Obrázek 43 - Vlnovod R32 s hliníkovými obdélníky.....	40
Obrázek 44 - Vlnovody.....	41
Obrázek 45 - Nehomogenity vzorku.....	41
Obrázek 46 - Rozměry vlnovodu .....	42
Obrázek 47 - Zapojení pracoviště.....	43
Obrázek 48 - Exportovaná data z VNA.....	44
Obrázek 49 - Stínící účinnosti 2 mm vzorku PPy-NT .....	46
Obrázek 50 - Reflexe, transmise, absorpce 2 mm vzorku PPy-NT .....	47
Obrázek 51 - Stínící účinnost vzorku CarbonPearl s tloušťkou 5 mm .....	48
Obrázek 52 - Stínící účinnost vzorku CarbonPearl s tloušťkou 4 mm .....	49
Obrázek 53 - Stínící účinnost vzorku CarbonPearl s tloušťkou 3 mm .....	49
Obrázek 54 - Stínící účinnost všech použitých vzorků na vlnovodu R70 s tloušťkou 4 mm...50	

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Typy antén.....	10
Tabulka 3 - Kalibrační sada.....	37
Tabulka 2 - Typy vlnovodů .....	42

## Seznam zkratek a značek

EMI	Electromagnetic Interference, elektromagnetické rušení
EMC	Electromagnetic Compatibility, elektromagnetická kompatibilita
SE	Shielding Effectiveness, stínící účinnost
TEM	Transversal-ElectroMagnetic
GTEM	Gigahertz-Transversal-ElectroMagnetic
OATS	Open Area Test Site, testovací pracoviště na otevřeném prostranství
EUT	Equipment Under Test, zkoušené zařízení
LISN	Line Impedance Stabilizing Network, umělá síť
DM	Differential Mode, rozdílový režim
CM	Common Mode, společný režim
VNA	Vector Network Analyzer, vektorový síťový analyzátor
SNA	Scalar Network Analyzer, skalární síťový analyzátor
LCD	Liquid Crystal Display, displej z tekutých krystalů
OLED	Organic Light-Emitting Diode, elektroluminiscenční dioda
TOSM	Through – Open – Short – Match
PDMS	Polydimethylsiloxane
PPyNT	Polypyrrole nanotubes, Polypyrolové nanotrubky
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

Elektromagnetické rušení (EMI, z angl. Electromagnetic Interference) je nedílnou součástí provozu každého elektronického zařízení. Jedná se o rušení, které může být způsobeno člověkem (např. provozem vysoce integrovaných elektrických obvodů, telekomunikačních zařízení, spínaných zdrojů apod.) nebo přírodními vlivy (např. slunečními erupcemi či výbojem blesku). Obor zabývající se elektromagnetickou kompatibilitou zařízení (EMC; z angl. Electromagnetic Compatibility), jehož součástí je i měření EMI, je tedy velmi důležitým technickým oborem. Zanedbání EMC přístrojů při jejich návrhu může vést k nesprávné funkci, poruchám vlastního zařízení nebo rušení zařízení okolních. EMC předpokládá, že EMI bude u každého zařízení generováno v předem stanovených mezích, aby se zabránilo vzájemnému rušení blízko umístěných přístrojů. Jedním z hlavních oborů, kde je velice žádoucí, aby EMI nepřekročilo stanovené hodnoty je například zdravotnictví nebo vojenství. Ve zdravotnictví je důležité zajistit, aby citlivé diagnostické přístroje pracovaly s minimem rušení a sami nebyly zdrojem EMI.

V praxi existují 3 různá řešení, jak EMI odstranit nebo potlačit. První z nich je filtrace signálu. Filtry se používají ve většině moderních elektronických zařízení pro snižování EMI. Obvykle se jedná o střídavý síťový filtr, který nepropustí do obvodu nežádoucí signály a díky tomu je zařízení chráněno. Druhou metodou vedoucí ke snížení EMI je stínění. Jedním z velkých zdrojů EMI jsou kabely, proto je nutné používat kabely stíněné. Jedním z typů kabelů, který nejlépe odolává EMI, je koaxiální kabel. Kromě stínění kabelů se však jedná i o stínění celých elektronických obvodů, které mohou být zapouzdřeny do štítu EMI, aby nevyzařovaly nežádoucí elektromagnetickou energii do prostoru. Poslední oblastí, kterou je nezbytné uvažovat, je dlouhodobý vliv intenzivního elektromagnetického pole na zdraví člověka či ostatních živých organismů. Lze však oprávněně přepokládat, že neregulované intenzivní EMI vliv na zdraví člověka mít bude. Otázkou také zůstává, zda dlouhodobé působení EMI o nízkých intenzitách může způsobovat biologickou reakci organismu. Odpověď na tuto otázku lze získat pouze dlouhodobými experimenty, které jsou ze zjevného důvodu velmi náročné na realizaci a vyhodnocení. Řada těchto experimentů je v současné době vedena v souvislosti s vydáním nových norem zabývajících se problematikou vlivu elektromagnetického záření na živé organismy. Aktuálně se jimi zabývá např. komise IEC/IEEE JWG13 a JMT 62209-3. [1] [2]

## 2 Teoretická část EMI

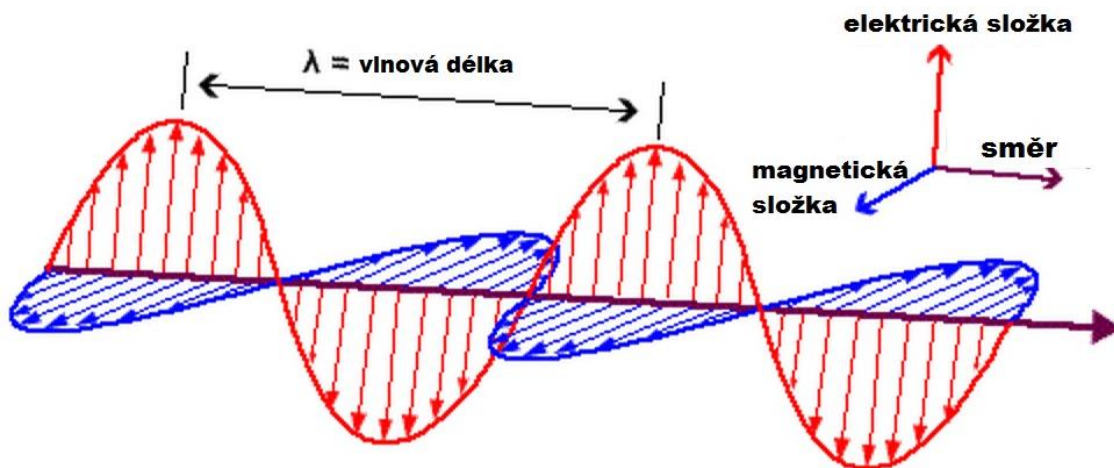
V této části je blíže specifikována problematika EMI z hlediska měření elektromagnetického záření, pomocí specializovaných zařízení. Dále jsou zde popsány vztahy popisující SE.

### 2.1 Matematicko-fyzikální popis účinnosti stínění EMI

V odstavcích, které se nacházejí v této podkapitole budou rozepsány vlastnosti, které udávají celkový charakter stínícího materiálu. Jedná se zejména o permitivitu, permeabilitu, elektrickou vodivost a rozptylové parametry, tzv. s-parametry, díky kterým je možné zjistit, jak materiál elektromagnetické záření absorbuje a reflektuje a z těchto dvou hodnot následně dopočítat hodnotu transmise. V prvním odstavci 2.1.1 je uvedena efektivita stínění, která patří mezi nejdůležitější parametry charakterizující elektromagnetické stínění.

#### 2.1.1 Stínící účinnost

Stínící účinnost (SE, z angl. Shielding Effectiveness) je poměr mezi intenzitou elektromagnetického pole před štítem EMI a za ním. V ideálním případě je SE 100 %, což znamená, že elektromagnetické vlny se nedostanou za štít. V praxi takovéto situace lze dosáhnout jen velmi obtížně, protože elektromagnetická vlna projde skrz stínící materiál díky otvorům, kabelovým průchodkám, displejům atd. Na štítu dochází celkem ke čtyřem jevům, kterými jsou absorpce, reflexe, vnitřní reflexe a transmise.



Obrázek 1 - Elektromagnetické pole [3]

Elektromagnetické vlny se skládají ze dvou složek. Jedná se o magnetické pole H a elektrické pole E. Obě pole jsou na sebe kolmá, jak ukazuje Obrázek 1. Poměr intenzity elektrického pole k intenzitě magnetického pole nazýváme charakteristickou impedancí. Impedance volného

prostoru je přibližně 377  $\Omega$ . [4] Při stínění uvažujeme dvě oblasti, blízkou oblast (angl. near-field) a vzdálenou oblast (angl. far-field). [5] Jestliže je vzdálenost mezi zdrojem záření a stíněním větší jak  $\lambda/2\pi$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka zdroje záření, jedná se o vzdálenou oblast stínění. Když je vzdálenost mezi zdrojem záření a stínícím materiálem menší jak  $\lambda/2\pi$ , mluví se o oblasti blízkého stínění. [4]

SE je poměr intenzit před a po útlumu elektrického a magnetického pole. Tento poměr lze vyjádřit takto [6]:

$$SE = 20 \log \left( \frac{E_t}{E_i} \right) [dB] \quad (1)$$

$$SE = 20 \log \left( \frac{H_t}{H_i} \right) [dB] \quad (2)$$

Dolní indexy jak u elektrického, tak magnetického pole značí přenesené (index t; z angl. transmitted) vlny a dopadající vlny (index i; z angl. incident). Jednotky elektrického pole jsou volt na metr ( $V \cdot m^{-1}$ ) a magnetického pole je ampér na metr ( $A \cdot m^{-1}$ ). SE je funkcí frekvence. K útlumu elektromagnetické vlny dochází kvůli třem mechanismům, které jsou znázorněny na obrázku 2. Jedná se o absorpci (A), kdy část energie je materiálem pohlcena. Druhým mechanismem je reflexe (R), toto jsou ztráty odrazem od daného stínícího materiálu a vícenásobné odrazy (B) magnetické vlny, které vznikají uvnitř materiálu. Všechny tyto parametry jsou ovlivněny příslušným materiálem, ze kterého je stínící štít zhotoven. SE je pak dána součtem těchto veličin dle rovnice 3. [4]

$$SE = A + R + B [dB] \quad (3)$$

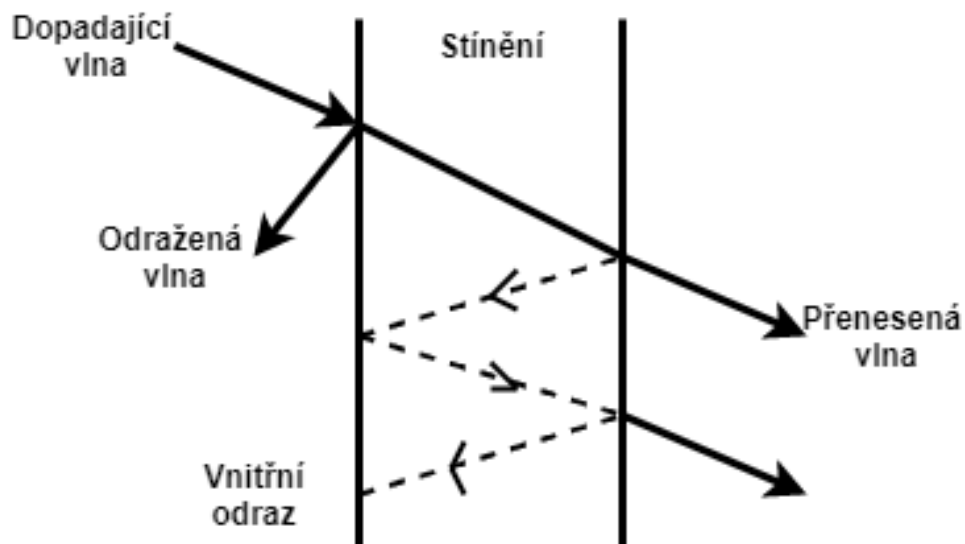
Zmíněná SE je úzce spojena s měřením s-parametrů ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  a  $S_{22}$ ) na vektorovém analyzátoru (viz dále). Z naměřených s-parametrů lze totiž vypočítat SE daného štítu, tedy hodnotu, která udává kolik signálu se ztratí při průchodu štítem, či odrazem od štítu. Čím je hodnota SE vyšší, tím je množství prošlého záření nižší, protože se energie buď odráží nebo je absorbována. Rovnice 4, 5 a 6 ukazují vztahy mezi rozptylovými parametry a útlumem absorpcí či reflexí. [7]

$$SE_T = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{|S_{11}|^2} \right) \quad (4)$$

$$SE_R = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{1-R} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{1-|S_{11}|^2} \right) \quad (5)$$

$$SE_A = 10 \log_{10} \left( \frac{1-R}{T} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1-|S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \right) \quad (6)$$





Obrázek 2 - Útlum elektromagnetické vlny

### 2.1.2 Permittivita

Permittivita je fyzikální veličina (označovaná symbolem  $\epsilon$ ), která vyjadřuje míru schopnosti materiálu podporovat vytváření elektrického pole v materiálu v reakci na vnější pole elektrické. [8] Materiály pro elektromagnetické stínění s výhodou využívají vysokou elektrickou permitivitu, která zabraňuje průchodu elektrického pole. Štíty EMI chránící citlivé součástky před vnějším elektromagnetickým zářením jsou velmi často konstruovány z materiálů s vysokou permitivitou. Permittivita materiálu je např. důležitá také při konstrukci kondenzátoru, kde se vzrůstající permitivitou má kondenzátor vyšší kapacitu.

### 2.1.3 Permeabilita

Permeabilita je fyzikální veličina (označovaná symbolem  $\mu$ ), která vyjadřuje vliv určitého materiálu nebo prostředí na výsledné účinky působícího magnetického pole. [9] V oblasti elektromagnetického stínění jsou používány materiály s vysokou permeabilitou. Čím je hodnota  $\mu$  štítu vyšší, tím více je elektromagnetické záření absorbováno. Absorpci tedy dochází ke snížení šumu užitečného signálu a zařízení jsou lépe chráněna před magnetickou složkou záření. V praxi se stínění s vysokou permeabilitou využívá např. pro kryty mobilních telefonů, nebo jako ochrana před rušením u počítačů atd. Rovnice 7 vyjadřuje SE reflexi. V rovnici 7 představuje  $\sigma$  elektrickou vodivost, která je zmíněna v odstavci 2.1.4. Dále je zde frekvence  $f$  dopadajícího elektromagnetického záření a permitivita  $\mu$ . Pro reflexi EM vlny tedy musí mít materiál vysokou hodnotu elektrické vodivosti, permeability a zároveň dostatečnou tloušťku, aby štít mohl absorbovat více elektromagnetického záření. [10]

$$SE_R = -10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_T}{16\omega\epsilon_0\mu_r} \right) \quad (7)$$

### 2.1.4 Elektrická vodivost

Jedná se o fyzikální veličinu (označovanou symbolem  $\sigma$ ), která popisuje, jak je daný materiál schopný vést elektrický proud. Elektrická vodivost udává, jak velký elektrický proud prochází vodičem při jednotkovém napětí na jeho koncích. Zjednodušeně lze říct, že čím je hodnota  $\sigma$  vyšší, tím lépe vede materiál elektrický proud. [11] Kovy patří k materiálům s vysokou elektrickou vodivostí. Stříbro, je prvek s jednou z nejvyšších elektrických vodivostí, existují ale i další prvky, které mají velmi dobrou elektrickou vodivost, např. zlato, měď, hliník, a další. Existují faktory, které ovlivňují elektrickou vodivost. Například, v případě kovů vede zvýšení teploty ke snížení elektrické vodivosti, a roste tedy jejich rezistivita. Vodivost materiálu se mění i např. v důsledku nečistot. [12] V rovnici 8 je vyjádřena složka absorpce, kde  $t$  je tloušťka štítu,  $f$  je frekvence dopadajícího elektromagnetického záření,  $\sigma$  a  $\mu$  jsou elektrická vodivost a permeabilita štítu.

$$SE_A = 8,7t\sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (8)$$

## 2.2 Měření elektromagnetického rušení

Měření EMI lze rozdělit do podskupin, specifikovaných v následujících odstavcích. První jsou vyzařované emise (odstavec 2.2.2) a druhou částí jsou vedené emise (odstavec 2.2.7).

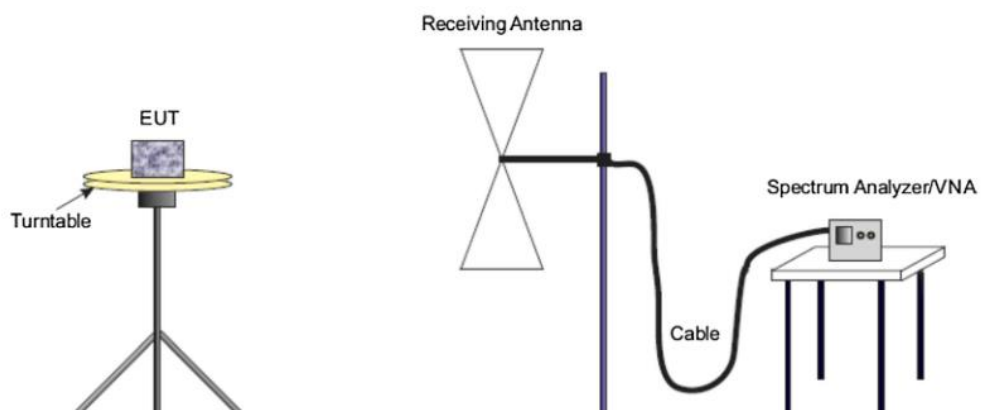
### 2.2.1 Testování emisí

Každý elektronický přístroj vyzařuje do svého okolí elektromagnetické záření. Mezi hlavní přístrojové komponenty, které jsou zdrojem emisí, patří například napájecí kabely, odpory, kondenzátory atd. Emise z těchto zdrojů záření mohou dosahovat až do pásma GHz. Emise se dále dělí na vyzařované emise a na vedené emise. Z tohoto důvodu je nutné, aby všechny nově vyvíjené elektrické přístroje byly testovány na EMC a bylo tak jednoznačně určeno, zda splňují příslušné závazné normy. [13]

### 2.2.2 Vyzařované emise

Jedná se o elektromagnetické vlny, které se volně šíří prostorem. Zdrojem jsou počítače, rádia či televize, kromě toho se může jednat i o průmyslové znečištění nebo vysílání rádiových signálů. O eliminaci těchto negativních vlivů je potřeba uvažovat už při samotném návrhu zařízení. Řešení spočívá např. ve vhodném uspořádání součástek, použití filtrů či ve vyhovujícím krytu. Vyzařování tohoto druhu je nutné, co nevíce potlačit, aby dané přístroje nerušily ostatní zařízení v okolí.

Testování se provádí na kmitočtech od 30 MHz do 1 GHz. Jednou z nejpoužívanějších metod pro měření větších zařízení je testování na otevřeném zkušebním místě (obrázek 3). Testovací prostory mají většinou volný výhled směrem k obloze a zajišťují minimalizaci rušení od okolních budov. Měření se skládá z teoreticky nekonečné vodivé desky, přijímací antény, měřeného zařízení a přijímače EMI. Přijímací anténa je většinou vzdálena od měřeného zařízení 3 nebo 10 m. [13] V začátcích testování byla vzdálenost až 30 m, ale nebylo možné zajistit podmínky pro správnost měření. V současné době je zvažována testovací vzdálenost 5 m, avšak tato vzdálenost ještě není standardizovaná. EMI je generováno jak pro vertikální, tak pro horizontální polarizaci. Vyhodnocení měření je prováděno tak, že se přijatá intenzita pole porovná s maximální povolenou intenzitou, která je specifikována normou. [13]



Obrázek 3 - Pracoviště pro testování vyzařovaných emisí [13]

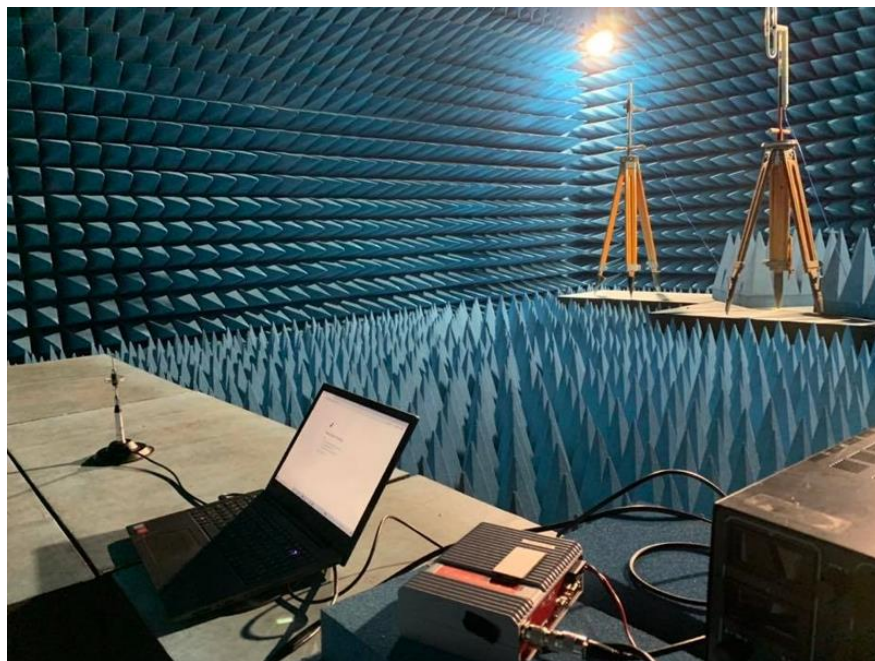
### 2.2.3 Bezodrazová komora

Jedná se o prostor, který je elektromagneticky stíněný a má potřebné rozměry pro vhodné umístění antén. Tyto komory se používají z toho důvodu, protože je obtížné nalézt vhodné pracoviště na volném prostranství. Bezodrazová komora je pokryta absorpčními materiály. Komora s pokrytím stěn, podlahy i stropu je nazývána plně bezodrazovou komorou (Anechoic Chamber). Tato komora simuluje volný neomezený prostor. Jestliže je v komoře pokryt strop, stěny, ale nikoliv podlaha, jedná se částečně bezodrazovou komoru (Semi-anechoic Chamber). S touto konfigurací absorpčních materiálů komora simuluje volné měřicí prostranství, ale projeví se zde odrazy od zemnicí roviny. Konstrukce bezodrazové komory je velmi nákladná. Absorpční materiály totiž musí být kvalitní a musí pokrývat například i dveře a různé větrací otvory. Rozměry těchto materiálů se odvíjejí od požadovaného kmitočtového pásma, ve kterém bude v komoře probíhat měření. V plně bezodrazové komoře musí být na podlaze buď vyztužené absorpční materiály umožňující chůzi či umístění přístrojů nebo se podlaha překlene malými chodníčky. Na obrázku 5 je bezodrazová komora, kde jsou vidět právě zmíněné

chodníčky, na kterých je buďto umístěno vybavení, nebo se zde dá chodit. Celá komora je pokryta polyuretanovými absorpčními materiály, které jsou na obrázku 4. [14]



Obrázek 4 - Polyuretanový absorpční materiál

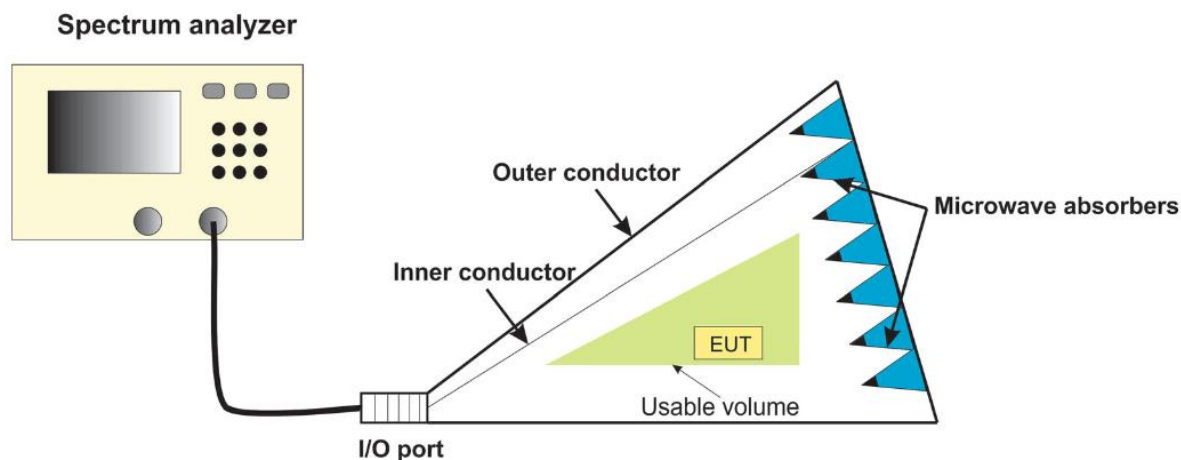


Obrázek 5 - Bezodrazová komora

#### 2.2.4 GTEM komora

Komory typu TEM (z angl. Transversal-ElectroMagnetic) jsou na vysokých kmitočtech nedokonale impedančně přizpůsobené a s tím je spojen i vznik nežádoucích rezonancí. Proto vznikla měřicí komora typu GTEM (z angl. Gigahertz-Transversal-ElectroMagnetic). Na obrázku 6 je zobrazen princip komory. Tato komora má tvar do pyramidy. Jedná se o rozšiřující se úsek koaxiálního vedení. Charakteristická impedance  $Z_0$  je po celé délce

konstantní  $50 \Omega$ . Širokopásmovost této komory zajišťují absorpční jehly na delší straně komory. [13]



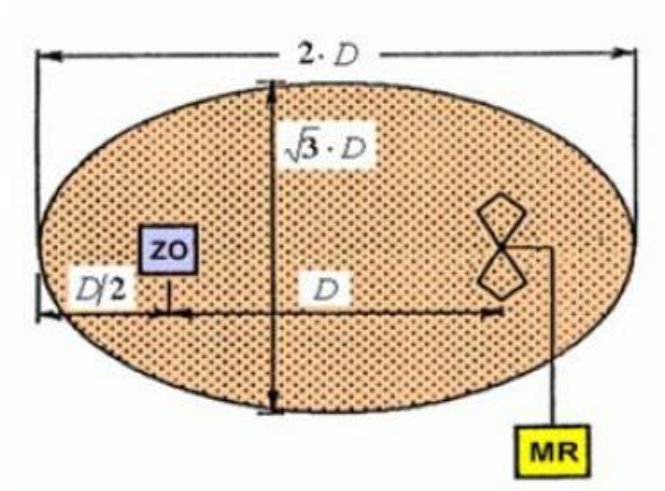
Obrázek 6 - GTEM komora [13]

### 2.2.5 OATS

Jedná se o jednu z nejběžnějších metod pro testování vyzařovaných emisí. Zkratka OATS v českém překladu znamená testovací pracoviště na otevřeném prostranství (z angl. Open Area Test Site). Tato pracoviště jsou konstruována v Evropě tak, aby byla v souladu s aktuálně platnými normami. Jedná se například o normu ČSN 50561-1. Na obrázku 7 je názorně ukázané pracoviště a na dalším obrázku 8 jsou popsány parametry, které by pracoviště mělo splňovat. Vzdálenost, která je mezi anténou a testovacím zařízením (EUT, z angl. Equipment Under Test) je obvykle volena 3, 10 nebo 30 m. Tato vzdálenost je důležitá hlavně kvůli měření intenzity vzdáleného pole. Jestliže se vzdálenost zkrátí z 10 na 3 m dojde ke zvětšení intenzity elektrického pole signálu EUT. Kdyby se na vzdálenost nebral zřetel a přiblížilo se k poli blízkému, mohlo by se stát, že elektrické pole ještě nebude stabilní a s tím je spojena nepřesnost měření. [15] [16]



Obrázek 7 - OATS pracoviště z webu EMC FastPass



Obrázek 8 - Minimální doporučené parametry měření na volném prostranství [14]

### 2.2.6 Používané antény pro měření rušení

Aby bylo možné pokrýt celý frekvenční rozsah musí se při měřeních používat více různých antén. Měření rušivých polí má význam až na vysokých kmitočtech (od 300 MHz). Nejběžnější typy antén, které se používají jsou uvedeny v tabulce 1. [15] Ve frekvenčním pásmu od 9 do 150 kHz je rušení většinou způsobováno jen magnetickou složkou pole. Pro měření v tomto pásmu se využívají hlavně smyčkové antény, které mají maximální rozměr  $60 \times 60$  cm. Elektrické rušivé signály se měří prutovou anténou (=monopólem), který má doporučenou délku 1 m. Na obrázku 9 je ukázána bikónická anténa, jejíž konstrukce je dipól s kónickým rozšířením, který slouží pro rozšíření frekvenčního využitelného pásma.

Docílit přesnějšího měření intenzity elektrického pole  $E$  je možné použít symetrický dipól, který má malé rozměry, a navíc umožňuje určit směr. [14]



Typ antén	Frekvenční rozsah
Smyčková	10 kHz – 30 MHz
Bikónická	30 MHz – 300 MHz
Logaritmicko-Periodická	300 MHz – 1 GHz

Tabulka 1 - Typy antén



Obrázek 9 - Bikónická anténa [17]



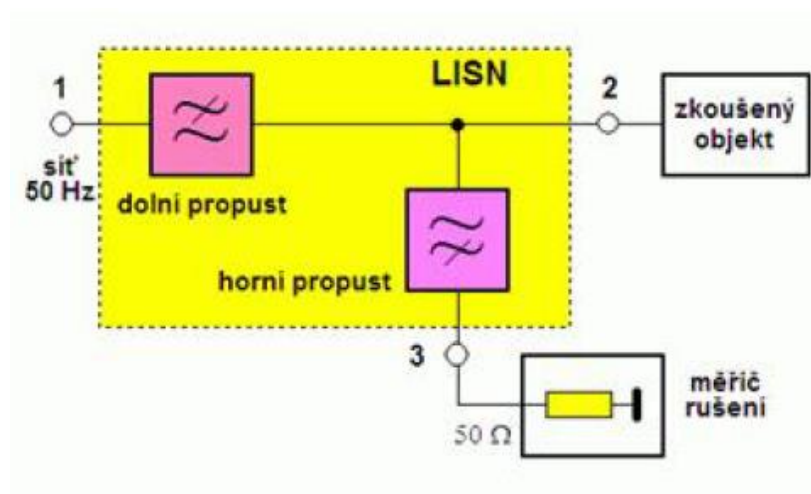
Obrázek 10 - Logaritmicko-periodická anténa [17]

## 2.2.7 Vedené emise

Vedené emise se šíří po vodičích (napájecí kabely, datové linky). Tato metoda je nezbytná pro to, aby bylo možné určit šum, který se generuje v důsledku změny proudu nebo napětí v obvodech. Tento šum je vyzařován skrz zmíněné kabely do zařízení. Zanedbáním tohoto druhu emise by mohlo dojít k nevratnému poškození zařízení. Metody pro testování vedených emisí jsou: umělá zátěž LISN, proudová sonda, napěťová sonda, absorpční kleště. [13]

## 2.2.8 Umělá zátěž LISN

Tato metoda je využívána k měření rušivých signálů, které vznikají z elektrické sítě. Umělá síť (LISN, z angl. Line Impedance Stabilization Network) je na obrázku 11 zvýrazněna žlutým obdélníkem. Je složena ze tří částí. Svorka 1 je zde pro připojení vnějšího napájení, svorka 2 pro připojení zkoušeného objektu a poslední svorka 3 je pro připojení měřiče rušení. Umělá síť splňuje dané funkce: Připojení měřiče rušení ke zkoušenému objektu v celém rozsahu měřených frekvencí. Na schématu, které je znázorněno na obrázku 11 jako horní propust. Dále zajišťuje to, že na vstup měřiče rušení se dostanou jen signály rušivé, které jsou ze zkoušeného objektu nikoliv z vnějšího napájení. Díky dolní propusti se nedostanou rušivé signály ani ke zkoušenému objektu a tím pádem nejsou výsledky měření ovlivněny. Jako poslední funkci zajišťuje síť impedanční přizpůsobení. Jak je znázorněno na obrázku 11 u svorky 3, jedná se většinou o hodnotu impedance  $50 \Omega$ . Není to však nutně pravidlem, normy předepisují hodnoty pro různá kmitočtová pásma. [14]



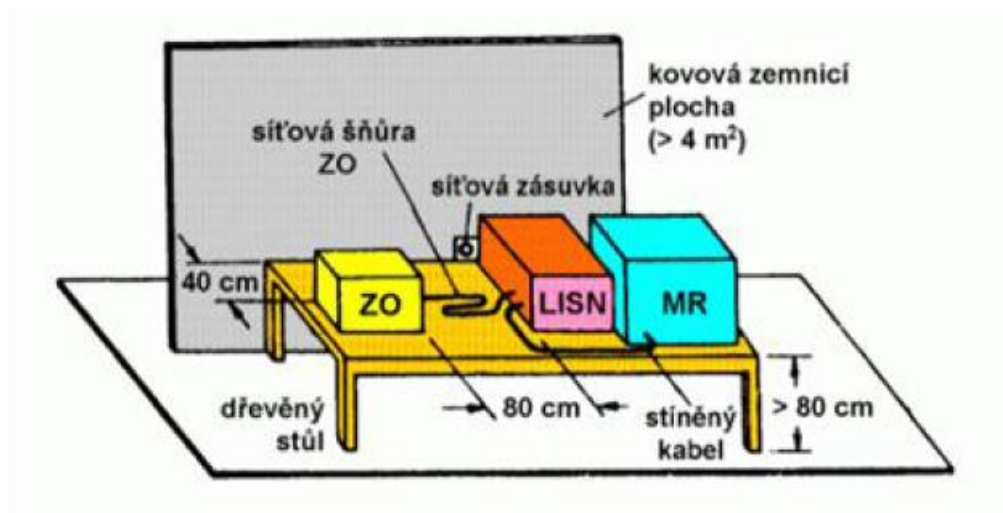
Obrázek 11 - Blokové schéma sítě LISN [14]

Každé měření elektromagnetického rušení musí být reprodukovatelné, aby bylo možné kdykoliv toto měření zopakovat. Proto je nutné dodržovat dané uspořádání pracoviště, které je specifikováno mezinárodní normou EN 61000-4-3. Obrázek 12 ukazuje základní uspořádání



pracoviště s umělou zátěží LISN v pásmu 10 kHz až 30 MHz. Jak je z obrázku 12 patrné zkoušený objekt, umělá síť i měřič rušení je na jednom stole. [18]

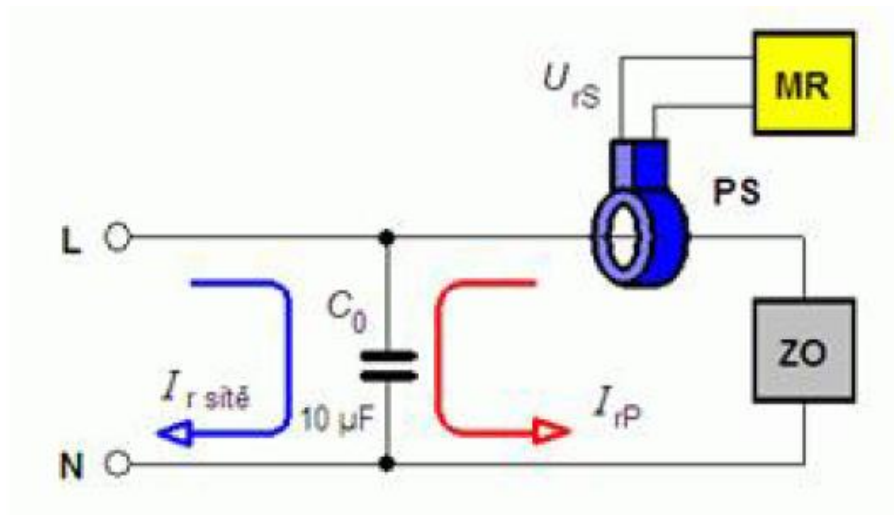
Protože je umělá síť umístěna mezi měřič rušení a zkoušený objekt, je možné zanedbat šum, který je způsobený zdrojem střídavého proudu. Je tedy zajištěna stabilní impedance na jedné frekvenci. Podle normy CISPR 25, 2010 je pak měřeno šumové napětí. [19] Do hodnoty 100 MHz tato metoda poskytuje přesné výsledky. Pro vyšší frekvence už však tuto metodu použít nelze.



Obrázek 12 - Zapojení s umělou zátěží LISN [14]

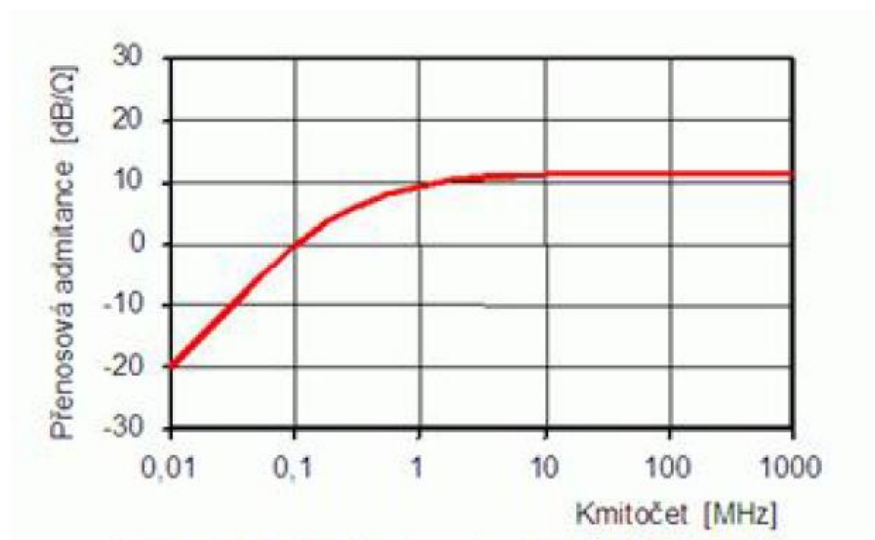
### 2.2.9 Proudová sonda

Proudovou sondou se měří rušivý proud protékající vodičem, aniž by se musel přerušit. Jak dané měření probíhá je zobrazeno obrázku 13. Sonda je tvořena z feritového toroidního jádra, které je rozdělené na dvě části z důvodu, aby bylo možné kleště rozevřít a vodič vložit mezi tyto dvě půlky. Jakmile se kleště uzavřou kolem zkoumaného vodiče, rušivý proud, který protéká vodičem je převeden na napětí. Toto napětí je přivedeno na měřič rušení. V obrázku obvodu s proudovou sondou je zobrazen zkratovací kondenzátor, který je zde z důvodu eliminace rušení z napájecí sítě do proudové sondy a dále tento kondenzátor uzavírá vysokofrekvenční cestu rušivého proudu, který je generován zkoumaným objektem a zamezuje tomuto proudu vniknout dále do napájecí sítě. Jedná se tedy o stejnou funkci, kterou plní v umělé síti LISN horní a dolní propust. [14]



Obrázek 13 - Proudová sonda [14]

Přenosová admitance  $Y_T$  je základním parametrem proudové sondy, typicky v jednotkách (dBS) nebo ( $\text{dB}/\Omega^{-1}$ ). Kmitočtová závislost je zobrazena na grafu, který je na obrázku 14. Z charakteristiky je patrné, že na nízkých kmitočtech přenosová admitance klesá, tím pádem je nejnižší pracovní frekvence dán poklesem její citlivosti pod přípustnou mez. Zvýšení citlivosti lze docílit velkým počtem závitů a použitím feritového jádra s vysokou permeabilitou. [14]

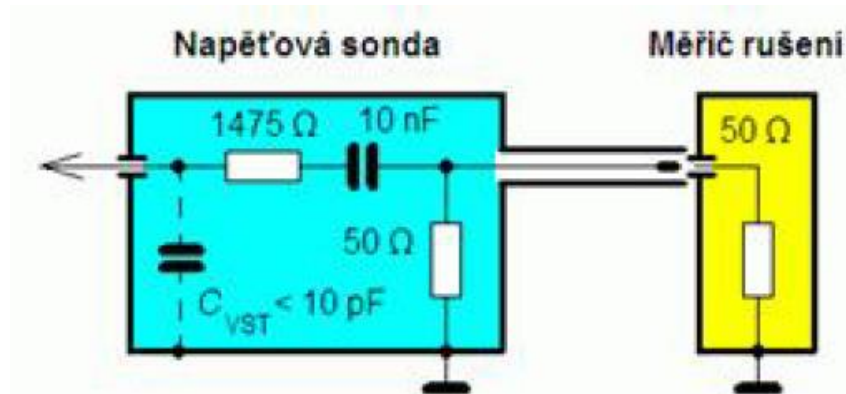


Obrázek 14 - Kmitočtová charakteristika admitance [14]

### 2.2.10 Napěťová sonda

Napěťová sonda se používá mimo napájecí svorky nebo tam, kde nelze měřit rušivé signály sítě LISN. Výhoda napěťové sondy spočívá v tom, že jí lze připojit kdekoliv na zkoumaný objekt, takže se využívá hlavně pro diagnostiku, či v průběhu vývoje zařízení. Jelikož má sonda velkou vstupní impedanci, používá se u měření rušivých signálů ve vysokofrekvenčních obvodech,

protože kdyby se použila síť LISN, zbytečně by svou impedancí zatěžovala obvod. Na obrázku 15 je schéma zapojení napěťové sondy s měřičem rušení. [14]

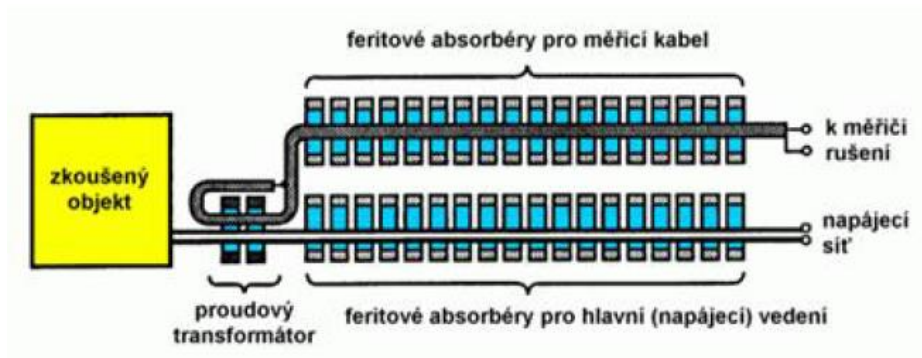


Obrázek 15 - Zapojení napěťové sondy [14]

### 2.2.11 Absorpční kleště

Absorpční kleště se skládají z vysokofrekvenční proudové sondy a feritového absorbéru, který slouží jako přizpůsobená zátěž. Kleště se používají ve frekvenčním pásmu od 30–1000 MHz pro měření výkonu rušivého signálu. Tento rušivý výkon je vyzářen připojenými vodiči ke zkoušenému zařízení, jedná se např. o napájecí vedení.

Konstrukce absorpčních kleští obsahuje proudovou sondu, která je popsána v odstavci 2.2.9 a zajišťuje daný rozsah kmitočtů. Dále jsou zde feritové absorbéry, kterých je přibližně 60. Tyto kroužky jsou jak kolem zkoušeného objektu, tak i kolem měřicího kabelu. Zmíněné kroužky kolem zkoušeného kabelu jsou v zapojení kvůli funkci širokopásmového absorbéru výkonu rušivého signálu, dále také jako stabilizátor vysokofrekvenční impedance kabelu. Feritový rukáv, který je kolem měřicího kabelu, je zde kvůli omezení nežádoucího vysokofrekvenčního proudu, který teče po povrchu do měřiče rušení. Jak absorpční kleště mohou být zapojené ukazuje obrázek 16. [14] [20]



Obrázek 16 - Konstrukce absorpčních kleští [14]

## 2.3 Testování odolnosti zařízení

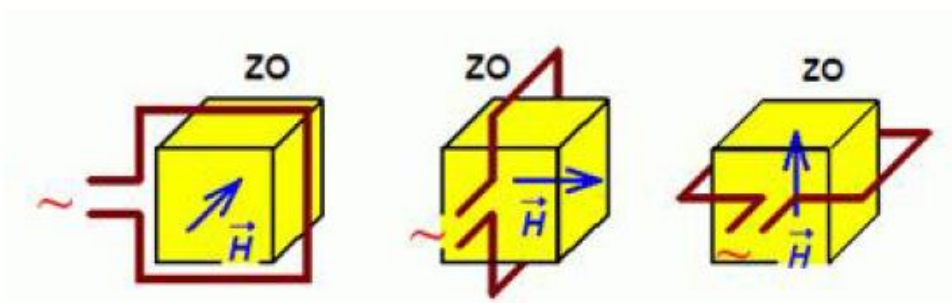
Jedná se o opak zmíněného testování emisí. Jak bylo popsáno dříve u testování emisí bylo měřeno rušení, který dané zařízení vyzařovalo. Zde se jedná o testování odolnosti zařízení, které je vystaveno elektromagnetickému záření. Následně se pak zkoumá, jestli se chování zařízení nějakým způsobem změnilo vlivem okolních podmínek, či nikoliv. Jestliže zařízení vykazuje jakékoliv známky změn chování, porovnávají se tyto změny s aktuálně platnými normami, zda daný přístroj ještě splňuje svým chováním předpisy či již nikoliv. Pokud přístroj neprojde při testování platnými normami, není jeho schopnost efektivní funkce v reálném světě zaručena. [13]

### 2.3.1 Kontinuální testování odolnosti

Kontinuální testování je zaměřeno na to, zda kontrolované zařízení bude fungovat správně podle předpisů, když bude vystaveno kontinuálním zdrojům rušení jako je například sluneční záření, rozhlasové stanice, motorová vozidla, či kosmické mikrovlnné záření. Toto testování obvykle trvá několik minut. Kontinuální testování odolnosti lze dále rozdělit do třech kategorií, které jsou popsány v odstavcích 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4. [13]

### 2.3.2 Magnetické pole

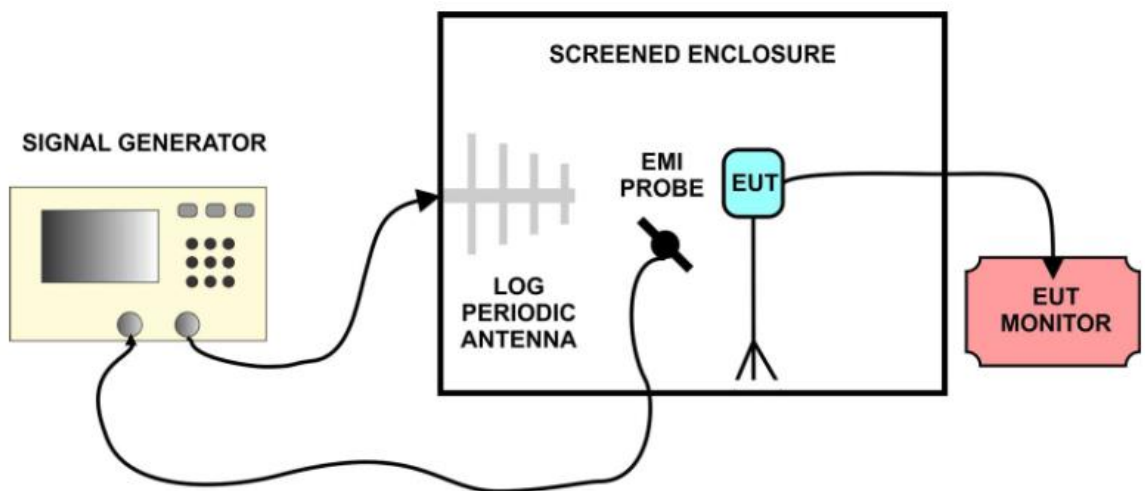
Kabely a různé vodiče elektrických přístrojů mohou do okolí vyzařovat magnetické pole a tím rušit citlivé součástky jako jsou například relé nebo přístroje v blízkém okolí. Proto je důležité ověřovat, zda dané zařízení odolá magnetické složce vyzařování. Norma IEC/EN61000-4-8 je nejrozšířenější pro testování nepříznivých vlivů magnetického pole. Základem zapojení u tohoto testování je rámová anténa, která vytváří v okolí přístroje magnetické pole. [21] Jedná se například o jednozávitovou indukční cívku, Helmholtzovu cívku nebo velkou jednoúčelovou indukční cívku. Obrázek 17 ukazuje některé příklady, měření vlivu rušivého magnetického pole zkoumaného objektu. [13]



Obrázek 17 - Zkoušení malého objektu cívku [14]

### 2.3.3 Testování odolnosti vyzářeným magnetickým polem

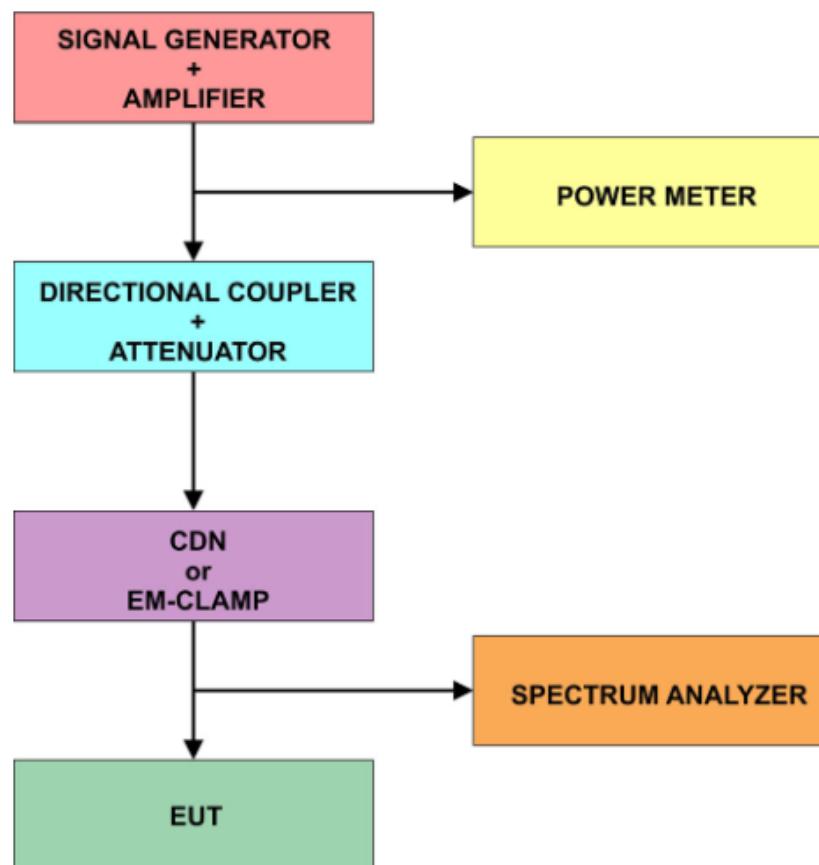
Toto testování se provádí kvůli posouzení tolerance přístroje vůči elektromagnetické energii v jeho blízkosti. Norma IEC 61000-4-3 je nejběžnější a nejvíce využívaná pro toto testování. Nejčastěji se testování provádí ve volném prostoru (OATS), v bezodrazových komorách atd. Na obrázku 18 je vidět základní zapojení pracoviště. V levém zapojení je vysokofrekvenční generátor, který dodává do obvodu neustálý elektromagnetický signál na různých frekvencích, dále výkonový zesilovač, logaritmicke-periodická anténa, která přenáší signál od zdroje do komory, sonda, která v komoře měří EMI, stůl, na kterém je testované zařízení a systém, který monitoruje stav zkoumaného zařízení. Vzdálenost mezi anténou a zkoušeným objektem je obvykle 3 nebo 10 m. [22] Měřené zařízení se otáčí k vysílací anténě a posuzuje se jeho chování na různých frekvencích s proměnlivou silou a mění se i polarizace. [13]



Obrázek 18 - Pracoviště pro testování odolnosti vyzářeným magnetickým polem [13]

### 2.3.4 Testování odolnosti vedeným magnetickým polem

V důsledku ohýbání a deformace síťových kabelů mohou vznikat vyzařované emise, které zachytí kabely a konektory zařízení a tím vzniká vysokofrekvenční napětí a proud v zařízení. Právě tyto proudy se dále mohou šířit jako vedené emise do zařízení a způsobit zhoršení funkčnosti celého systému. Jedním z nejrozšířenějších uznávaných standardů pro testování odolnosti vedeným magnetickým polem je IEC-61000-4-6. Toto testování se provádí v rozsahu 150 kHz – 80 MHz. Blokované schéma testování je zobrazeno na obrázku 19. Prvním blokem je vysokofrekvenční generátor se zesilovačem, který simuluje rušivé signály. Signály jsou následně přivedeny k měřenému zařízení s ohledem na zemnicí plochu přes spojovací síť. Výkon zařízení je následně posuzován pomocí spektrálního analyzátoru nebo obdobných přístrojů. [23] [13]



Obrázek 19 - Blokový diagram pro testování odolnosti [13]

## 2.4 Metody eliminace elektromagnetického rušení

Jestliže přístroj neprojde některým z výše uvedených testů EMI, lze tyto nepříznivé vnější vlivy různými způsoby snížit a tím i lépe daný přístroj přizpůsobit na situace v reálném prostředí. Toto stínění lze rozdělit do 4 podkapitol, které budou rozepsány níže. Jedná se o elektromagnetické stínění, filtraci, modifikaci zapojení a rozptřeni spektra. Nejrozšířenější technikou, která redukuje EMI je stínění, protože v dnešní době patří kryty s funkcí stínění k designu většiny zařízení. [13]

### 2.4.1 Elektromagnetické stínění

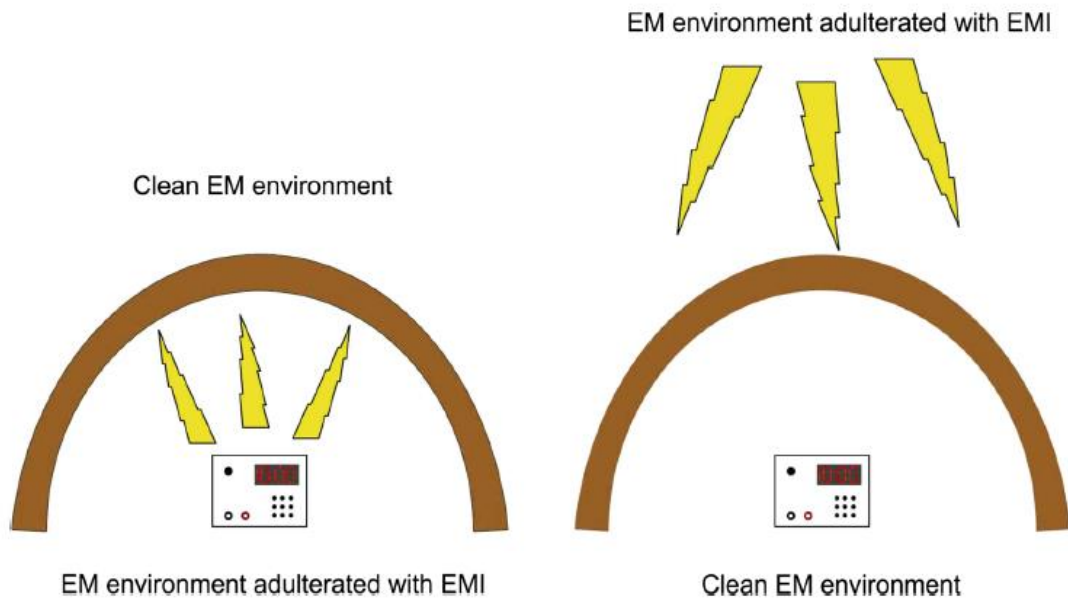
Jednou z nejpopulárnějších metod redukce rušení je stínění pomocí štítu EMI. Nejčastěji je v roli štítu EMI kryt, šasí či konstrukční box zařízení vyrobené z elektricky vodivých materiálů, například kovů, vodivých polymerů, či feritů. Tyto materiály, které obklopují daný přístroj velmi dobře tlumí rušivý signál. Když je na přístroji kryt, který má zamezit tomu, aby nebylo vyzařováno elektromagnetické záření, nebo aby přístroj v krytu nebyl rušen jiným signálem, musí se určit, kolik signálu kryt pohltí, případně odrazí. Ideálně je přenesena pouze nepatrná část. Proto se v praxi mluví o účinnosti stínění konstrukce, což je poměr mezi



elektromagnetickým výkonem před stíněním k elektromagnetickému výkonu po stínění a tato veličina je vyjádřena v decibelech, viz rovnice 9. [7]

$$SE = 10 \log \left( \frac{P_{rx}}{P_{rx'}} \right) \quad (9)$$

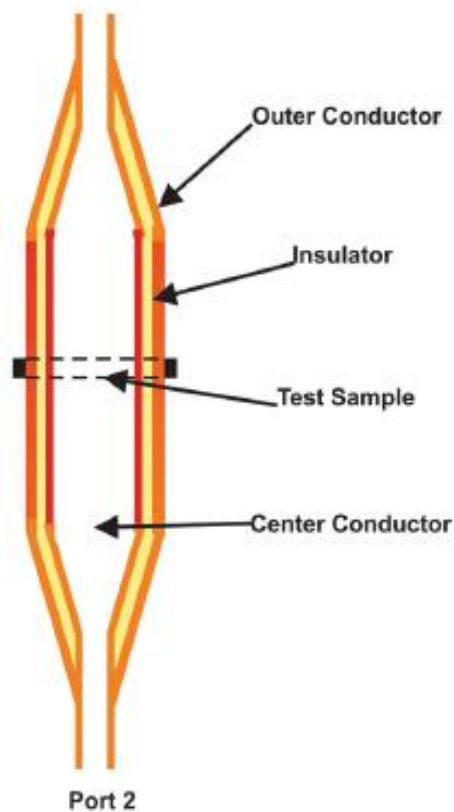
V rovnici 9 vyjadřuje čitatel výkon, který zachytí přijímač, aniž by byl přístroj opatřen krytem. Ve jmenovateli je poté výkon, který zachytí přijímač, jestliže je mezi vysílač a přijímač vložen kryt. Obrázek 20 ukazuje, jak je buď zabráněno vnějším signálům v prostupu k danému zařízení nebo signál, který přístroj vyzařuje není vyzářen do prostoru. [13]



Obrázek 20 - Elektromagnetické stínění přístroje [13]

#### 2.4.2 Měření účinnosti stínění – koaxiální přenosové vedení

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod pro měření efektivity stínění. Jednou z velkých výhod této metody je fakt, že při použití dané metody v různých laboratořích se po porovnání docílilo stejných výsledků. Tato metoda navíc ještě dokáže rozložit data do složek absorpce, reflexe a transmise. Na základě této techniky byly vyvinuty 2 standardy, ASTM ES 783 a ASTM D493510. Podle první zmíněné metody je zkoumaný vzorek vložen doprostřed tubusu, který je na koncích zúžen a zakončen  $50 \Omega$  impedancí. Průměr vnitřního a vnějšího rádia zařízení se shodují s průměrem zkoumaného vzorku, které jsou 4,35 a 9,9 cm. Princip této metody je ukázán na obrázku 21. [4] [13]



Obrázek 21 - Koaxiální přenosové vedení [13]

### 2.4.3 Měření účinnosti stínění – obdélníkový vlnovod

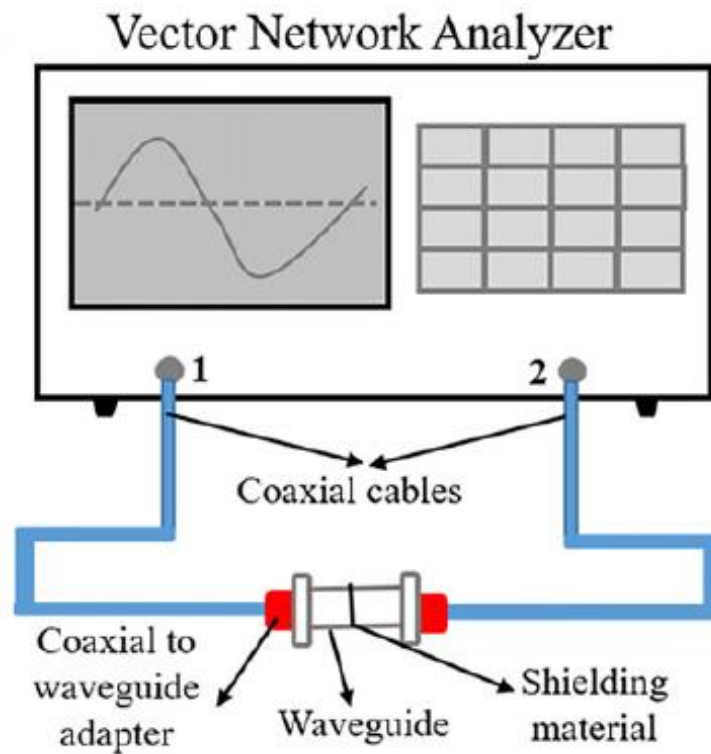
Tento typ měření účinnosti byl navrhnout jako náhrada koaxiálního přenosového vedení. Stejně jako u koaxiálního přenosového vedení se měřený vzorek musí vytvarovat podle daného vlnovodu. Jednou z velkých výhod tohoto měření je, že přechodový odpor nehraje hlavní roli při výpočtech odrazů nebo přenosových charakteristik. Chyba nastává tehdy, když se vzorek vloží mezi půlky vlnovodů, kde vzniká vzduchová mezera. Po porovnání vlnovodové a koaxiální metody je mezera mezi vzorkem a vlnovodem víc zanedbatelná u vlnovodné metody než u koaxiální metody. Při volbě vlnovodu a jeho velikosti, lze tímto měřením pokrýt široké spektrum, ve kterém lze účinnosti stínění sledovat. [13]



Obrázek 22 - Různé druhy vlnovodů [7]



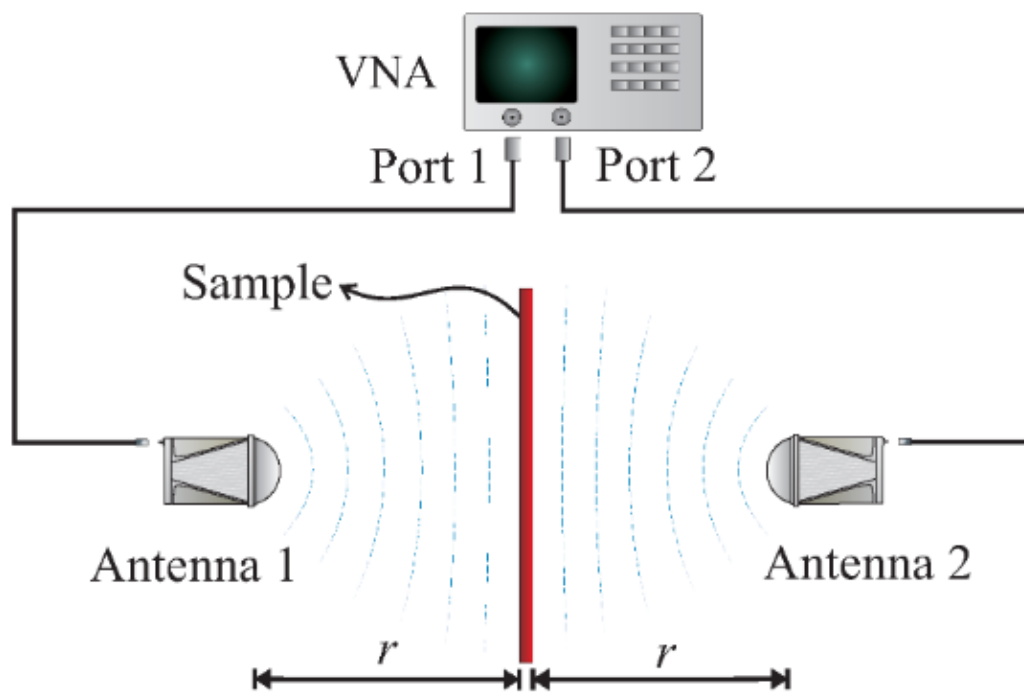
Na obrázku 23 je nastíněné pracoviště, které ukazuje, způsob měření vlnovodem včetně vektorového síťového analyzátoru (VNA, z angl. Vector Network Analyzer), který měří s-parametry. K VNA jsou pomocí koaxiálních kabelů připojeny půlky vlnovodů. Mezi vlnovody je vložen vzorek, který je třeba změřit.



Obrázek 23 - Měření pomocí vlnovodu [13]

#### 2.4.4 Měření účinnosti stínění – test ve volném prostoru

Další metodou měření účinnosti stínění je testování ve volném prostoru. Měří se vyzařované emise, které jsou vyzářeny z měřeného zařízení. Základem tohoto měření je volné prostranství, které minimalizuje odrazy signálu a rušení. Jedná se o relativně spolehlivou a přesnou metodu pro měření účinnosti stínění. Tato metoda je založena na dvou trychtýřových anténách, které jsou nastaveny proti sobě a zkoumaný objekt je mezi nimi, jak je znázorněno na obrázku 24. Metoda je vhodná spíše pro měření na vyšších frekvencích, lze však použít i na frekvence nižší, ale je zde limit velikosti vzorku. Výhoda metody volného prostoru je, že se získají hodnoty reflexe a transmise, aniž by musel být kontakt s měřeným vzorkem, což je nejlepší pro tenké vzorky. [24]



Obrázek 24 - Metoda volného prostoru pro měření účinnosti stínění [25]

#### 2.4.5 Rozdílový režim

Rozdílový režim (DM, z angl. Differential Mode) vzniká mezi dvěma vodiči, které jsou v blízkosti a signály se v nich šíří v opačných směrech, viz obrázek 25. Může být způsoben nesprávnou impedancí kabelu nebo špatným zapojením. Rušení DM v elektronických zařízeních je měřeno například pomocí diferenciálního osciloskopu, který dokáže měřit rozdíl mezi signály na obou vodičích. Toto rušení je přiváděno přes vstupní vedení do rozvodné sítě. Mohou však být použity i jiné přístroje jako např. spektrální analyzátor, který umožní rozklad signálu na frekvenční složky a měření jejich amplitud v různých frekvenčních pásmech. Při DM jsou signály na každém vodiči vůči zemi stejně velké, ale mají opačnou polaritu. Takže jestliže je na jednom vodiči kladná polarita na druhém bude záporná. Při přenosu signálu jsou vodiče použity jako páry a signál se získává z jejich rozdílu. Problém nastává tehdy, když jsou signály na vodičích stejně velké a jejich polarita je také stejná, tím pádem se mohou stát zdrojem rušení. Jako ochrana proti těmto rušením se používají filtry. Například se jedná o diferenciální režimové filtry, které pracují na principu blokování rušivých signálů v rozdílovém módu. Filtry pro potlačení rušení jsou složeny z kondenzátorů a cívek. [26] [27]



Obrázek 25 - Rozdílový režim [28]

### 2.4.6 Společný režim

Společný režim (CM, z angl. Common Mode). U tohoto typu rušení signály prochází dvěma vodiči, které mají stejný směr šíření, jak je vidět na obrázku 26. Mají však stejně velkou amplitudu a jsou ve fázi. Vznik tohoto rušení je v důsledku parazitních impedancí indukovaných v obvodu kvůli nežádoucím poklesům napětí. Tato situace nastane, když proud uniká přes rozptylovou kapacitu nebo indukčnost a vrací se zpět do napájecího vedení. Jestliže se tyto rušivé signály odstanou na výstup obvodu, jsou vyzářeny do okolí a působí negativními vlivy na zařízení. Obdobně jako u režimu rozdílového jsou tyto vlivy potlačovány filtry. [13] [29]



Obrázek 26 - Společný režim [28]

### 2.4.7 Filtry rozdílového a společného režimu

Jak DM, tak CM potřebují k odfiltrování jiné techniky. Z tohoto důvodu se do obvodů zavádějí oddělovače rušení, aby byly nejprve tyto režimy separovány, než se začnou filtrovat. Jeden z prvních článků, který stanovil teorii o filtrování, byl představen v roce 1964 panem

Schlickem, který navrhnul keramický úzký dolnofrekvenční filtr a sloužil ke zmírnění rušivých signálů. Tyto filtry měly výhodu v jednoduchosti na výrobu a měly lepší odezvu na vyšších kmitočtech. O této době bylo vynaloženo hodně úsilí, aby se redukce rušení ještě více zlepšila. V roce 2006 byl vyvinut filtr, který se skládal ze smyčky s vysokou permeabilitou pro potlačení společného rušení a dále dvě malé smyčky s nízkou permeabilitou pro potlačení společného rušení. Další filtr, který byl navržen pro potlačení obou typů rušení byl představen v roce 2010 panem Mailettem a jeho spoluautory. Jednalo se o snížení EMI v motorových pohonech, které byly napájeny stejnosměrně. Tento filtr byl složen ze dvou kapacit DM a z jedné kapacity CM pro obejití šumu vzhledem k nízké impedanci spolu s jednou vysokoimpedanční tlumivkou CM s feritovým jádrem. Tímto rozložením filtru bylo možné snížit rušení ve škále od 8 až do 18 dB. Dále byl například vyvinut aktivní rozdílový filtr pro zesílení korekce AC/DC převodníku. Tento typ filtru byl schopen snížit elektromagnetické rušení v rozsahu 30–35 dB. Kabely jako jsou například HDMI, DisplayPort jsou tvořeny kroucenými páry, kde je fáze signálu převrácena o 180°. Tato metoda umožňuje vysokorychlostní přenos dat. V praxi by jakákoliv nerovnováha v komunikačních charakteristikách dvou signálových linek mohla způsobit rušení ve CM a kabel by mohl fungovat jako anténa a vyzařoval by rušivý signál. Z tohoto důvodu se používají filtry společného režimu (CMFs), které jsou založeny na principu tlumivek. [13] [30]

#### **2.4.8 Rozšíření spektra**

Hodinový generátor s rozprostřeným spektrem byl použit pro eliminaci EMI v digitálních obvodech. Autoři, kteří se podíleli na této metodě se zaměřili hlavně na hodiny, které se používaly v obvodech, protože jsou hlavním přispěvatelem nežádoucích signálů kvůli jejich vysoké frekvenci. V rozprostřeném spektru se akumulovaná energie nachází v úzkém pásmu, které se rozprostírá v širším pásmu pomocí frekvenční modulace. Díky této technice se hodnota špičkové energie snižuje, což vede k menší pravděpodobnosti generace EMI. [13]

### **2.5 Používané materiály pro elektromagnetické stínění**

Ke stínění se používají různé typy materiálů jako jsou například kovy, uhlíkové materiály, polymery a další. Jednou z hlavních vývojových cest je stínění pomocí kompozitů (kombinace několika, často fyzikálně i chemicky velmi odlišných materiálů). Kovy a uhlíkové materiály jsou v tomto odvětví dominantní kvůli své vysoké vodivosti a s tím související dostupnosti volných elektronů pro interakci s elektrickým polem záření. Keramické stínění je obvykle méně efektivní, ale ionty v něm také dokážou interagovat s elektrickým polem záření. SE moderní keramiky typu MXenů je však velmi vysoká. Pro stínicí materiály je důležité, aby je bylo možné vyrábět s požadovanými parametry (např. chemickými, mechanickými, elektrickými) a snadno

formovat do požadovaného tvaru. Kompozitní materiály patří z hlediska obtížnosti výroby a zpracování k velmi efektivním materiálům. [31]

### 2.5.1 Funkční a strukturální materiály

Materiály používané pro EMI stínění mohou být rozděleny do dvou kategorií na: a) funkční a b) strukturální materiály. Funkční materiály pro EMI stínění jsou v aplikacích využívány zejména pro svoji schopnost absorbovat či reflektovat záření. Může se jednat například o keramické plnivo na bázi MXenu, které je přidáváno do polymerní matrice zařízení, či uhlíkový ochranný nátěr. Strukturální materiál plní zpravidla více funkcí. Slouží jako materiál schopný stínit EMI a zároveň například jako konstrukční materiál zařízení. Příkladem může být například kovové šasi přístroje. [31]

### 2.5.2 Kovy

Kovy jsou vysoce elektricky vodivé a mohou EMI absorbovat, reflektovat i transmittovat. Hlavním důvodem, proč se kovy používají v mnoha aplikacích je jejich schopnost vést elektřinu a teplo. U elektrických zařízení, kde dochází k velkému hromadění statické elektřiny nebo u vysokorychlostních strojů, kde se hromadí teplo, jsou používány ochrany uzemněné kovovými vodiči, aby byly tyto nežádoucí stavy eliminovány a rozptýleny. Podobným způsobem je zabráněno vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému záření v průniku k danému zařízení, neboť je právě tímto krytem zabráněno průniku nežádoucích rušících signálů do přístroje. Běžný materiál, který se používá pro stínící skříně je slitina s vysokou permeabilitou. Jedná se o 14 % železa, 5 % mědi, 1,5 % chromu a 79,5 % niklu. [4]



Obrázek 27 - Stínící slitinový materiál [32]

### 2.5.3 Uhlíkové materiály

Mezi uhlíkové materiály patří grafit, grafen, uhlíková vlákna a uhlíkové nanotrubičky. Tyto materiály jsou elektricky vodivé, a velmi dobře absorbují elektromagnetického záření v širokém frekvenčním rozsahu. Různé druhy již zmíněných uhlíkových materiálů mají odlišnou vodivost, strukturu, morfologií a také se liší cenově. [33] Jedním ze zajímavých typů grafitu je exfoliovaný grafit (=grafen). Ten se získává exfoliací (=odlamováním), kdy se používá tepelná sublimace. Při této metodě se grafit zahřeje na vysokou teplotu, po které se grafit odpařuje a vzniká grafen. Z grafenu se dalšími úpravami získává plát ohebného grafitu. Díky jeho vlastnostem se dá docílit účinnosti stínění až 130 dB. Mezi další zajímavé vlastnosti pružného grafitu patří například nízký koeficient tepelné roztažnosti, vysoká tepelná vodivost. [31]

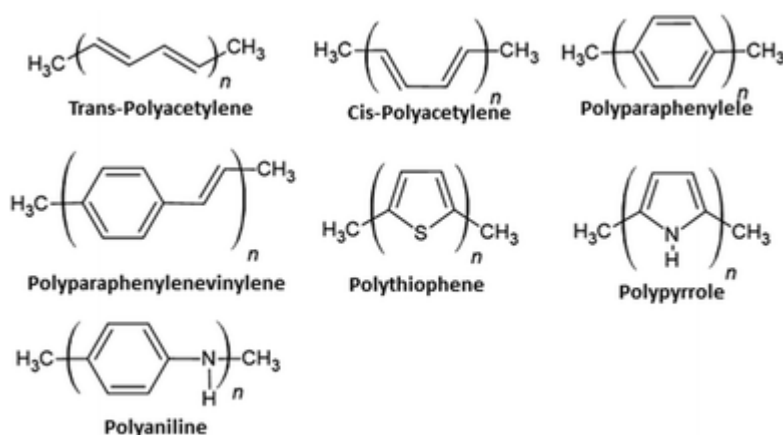


Obrázek 28 - Pružný plát grafitu [34]

### 2.5.4 Polymery

Elektromagnetické stínění je závislé na mnoha faktorech, které byly zmíněny v podkapitole 2.1. Klíčovými parametry pro stínící materiál jsou elektrická vodivost a permeabilita. Speciální typ polymerů, tzv. vodivé polymery, otevírají nové možnosti v oblasti stínění, protože v sobě kombinují vysokou elektrickou vodivost kovů s mechanickou pružností organických látek. Vodivé polymery (angl. Conducting Polymers, zkráceně CP) jsou zajímavé z hlediska své vysoké elektrické vodivosti, které získají v přítomnosti dopantů (ionty organických či anorganických látek). Jodem dopované polyacetyleny mají velmi vysokou elektrickou vodivost ( $1.7 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ). Tyto materiály mají srovnatelnou elektrickou vodivost s vybranými kovy.

Vzhledem k dobrým výsledům elektrické vodivosti byly studie stínění provedeny na mnoha vodivých polymerech např. polypyrrol, polyanilin, polyacetylen. Při srovnání těchto materiálů s kovy jsou CP snadněji zpracovatelné, relativně odolné proti korozi a jejich struktura je flexibilní. Avšak mají i své nevýhody jako je například postupné praskání nebo smršťování, což může ovlivnit jejich elektrické a mechanické vlastnosti. Nejen CP, ale i klasické polymery jako je polystyren, polypropylen, polyethylen jsou zajímavé z hlediska stínících aplikací, a to díky své jednoduché zpracovatelnosti, mechanickým vlastnostem nebo chemické odolnosti. Pro EMI stínění se však používají zpravidla v kombinaci s elektricky vodivými plnivými jako kompozity. [10] [35]



Obrázek 29 - Chemické struktury vodivých polymerů [35]

### 2.5.5 Kombinace materiálů (=Kompozity)

V současné době je vysoký zájem o přípravu kompozitních materiálů pro EMI stínění. Kompozitní materiály jsou totiž schopny vzájemně kombinovat vlastnosti svých komponent a vytvářet tak materiály s vysokou SE, mechanickou i chemickou stabilitou, vysokou tepelnou vodivostí a mnoha dalšími vlastnostmi. Jedná se zpravidla o elektricky vodivá plniva na bázi CP, uhlíku, oxidů či nanočástic kovů a magnetických feritů a mnoha dalších v polymerních maticích. Množství elektricky vodivého plniva je v matici zpravidla velmi nízké (jednotky hm.%); příliš velké množství vodivého plniva vede ke ztrátě mechanických vlastností kompozitu. [35]

### 2.6 Ohebná elektronika

V blízké budoucnosti lze očekávat, že role elektroniky napříč obory dále poroste. Velký význam nabývá zejména integrace elektroniky s biologickými systémy (buňkami, tkáněmi či organismy) a to zejména v oblasti zdravotnictví a vojenství, či v oblasti biotechnologií.

Důležitou vlastností elektroniky v těchto aplikacích je zejména biokompatibilita a flexibilita. Novým výzkumným odvětvím je v této oblasti elektronika inspirovaná kůží, která využívá nových generací materiálů s podobnými vlastnostmi jako má biologická kůže. Patří mezi ně například schopnost uzdravování (self-healing), snadná roztažitelnost či biologická odbouratelnost. [36]

### 2.6.1 Pružné senzory a displeje

Ve srovnání s tranzistory vyžaduje výroba senzorů obvykle nižší nároky na použité technologie. Mechanicky roztažitelné senzory byly úspěšně realizovány již před několika lety a jsou běžně používány pro monitorování srdeční frekvence, pohybu a zvuku. Roztažitelné senzory jsou většinou založeny na principu piezoe kapacitního nebo piezoresistivního efektu. Některé senzory jsou citlivé na mechanické namáhání typu zkrut či ohyb. Dále se objevují zmínky o vyvíjení dalších typů roztažitelných senzorů, které mohou být využitelné pro různé další odvětví, kde bude možné takovéto materiály používat. Odporové pružné senzory jsou potažené nanotrúbkami na povrchu. Jakmile je takový senzor namáhaný tlakem, např. přiložením prstu na takovýto senzor, jeho odpor v místě kontaktu se snižuje. [36]



Obrázek 30 - EKG senzory [37]

Displeje jsou zásadní pro zobrazování informací naměřených senzory. Displeje jsou tvořeny prvky, které vyzařují světlo. Jedním z displejů, který je velmi rozšířený je LCD (z angl. Liquid Crystal Display). Tento typ na začátku používaly například kalkulačky, hodinky nebo měřicí přístroje. Avšak tento typ se pro ohebné displeje nepoužívá. V dnešní době jsou velmi důležité displeje na bázi tzv. elektronického papíru, který je na obrázku 31 a je známý také pod názvem e-ink. Konstrukčně se velmi liší od již zmíněného LCD, který pro svou funkci vyžaduje podsvícení. Princip tohoto zobrazovacího média je elektroforéza. Jedná se o pohyb elektricky nabitých molekul v elektrickém poli. Výhodou flexibilního elektrického papíru je v tom, že má např. velice nízkou spotřebu energie, vysoké rozlišení z jakéhokoliv úhlu, čitelnost na přímém

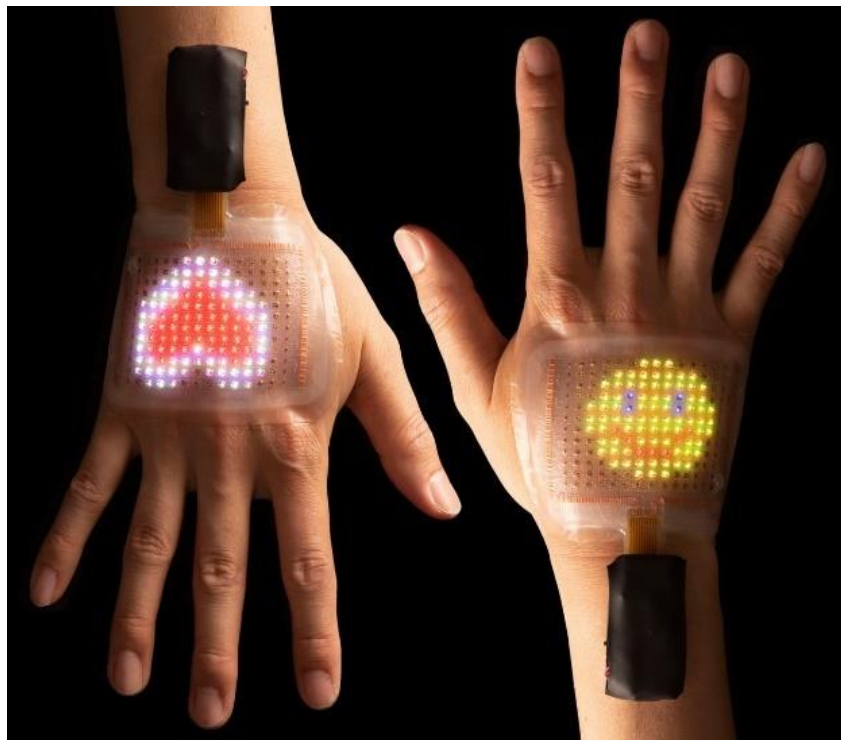


slunci, oči se neunavují tolik jak u klasického koukání do monitorů a displeje jsou vysoce flexibilní. Tato technologie má však i své nevýhody, jako je např. nízká rychlost spínání, není možné přehrávat videa a jsou elektrochemicky složité. [38]



Obrázek 31 - Flexibilní elektronický papír [38]

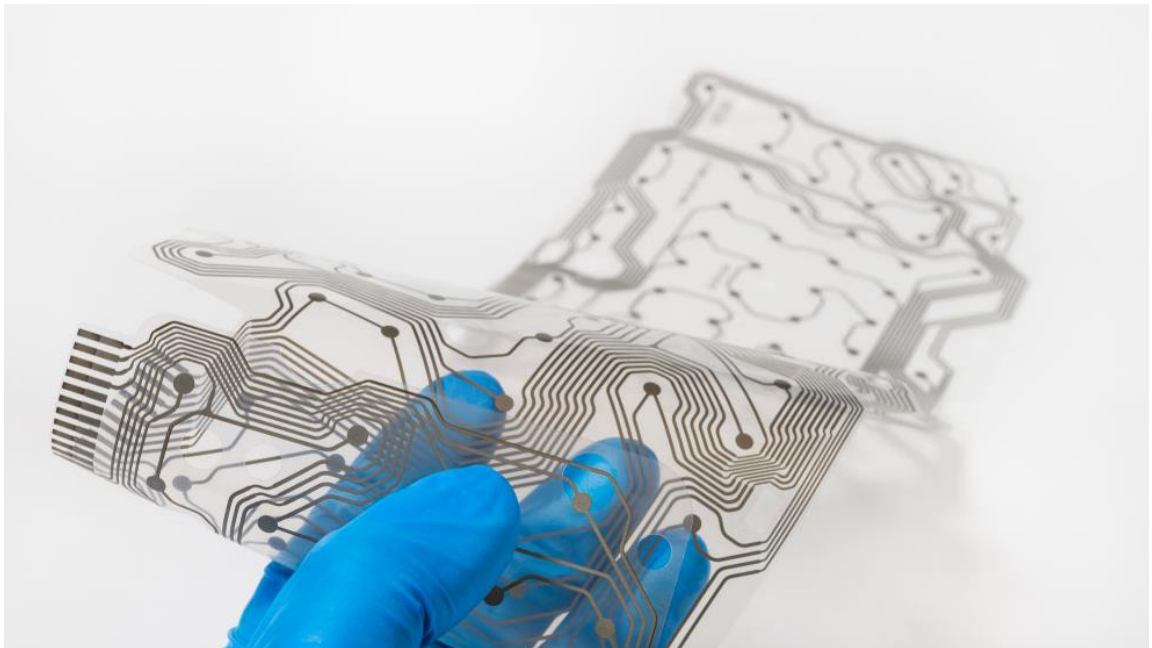
Další ze skupiny zobrazovacích technologií je OLED (z angl. Organic Light-Emitting Diode). Tyto displeje lze tisknout na relativně tenké a pružné substráty. [39]



Obrázek 32 - OLED pružný displej [39]

### 2.6.2 Pružný rezistor

Existuje velké množství druhů rezistorů, např. drátové, SMD, vrstevné, potenciometry, reostaty a další. Jsou dělené jak hodnotou, tak i svojí velikostí a každý projekt využívá jiné typy rezistorů. Tento odstavec je však zaměřen na pružné rezistory. Jak už je z názvu patrné, hlavní rozdíl mezi normálním rezistorem a pružným je v jeho schopnosti mechanického ohybu. Když se pružný rezistor začne ohýbat či deformovat, mění hodnotu svého odporu. Této vlastnosti se využívá v mnoha oblastech jako jsou např. senzory, nositelná elektronika, robotika, biomedicína. Senzory využívající změny odporu s mechanickým namáháním měří různé fyzikální veličiny jako je např. tlak, deformace či poloha. U nositelné elektroniky slouží pružné rezistory v zařízeních pro měření pohybu, monitorování srdečního tepu a dalších. Výhodou je, že se dají přizpůsobit tvaru lidského těla, takže jsou pohodlné a snímání je daleko přesnější. [40]



Obrázek 33 - Pružná PC RAM [40]

### 3 Praktická část

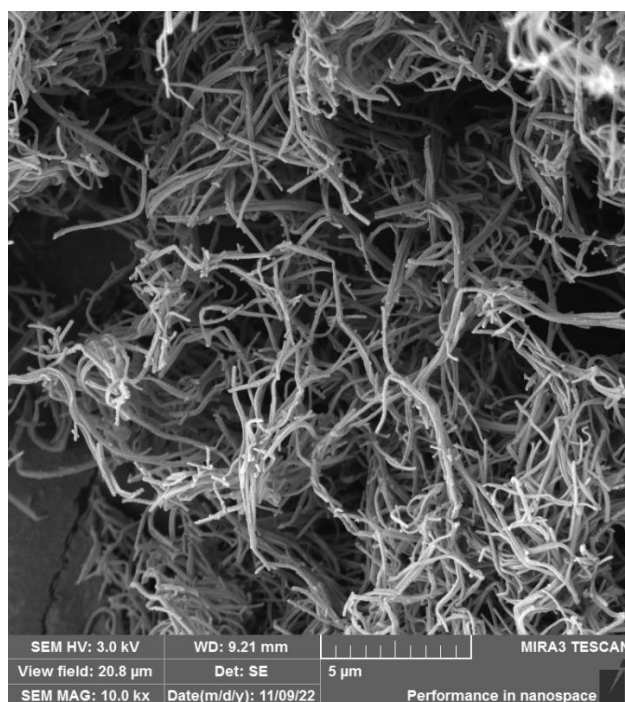
V této části je popsán experiment včetně použitého vybavení a metodiky zpracování výsledků. Dále jsou zde porovnány různé techniky kalibrace a měření rozptylových parametrů štítů EMI, které byly v průběhu experimentu testovány.

#### 3.1 Použité materiály

V následujících odstavcích jsou blíže specifikovány materiály, ze kterých byly vyrobeny testovací štíty EMI. Jejich SE byla následně vyhodnocována z naměřených rozptylových parametrů.

##### 3.1.1 Polypyrrolové nanotrubky

Polypyrrolové nanotrubky (PPy-NT) jsou supramolekulární struktury elektricky vodivého polymeru polypyrrolu. Jedná se o trubičky s jedním z rozměrů v řádu  $10^{-9}$  m, které mohou být vytvářeny více způsoby a každý postup má své výhody i nevýhody. Metoda, kterou byly připravovány nanotrubky pro toto měření je založená na syntéze polypyrrolu z monomeru pyrrolu v prostředí methyloxalanu. Methyloxalan slouží jako pomocný materiál a pyrrol je reaktant oxidovaný chloridem železitým. Látky se smíchají v určitém poměru (molárně 1 : 1 či 1 : 2,33) a následnou chemickou reakcí se vytvářejí nanotrubky. Jednou z hlavních vlastností nanotrubek je vysoká elektrická vodivost, čehož se využívá např. u tranzistorů. Další velmi důležitou vlastností je to, že jsou mechanicky velice pevné a pružné. [41]



Obrázek 34 - Snímek PPy-NT z elektronového mikroskopu, zvětšení 10 000×

### **3.1.2 Expanded Graphite**

Exfoliovaný grafitový prášek, též jen grafitový prášek, je vytvářen z čistých přírodních grafitových vloček. Tyto grafitové vločky jsou smíchávány s vysoce oxidační kyselinou a vzniká interkalační sloučenina. Tato sloučenina se při vysokých teplotách rozšiřuje. Výsledné rozšířené grafitové šnůry jsou lisované do grafitových fólií bez jakýchkoliv plniv a tato fólie se následně rozemele na prášek, což je výsledný expandovaný grafit. Podle toho na jak velké části fólie se mele má expandovaný grafit různé velikosti. V expandovaném grafitu jsou zachovány vlastnosti přírodního grafitu, jako je dobrá vodivost, nezávadnost a šetrnost k životnímu prostředí. Tento prášek je vodivý a je použit tam, kde je potřeba tepelná nebo elektrická vodivost, např. tepelně vodivé plasty, lepidla, tmely atd. [42]

### **3.1.3 Vulcan Carbon**

Materiál Vulcan Carbon je určený k tomu, aby dodal elektrickou vodivost plastovým a gumovým směsím. Jedná se o materiál, který je výjimečně čistý, tudíž má velmi nízký obsah síry, popela a dalších nečistot. Díky svým vodivým vlastnostem se Vulcan Carbon používá již mnoho let v různých odvětvích. Typickými aplikacemi, kde se tento materiál používá jsou např. nemocniční podlahy, tiskové válce, stínění kabelů, vodivý papír. Vulcan Carbon se používá, protože na splnění vodivostních požadavků není třeba velké množství příměsí těchto sazí. [43]

### **3.1.4 Carbon Pearl**

Tento materiál je vodivý a má velice jemné částice. Jedná se o saze, které se používají pro aplikace, kde je zapotřebí vysoká vodivost a dobré fyzikální vlastnosti. Carbon Pearl má lepší elektricky vodivé vlastnosti než jiné materiály ze skupiny sazí jako např. Vulcan XC-72. Carbon Pearl se používají tam, kde ostatní vodivé saze nespĺňují rovnováhu mezi vodivostí a specifickými vlastnostmi gumy. Carbon Pearl je možné přimíchávat s jinými sazemi a měnit vlastnosti vytvořené směsi. Jen malé množství Carbon Pearl stačí k dosažení požadovaných vodivostních nebo antistatických vlastností, aniž by se měnily gumové vlastnosti. Typické aplikace jsou např. podlahy v nemocnicích, stínění u kabelů, dopravníkové pásy atd. [44]

### **3.1.5 SuperP**

Materiál SuperP je využíván pro lithium-iontový průmysl. Tento materiál je poměrně tradiční a hojně se používá po celém světě. Jedná se o špičkovou přísadu, která je vodivá a má pozitivní vliv na cykly u baterií. Tento materiál má vysokou čistotu a používá se jako vodivá přísada v mnoha bateriových aplikacích. [45]

### 3.2 EMI štíty

Součástí experimentu byla příprava testovacích EMI štítů ve spolupráci s Vysokou školou chemicko-technologickou v Praze (VŠCHT Praha). Výhodou bylo, že jsem si celý proces vytváření vzorků mohl vyzkoušet přímo v laboratořích VŠCHT Praha. Na obrázku 35 je zobrazena laboratoř, kde se vývoj těchto materiálů uskutečňoval.

Vzorky byly připraveny smísením elektricky vodivého plniva a elastomeru polydimethylsiloxanu (PDMS). Jako vodivá plniva posloužily různé modifikace uhlíku a vodivých polymerů. Použit byl zejména Expanded Graphite, Carbon Pearls, Vulcan Carbon, SuperP a z oblasti vodivých polymerů pak polypyrrolové nanotrubky.

Experimentální EMI štíty byly připraveny mísením 1, 2, 3, a 5 hm. % plniva v PDMS. Výsledná směs byla mechanicky homogenizována a nalita do forem o velikosti  $10 \times 15$  cm (d  $\times$  š; rozměry vhodné pro největší z použitých vlnodů) a tloušťce 1 – 5 mm. Formy se vzorkem byly ponechány ve vakuové sušárně do ztuhnutí. Vakuum snížilo množství vzduchových bublin vytvořených ve vzorku. Vzorky pro menší vlnodů byly následně vytvořeny řezem ze vzorků výchozích.



Obrázek 35 - Laboratoř na přípravu vzorků

Morfologie elektricky vodivých plniv byla studována pomocí elektronové mikroskopie. Použitým mikroskopem byl termoautoemisní elektronový mikroskop Mira 3 LMH od firmy Tescan Orsay s použitým urychlovacím napětím 3 – 15 kV v závislosti na typu plniva. Vzorky byly před vlastním měřením fixovány uhlíkovou či měděnou páskou, a pokoveny tenkou vrstvou zlata (8 nm).

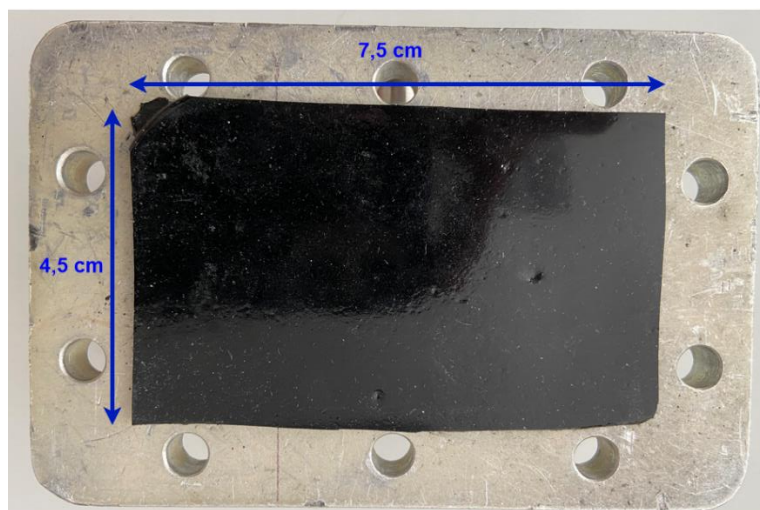


Obrázek 36 - Elektronový mikroskop Tescan

### 3.2.1 Úprava vzorků

Připravený vzorek bylo nutné řezáním přizpůsobit velikosti vlnovodu. Prvním použitým vlnovodem byl vlnovod R32, kterým se měřily nižší kmitočty (2,6 – 3,95 GHz). V dalších krocích byly postupně použity vlnovody pro vyšší frekvence, a jejich velikost se zmenšovala, takže vzorek, který byl na začátku upraven podle prvního vlnovodu se dále rozřezával na stále menší části tak, aby vešel a vznikaly co nejmenší nepřesnosti v důsledku úniku elmg. záření boky vlnovodu. Na obrázku 37 je vlnovod R32, ve kterém je vložen vzorek připravený na měření. Měřený vzorek byl uzavřen druhou půlkou vlnovodu a sešroubován. Obrázek 38 znázorňuje, jak se vzorky musely rozřezávat, aby co nejlépe pasovaly do daného typu vlnovodu, jedná se o vlnovod R140, který byl použit na nejvyšší frekvenci (12,4 – 18 GHz).





Obrázek 37 - Vlnovod R32 se vzorkem



Obrázek 38 - Vlnovod R140 se vzorkem

### 3.3 Měření vzorků

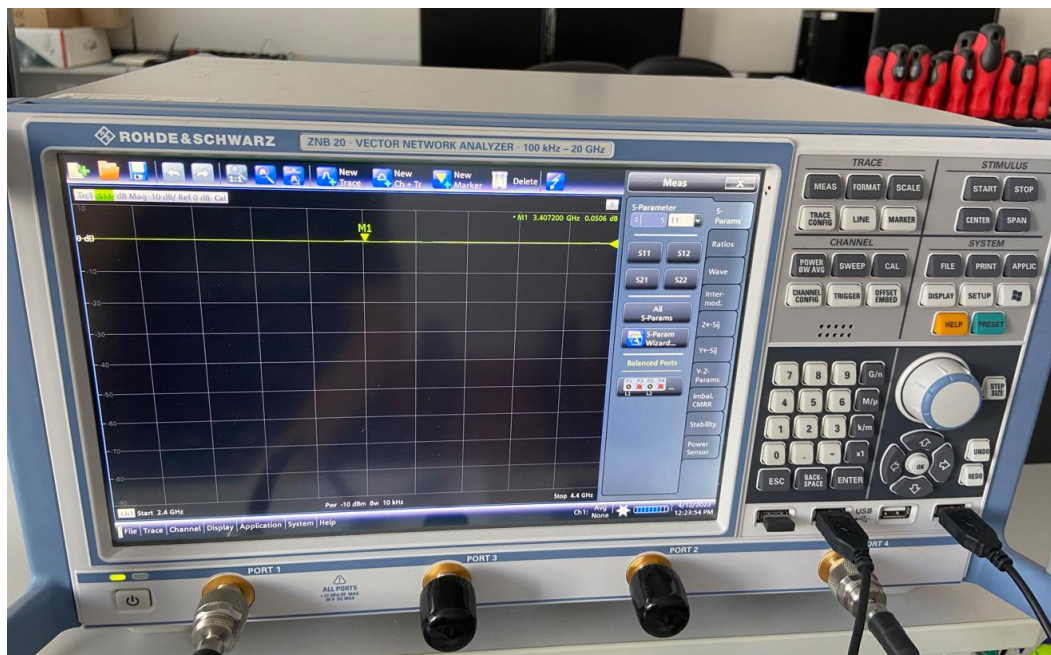
V následujících odstavcích jsou popsány přístroje, které byly použity při měření vzorků, včetně způsobu jejich nastavení a kalibrace. V neposlední řadě je zde popsán export dat a jejich formát. Tato data byla zpracována v prostředí Matlab.

#### 3.3.1 Vektorový analyzátor

Měření SE bylo provedeno pomocí VNA od německého výrobce Rohde&Schwarz. Použitý VNA byl typu ZNB 20. Má 4 porty a široký frekvenční rozsah od 100 kHz do 20 GHz. Tento přístroj měří velikost a fázi různých signálů. Skalární síťový analyzátor (SNA, z angl. Scalar Network Analyzer) v tomto případě nelze použít k měření komplexních signálů, protože umí měřit jen amplitudu signálů. VNA je proto i přes svoji vyšší cenu mnohem rozšířenější než

SNA. Ukázka VNA je na obrázku 39. Při použití VNA lze měřit komplexní s-parametry stínících materiálů, ze kterých lze následně získat informace o permitivitě, permeabilitě a celkové účinnosti stínění. Z s-parametrů lze dopočítat koeficienty reflexe a transmise stínícího materiálu. [10]

Ještě před samotnou kalibrací, která je popsána v odstavci 3.2.2 je nutné na VNA nastavit některé parametry. Jedná se o nastavení startovní frekvence, která je 2,6 GHz až do konečné frekvence 18 GHz, na tento rozsah přesně sedí vlnovody, které byly pro toto měření použity. Dále bylo nastaveno množství měřících bodů na 50 000, tyto body jsou ekvidistantně rozmístěny v celém měřicím rozsahu. Znamená to, že šířka mezi jednotlivými body je lineární a konstantní. Dále bylo nutné na VNA nastavit, které s-parametry chceme měřit a následně je ukládat. Pro toto měření byly nejdůležitější parametry  $S_{11}$  a  $S_{21}$ . Parametr  $S_{11}$  udává velikost signálu, který se odrazí zpět do vstupního portu, mluví se tedy o reflexi. Druhý parametr  $S_{21}$  udává velikost signálu, který projde skrz materiál ze vstupního portu do výstupního, tím pádem se jedná o transmisi. Z těchto dvou změřených hodnot lze následně dopočítat poslední parametr, a tím je absorpce. Jedná se o rovnici 3, která je zmíněna v odstavci 2.1.1.



Obrázek 39 - Vektorový síťový analyzátor

### 3.3.2 Kalibrace VNA

Kalibrace u VNA je velice důležitá, aby se zabránilo systematickým nebo reprodukovatelným chybám při daném měření, které např. vznikají v důsledku charakteristik měřicího systému a připojených kabelů, ke kterým jsou dále připojeny vlnovody a měřený materiál mezi nimi. Je



tedy nutné, aby po kalibraci byla referenční rovina mezi vlnovody. Jestliže kalibrace nebyla provedena nebo byla provedena špatně na obrazovce v levém horním rohu je zobrazen nápis Cal Off. Jakmile se provede správná kalibrace změní se nápis pouze na Cal. Kalibrace se v této práci používá z důvodu odečítání od naměřených hodnot, aby se eliminovaly vlivy vlnovodů, protože každý má své vlastní charakteristiky, které jsou např. fázový posun, amplituda, ztráty. Kdyby se neodečítala hodnota vlnovodu, mohly by se zanést systematické chyby do měření, a to už by nebylo správné. Dále pak kalibrace umožňuje správnou korekci odrazů a přenosu vlnovodů, protože se přenáší elektromagnetická vlna. Správnou a vhodně vybranou kalibrací byla eliminována chyba, která se projevila na začátku měření a to tak, že změřený průběh byl velice zvládný. Ještě před samotnou kalibrací je nutné zkontrolovat, jestli jsou všechny kabely dotažené, protože kdyby nebyly, je možné, že by se do měření zanášely další chyby. K dotažení všech částí, které byly připojeny k VNA se používal klíč, který je na obrázku 40.



Obrázek 40 - Momentový klíč pro správné dotažení

Jednou z kalibrací byla TOSM (z angl. Through – Open – Short – Match). Jedná se jednu z nejběžnějších kalibrací VNA. K této kalibraci je třeba kalibrační sada R&S, kde jsou k nalezení prvky pro úplnou kalibraci, obrázek 41. Po kalibraci by v ideálním případě měla být přímka v 0 dB u parametru  $S_{21}$  a u parametru  $S_{11}$  bychom se měli pohybovat pod  $-30$  dB. V tabulce 3 jsou vypsané zakončení a vlastnosti daných kalibrací, které byly využívány.

Zakončení	Vlastnosti	Ideální standard
Open	Obvod naprázdno (1 port)	$\infty \Omega$
Short	Zkratovaný obvod (1 port)	$0 \Omega$
Match	Odpovídající širokopásmové připojení (1 port)	$Z_0$
Through	Připojení portů společně (2 porty)	-

Tabulka 2 - Kalibrační sada

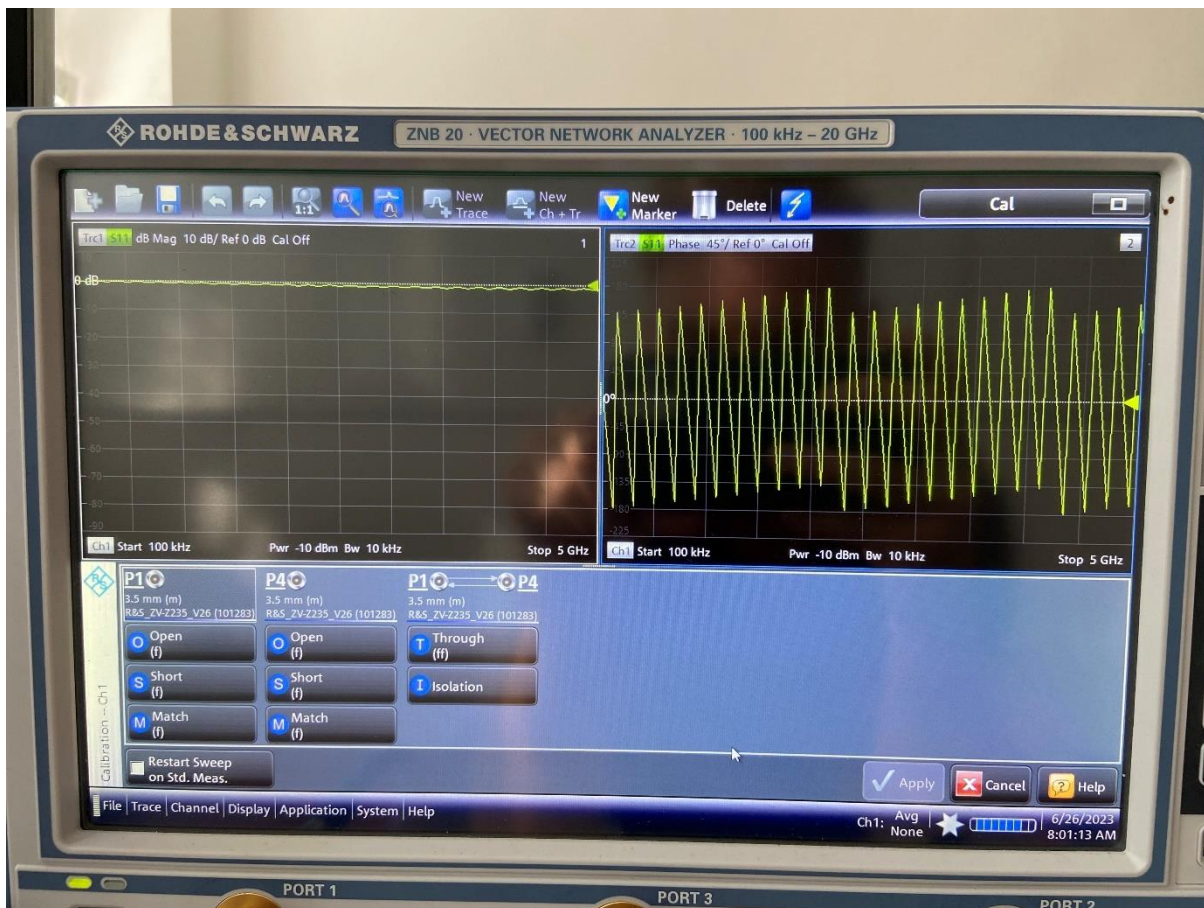
Nakonec se kalibrace TOSM prováděla rovnou s vlnovody. Při zakončení open byl nejprve na jeden port připojen vlnovod a následně zkalibrován. Poté se stejná kalibrace udělala i pro port druhý. Dále se provedla pro oba porty zvlášť kalibrace short, kdy se na připojený vlnovod přiložila vodivá deska. Předposlední byla kalibrace match. Zde vedl z jednoho portu kabel, který byl připojen k jedné části vlnovodu a na druhou půlku vlnovodu byla přišroubována přizpůsobená zátěž  $Z_0$  ( $50 \Omega$ ) a obě tyto část byly smontovány k sobě. Opět se stejný postup opakoval pro druhý port. Poslední v této kalibraci se dělala through, kde jedna část vlnovodu byla připojena na jeden port a druhá část na port druhý. Tyto půlky byly sešroubovány k sobě a proběhla kalibrace. Celá tato kalibrace se jevila jako nejvhodnější pro měření, a proto po vyzkoušení různých kalibrací byla vybrána tato jako nepřesnější a nejvhodnější. Jakmile proběhla kalibrace správně byla referenční rovina mezi vlnovody a bylo možné začít měřit vzorky.



Obrázek 41 - Kalibrační sada R&S

Jednou z dalších technik byl embedding a de-embedding. Jedná se o odstranění vlivů připojených přístrojů nebo kabelů. Embedding se používá pro simulaci připojených vodičů při měření s VNA a zaznamenávají se signálové odezvy. Tyto odezvy jsou následně použity k výpočtu charakteristik měřeného zařízení a zahrnují i vlivy připojených zařízení nebo vodičů. Naopak de-embedding je proces, který odstraňuje vlivy vodičů nebo zařízení z naměřených hodnot. Na základě známých charakteristik připojených komponent a jejich odezev signálů se vypočítají korekční faktory a ty se následně používají k odstranění vlivu připojených zařízení z naměřených dat, aby se získala přesná data testovaného vzorku bez vlivu vodičů nebo připojených zařízení. Avšak tato kalibrace se nepodařila správně nastavit, a proto se použila již zmíněná kalibrace TOSM s vlnovody.





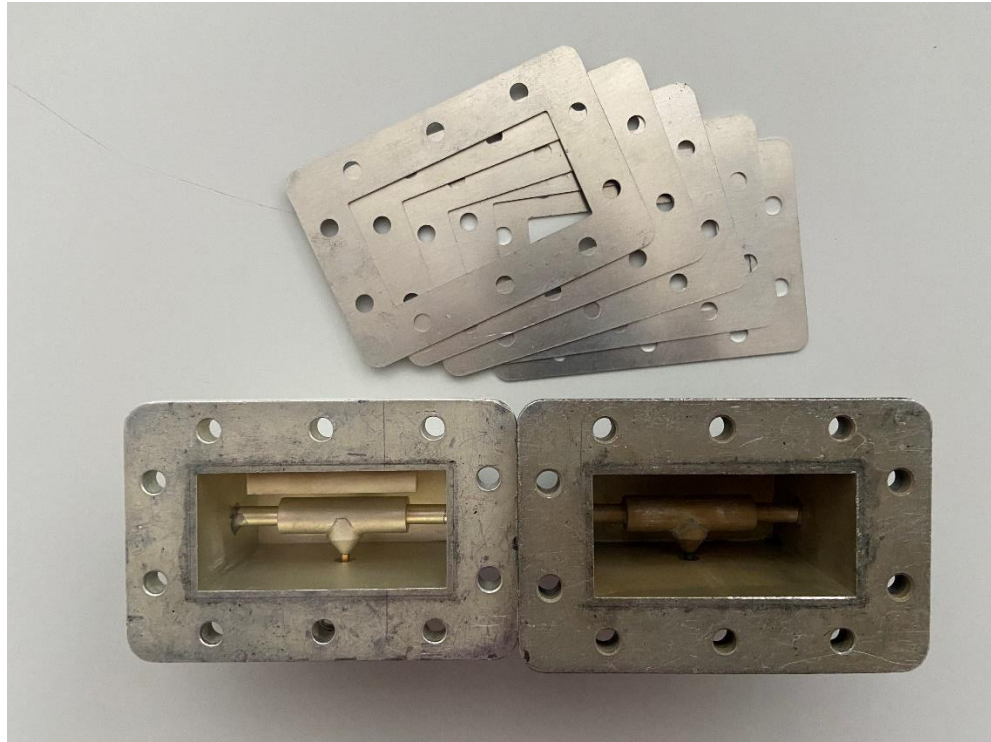
Obrázek 42 - Kalibrace VNA

Na obrázku 42 je zobrazen displej VNA, kde jsou vidět jednotlivá zakončení při kalibraci TOSM. Připojené porty byly 1 a 4 tak se kalibrace jednotlivých portů provádí zvlášť a jediná Through se dělá s oběma porty najednou. Při každém zakončení se průběh nechá projet, aby byl co nejpřesnější a klikne se na dané zakončení. Tento proces se opakuje pro všechna zakončení, která jsou na obrázku.

### 3.3.3 Vlnovody

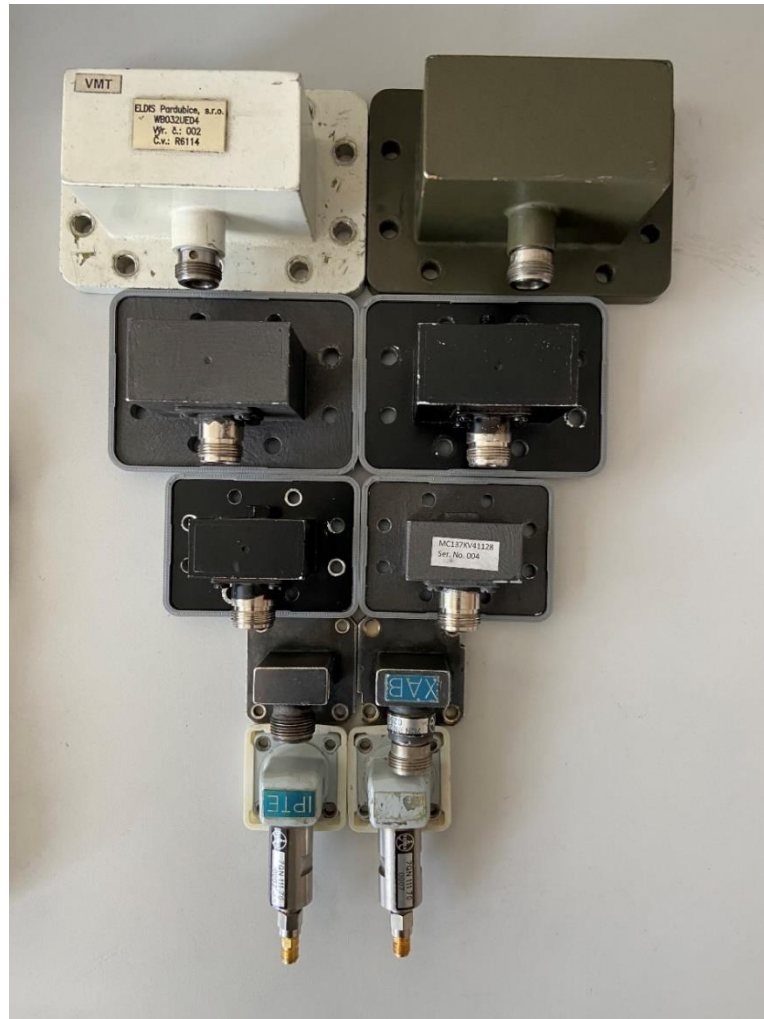
Měření účinnosti stínění se provádělo pomocí sady vlnovodů, které svým frekvenčním rozsahem plynule pokrývaly frekvence od 2,9 do 18 GHz. Nastavení tohoto rozsahu bylo z důvodu toho, že každý vlnovod má svůj definovaný pracovní kmitočtech a po výměně vlnovodu by bylo nutné kalibraci opakovat. Jelikož byl nastaven ale celý frekvenční rozsah, bylo možné si z každého průběhu vybrat jen požadovanou část a vlnovody se mohli libovolně měnit, aniž by se zasahovalo do kalibrace. Jak již bylo zmíněno v odstavci 2.4.3 v tabulce 2 vlnovody na sebe frekvenčně navazují, tudíž v ideálním případě i změřené průběhy vzorků, které jsme měli k dispozici by na sebe měly navazovat. Avšak praxe je trochu odlišná od teoretických předpokladů. Stejně jako bylo nutné kontrolovat u VNA dotažení kabelů i zde byla

tato kontrola nezbytná, protože když se mezi vlnovody vkládaly vzorky stávalo se, že jak se vlnovody pootočily i kabely se částečně povolily.

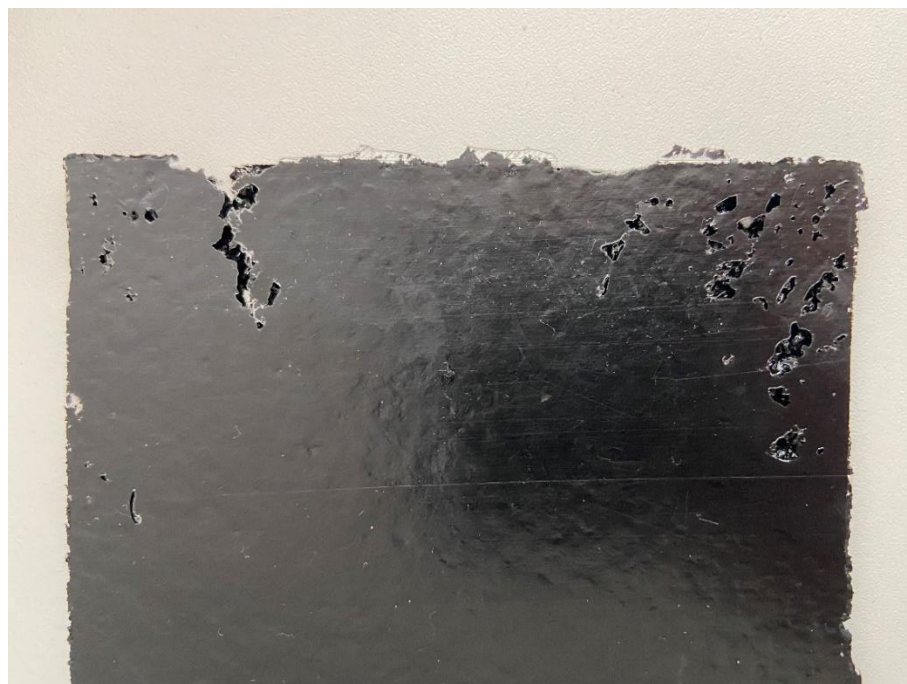


Obrázek 43 - Vlnovod R32 s hliníkovými obdélníky

U měření s vlnovody byly nejprve použity hliníkové obdélníky (obrázek 43), které byly vyrobeny s tloušťkou 1 mm a vkládaly se do vlnovodů z důvodu postranních úniků signálu. Avšak po opakování měření bez těchto hliníkových obdélníků nebyl v naměřených hodnotách rozdíl, tak se pro měření nepoužívaly. Jednalo se o to, že když by nebyly vzorky plně homogenní, tak mohly nehomogenity způsobovat únik signálu právě skrze otvory po stranách, protože vzorky měly různé tloušťky. Na obrázku 44 jsou všechny vlnovody, které byly pro měření použity. Jsou seřazené od největšího, který byl pro nejnižší kmitočty a jako poslední je vlnovod R140, který je nejmenší a měří se s ním poslední část frekvenčního rozsahu od 12,4 do 18 GHz. Následný obrázek 45 zobrazuje zmíněné nehomogenity vzorku, které by do měření mohly vnést chyby.

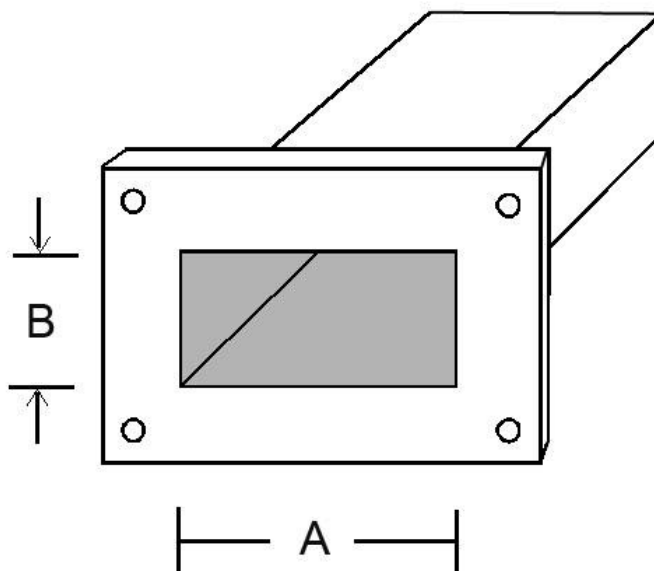


Obrázek 44 - Vlnovody



Obrázek 45 - Nehomogenity vzorku

V tabulce 2 je specifikováno několik vlnovodů, včetně frekvencí, na kterých se používají. Na obrázku 46 jsou dále znázorněny strany A a B, jejichž rozměry jsou rovněž uvedeny v tabulce 2.



Obrázek 46 - Rozměry vlnovodu [46]

Název vlnovodu	Doporučená frekvence (GHz)	Rozměr A (mm)	Rozměr B (mm)
R32	2,6 – 3,95	72,136	34,036
R48	3,95 – 5,85	47,5488	22,1488
R70	5,85 – 8,2	34,8488	15,7988
R100	8,2 – 12,4	22,86	10,16
R140	12,4 - 18	15,7988	7,8994

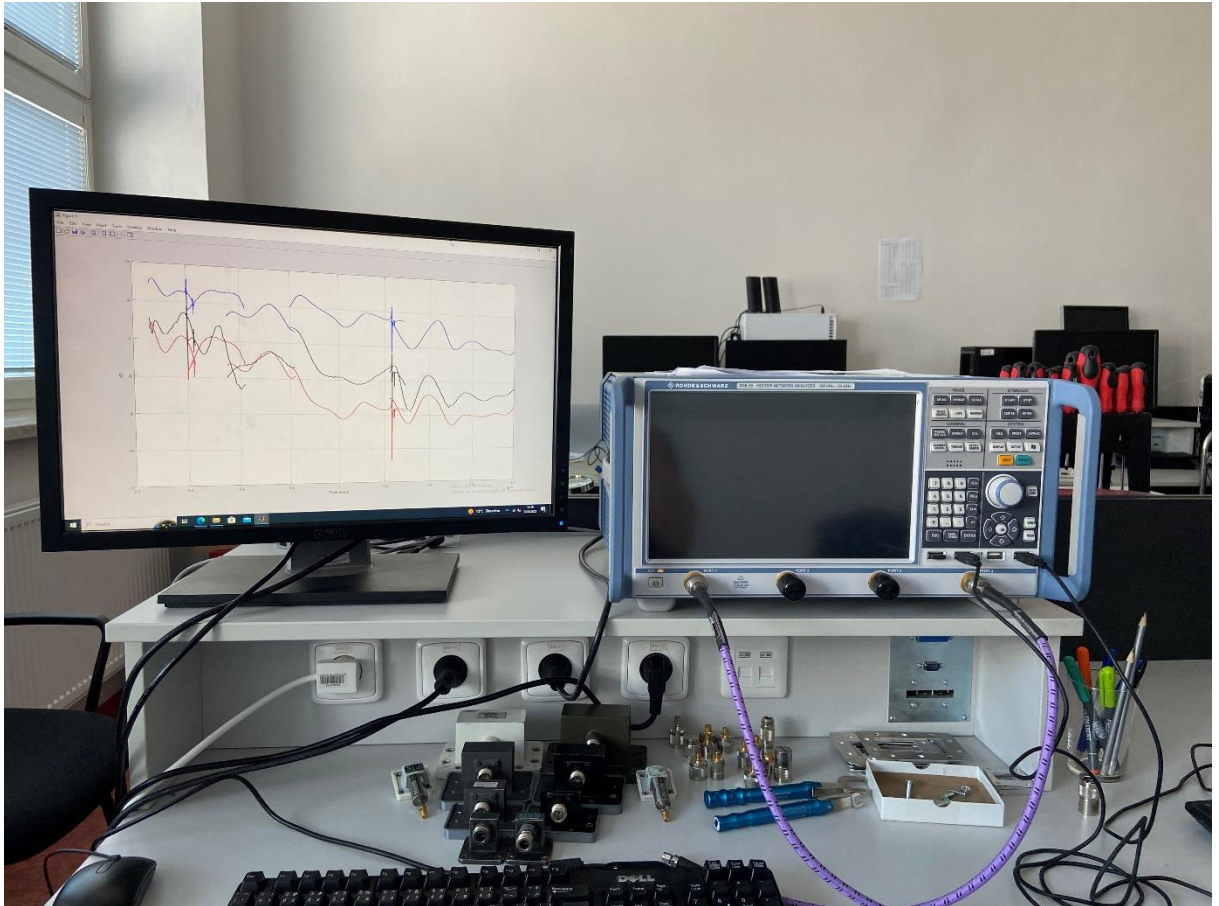
Tabulka 3 - Typy vlnovodů

Z tabulky 2 je zřejmé, že čím vyšší je pracovní frekvence vlnovodu, tím se jeho rozměry zmenšují. [46] Všechny zmíněné vlnovody v tabulce byly použity při praktickém měření vzorků.



### 3.3.4 Celé pracoviště

Na obrázku 47 je vyfotografováno pracoviště, kde se měřily vzorky a následně se hned zpracovávaly, aby bylo možné průběhy z daného měření rovnou posoudit a zhodnotit vlastnosti daného materiálu, ze kterého byl vzorek vytvořen. Dále bylo výhodou, že celé měření a zpracování výsledků probíhalo na jednom místě a všechny potřebné věci tak byly po ruce.



Obrázek 47 - Zapojení pracoviště

### 3.3.5 Export dat

Po každém jednotlivém měření byly průběhy uloženy ve formátu Matlab (\*.dat) na USB disk, který byl při každém měření připojen k VNA. Ukládání dat se provádělo tak, že na VNA se kliklo na tlačítko TRACE CONFID a následnou cestou EXPORT → IMPORT/EXPORT DATA → EXPORT DATA a v této složce byl změřený průběh pojmenován a exportován v již zmíněném formátu .dat. Na výběr bylo více formátů jako např. ASCII (\*.csv), ale byl zvolen .dat, protože se naměřená data následně zpracovávala v prostředí Matlab a v daném formátu stačilo jen data načíst a mohly se dále upravovat. Nejčastěji se ukládaly údaje o frekvenci, a s-parametrech  $S_{11}$  a  $S_{21}$ . Exportované hodnoty dat z VNA jsou na obrázku 48, kde v záhlaví



je přesně vypsáno, jak jdou sloupce za sebou a co v každém z nich je, což následně umožňuje jednodušší načítání dat do Matlabu.

%freq[Hz];db:Trc1_S41;ang:Trc1_S41;db:Trc2_S11;ang:Trc2_S11;				
2.600000000000000E+009	-8.040555736808841E-001	-2.460929105742503E+001	-9.452468157561611E+000	-2.775940854121037E+001
2.600308006160123E+009	-8.037779835227683E-001	-2.461187374047795E+001	-9.444129309782278E+000	-2.771528154947339E+001
2.600616012320246E+009	-8.065546963046094E-001	-2.461635702601063E+001	-9.442521241206999E+000	-2.772050744332287E+001
2.600924018480370E+009	-8.049010702828064E-001	-2.462578060431643E+001	-9.432906253426213E+000	-2.767118129291516E+001
2.601232024640493E+009	-8.019733311405010E-001	-2.464597428645143E+001	-9.422759048639087E+000	-2.759963558824666E+001
2.601540030800616E+009	-8.034514970484592E-001	-2.462279792785609E+001	-9.426745181702394E+000	-2.760691668275951E+001
2.601848036960739E+009	-8.012606190050908E-001	-2.465140332112884E+001	-9.414702838287330E+000	-2.758012469082192E+001
2.602156043120863E+009	-8.025110272556641E-001	-2.464738484603728E+001	-9.410111252295884E+000	-2.750767608601036E+001
2.602464049280986E+009	-8.022530587354881E-001	-2.465795691949418E+001	-9.405378560651771E+000	-2.745391407487933E+001
2.60277205441109E+009	-8.016801972885481E-001	-2.465908091196398E+001	-9.396517185065326E+000	-2.745052485029977E+001
2.603080061601232E+009	-8.010840151933965E-001	-2.468479082326478E+001	-9.389932753451060E+000	-2.742282924682431E+001
2.603388067761355E+009	-8.036414257875610E-001	-2.466990759156541E+001	-9.38527292210116E+000	-2.736792359576081E+001
2.603696073921478E+009	-8.004127184866455E-001	-2.469476133927436E+001	-9.377900878452195E+000	-2.730930421306964E+001
2.604004008081602E+009	-8.030046268735596E-001	-2.468516957485418E+001	-9.369570427030714E+000	-2.729500846618995E+001
2.604312086241725E+009	-8.025107106758987E-001	-2.468888205685931E+001	-9.363687013255008E+000	-2.730923851234040E+001
2.604620092401848E+009	-8.013274696425166E-001	-2.469533127174744E+001	-9.354296259684478E+000	-2.721543000828471E+001
2.604928089561971E+009	-8.017399768754201E-001	-2.470481005872511E+001	-9.351219202442765E+000	-2.724399165009046E+001
2.605236104722095E+009	-8.0111108261596414E-001	-2.470807767264867E+001	-9.347191324928753E+000	-2.719286889414610E+001
2.605544110882217E+009	-8.018046914433607E-001	-2.470271479759691E+001	-9.343753232553167E+000	-2.716208711070589E+001
2.605852117042341E+009	-8.025376209399631E-001	-2.472233776964239E+001	-9.334919101891662E+000	-2.711150732628598E+001
2.606160123202464E+009	-8.026398639692891E-001	-2.472184975523136E+001	-9.330492885780631E+000	-2.70852590512950E+001
2.606468129362588E+009	-8.019202776175282E-001	-2.473197524659832E+001	-9.308091712428759E+000	-2.704500090714699E+001
2.606776135522710E+009	-8.004310253027320E-001	-2.474438209148728E+001	-9.313643963619327E+000	-2.702652175403221E+001
2.607084141682834E+009	-8.018241509331013E-001	-2.473881555974017E+001	-9.312041126020883E+000	-2.697862825776954E+001
2.607392147842957E+009	-8.000448026379113E-001	-2.474781917785326E+001	-9.299688796838181E+000	-2.694781871734352E+001
2.607700154003080E+009	-8.024894672154952E-001	-2.473978014722932E+001	-9.293506384668140E+000	-2.692183159385042E+001
2.608008160163203E+009	-8.027330210343606E-001	-2.474461105260876E+001	-9.288239590174340E+000	-2.687103470490953E+001
2.608316166323327E+009	-8.016755467155405E-001	-2.475689721429773E+001	-9.275554125665906E+000	-2.683939133006433E+001
2.608624172483450E+009	-8.018662789336417E-001	-2.475898942683497E+001	-9.272321800887033E+000	-2.681141706603707E+001
2.608932178643573E+009	-8.004083905945663E-001	-2.476721041584771E+001	-9.267392754712844E+000	-2.676836572223067E+001
2.609240184803696E+009	-8.002012800062024E-001	-2.477789608863818E+001	-9.256602414737699E+000	-2.676420661878295E+001
2.609548190963820E+009	-8.015170480739674E-001	-2.479004335893285E+001	-9.250040629015269E+000	-2.673207074281357E+001
2.609856197123942E+009	-8.010284440753661E-001	-2.479267553988106E+001	-9.244852587762265E+000	-2.666897928123275E+001

Obrázek 48 - Exportovaná data z VNA

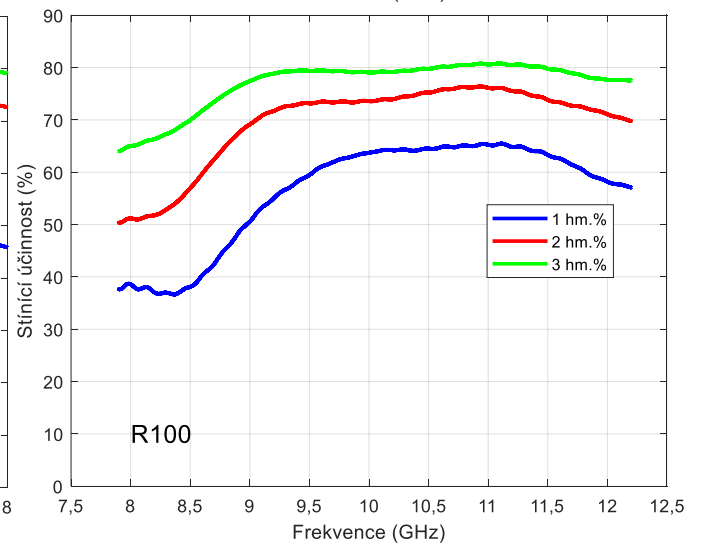
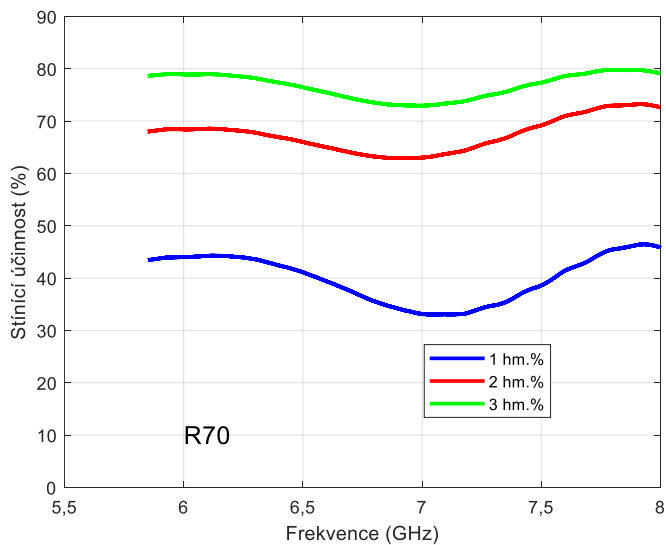
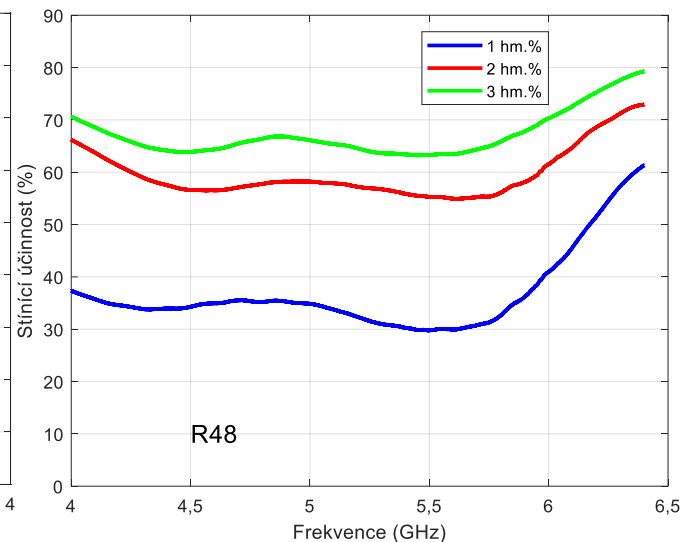
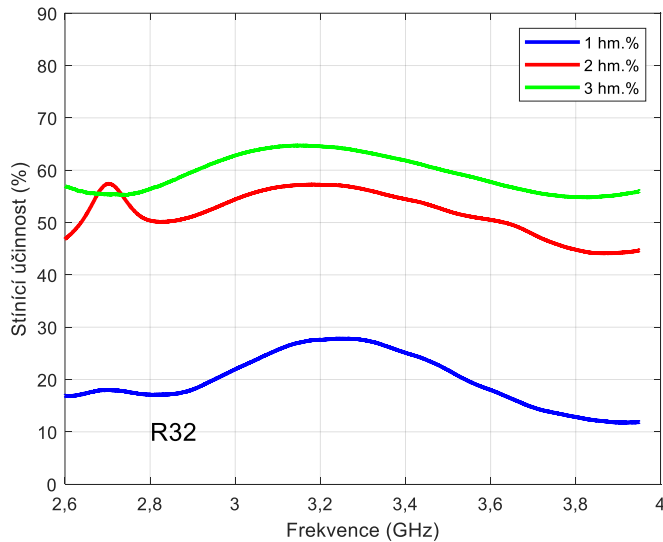
### 3.4 Výsledky z naměřených dat

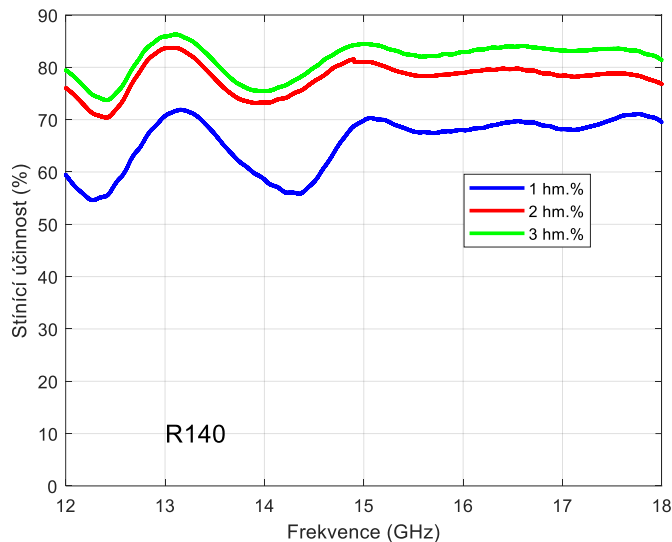
V následujících odstavcích jsou zpracovány naměřená data ze vzorků, která byla k dispozici. Jedná se o výsledky jednak SE, dále pak poměry reflexe, absorpce a transmise. V neposlední řadě je zde znázorněn i vliv tloušťky materiálů na všech změřených frekvencích.

#### 3.4.1 Stínící účinnost vzorku PPy-NT

Tento odstavec se zabývá porovnáním SE na všech dříve zmíněných vlnovodech v odstavci 3.3.3. Pro názornější ukázkou jsou data zpracována a převedena na procenta. Na obrázku 49 jsou SE všech vlnovodů pro vzorek s obsahem vodivého plniva PPy-NT. V každém grafu na obrázku 49 jsou tři průběhy, které znázorňují SE při různých hm. % (1, 2 a 3) plniva v PDMS při stejné tloušťce vzorku 2 mm. U prvního vlnovodu R32 (2,6 – 3,95 GHz) je SE s 1 hm.% plniva v PDMS na střední pracovní frekvenci vlnovodu přibližně 27,5 %, ale jakmile kompozit obsahuje již 2 hm.% vodivé příměsi, SE se na stejné frekvenci pohybuje kolem 57,2 % a pro 3 hm.% je SE 64,5 %. Konkrétně vzorek PPy-NT má nejlepší SE při měření s vlnovodem R140

(12,4 – 18 GHz), kde se SE na střední frekvenci vlnovodu u 1 hm.% pohybuje kolem 69,8 %, což už je o 5,3 % vyšší než u vlnovodu R32 pro 3 hm.%. Následně u 2 hm.% plniva je SE na střední frekvenci 81 %, a u 3 hm.% je SE nejvyšší 84 %. Trend u všech vlnovodů je stejný a jedná se o to, že čím je plniva ve vzorku více tím se zvyšuje i jeho SE. Tím, jak se zvyšuje frekvence vlnovodů, zvyšuje se i SE u všech hm. %, tím pádem lze říct, že čím bude větší pracovní frekvence se stejnou tloušťkou vzorku, tím bude i SE větší, navíc závislá na podílu hm. % plniva.

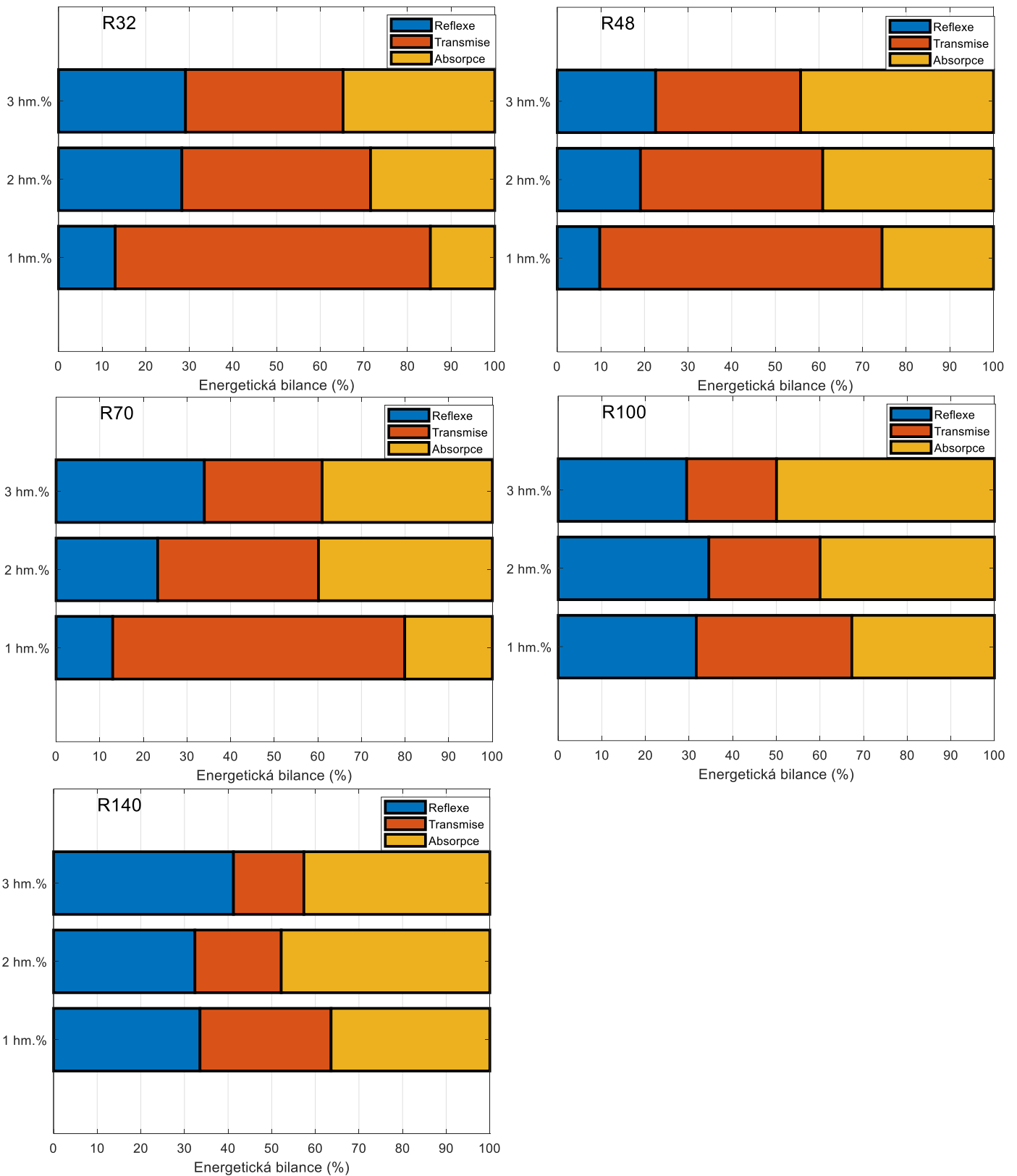




Obrázek 49 - Stínící účinnosti 2 mm vzorku PPy-NT pro vlnovody: R32, R48, R70, R100, R140

### 3.4.2 Reflexe, transmise, absorpce vzorku PPy-NT

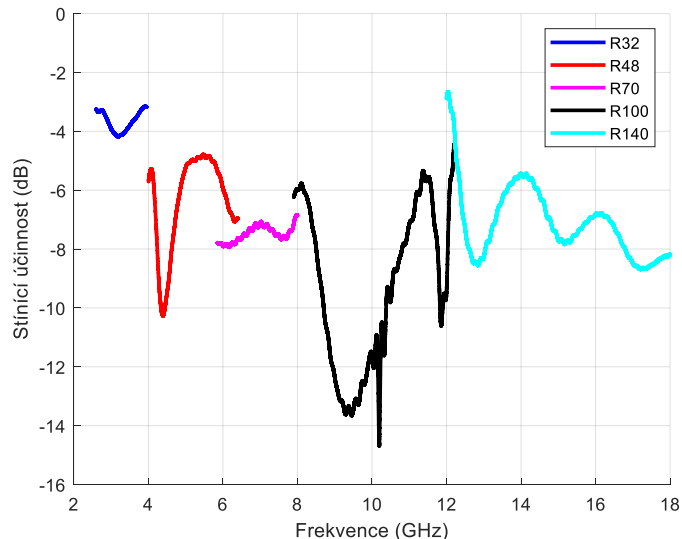
Z naměřených hodnot parametru  $S_{11}$  (Reflexe) a  $S_{21}$  (Transmise) byla ještě dopočtena hodnota absorpce, aby bylo možné se podívat jaký je poměr těchto tří hodnot na různých vlnovodech a s odlišnou hodnotou plniva v PDMS. Na obrázku 50 jsou grafy, kde jsou zobrazeny poměr hodnot transmise, reflexe a absorpce vzorku s obsahem vodivého plniva PPy-NT s tloušťkou 2 mm a 1, 2, a 3 hm.% plniva v PDMS. Na prvním grafu v obrázku 50 jsou zobrazeny poměry pro vlnovod R32. Je vidět, že při hodnotě 1 hm.% plniva většina signálu projde skrz materiálem, konkrétně 72,2 %. Avšak při pohledu na vyšší hodnoty plniva (2 a 3 hm.%) absorpce a reflexe roste, a tím pádem se i SE zvyšuje. Rozdíl poměru absorpce, reflexe a transmise je nejlépe vidět na vlnovodu R32 u 1 hm.% plniva, avšak u toho samého vlnovodu je už u 3 hm.% vidět, že se poměry mění, takže poměr transmise se zmenšil a tím pádem bude SE vyšší. Na grafu s vlnovodem R140 je již hodnota transmise u 1 hm.% razantně nižší, konkrétně 30 %. Jakmile se však podíváme na 3 hm. % transmise tvoří jen 16 % a zbytek je rozdělen na reflexi (41 %) a absorpci (43 %) tudíž bude SE nejvyšší na tomto vlnovodu pro 3 hm.% plniva. U vlnovodů R48, R70 a R100 je situace obdobná, akorát s jinými poměry hodnot, avšak u všech je stejné to, že čím více je plniva v PDMS, tím se i hodnota transmise snižuje a zvyšují se hodnoty absorpce a reflexe. Závěrem lze říct, že čím se budeme pohybovat na vyšších pracovních frekvencích vlnovodů, tím se bude i hodnota transmise snižovat podle hm.% plniva v PDMS.



**Obrázek 50 - Reflexe, transmise, absorpce 2 mm vzorku PPy-NT: Vlnovody R32, R48, R70, R100, R140**

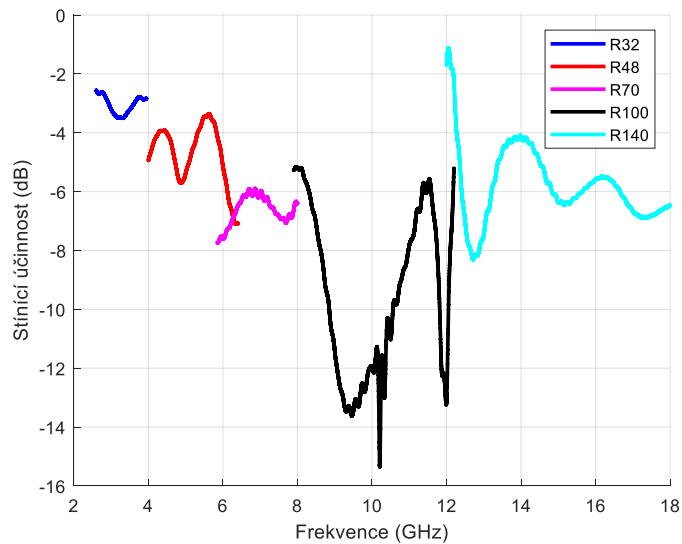
### 3.4.3 Vliv tloušťky vzorků

Na následujícím obrázku 51 je graf, který znázorňuje průběhy SE přes všechny použité frekvence (2,6 – 18 GHz). Jedná se o 5 mm vzorek, který byl vytvořen z kompozitu obsahujícího vodivé plnivo Carbon Pearl. Barevně jsou odlišeny různé vlnovody a je možné si povšimnout, že např. mezi vlnovodem R48, R70 a R100 je jistá návaznost průběhu a mezi vlnovodem R100 a R140 je taktéž náznak návaznosti. Teoreticky by takto měly navazovat všechny vlnovody na sebe, protože i frekvenčně na sebe navazují, avšak na nižší frekvenci tato návaznost není tak zřetelná. SE je na každé frekvenci odlišná, a to může být zapříčiněno mnoha důvody. Materiál, kterým signál prochází má určité vlastnosti, jako je permitivita, permeabilita, elektrická vodivost a ty mohou daný průběh ovlivnit v závislosti na použité frekvenci. Jedná se však ale i o to, že vlnovody jsou náchylné na vnější vlivy, které také mohou do měření zanést chybu, avšak toto jsme se snažili co nejvíce při měření eliminovat.

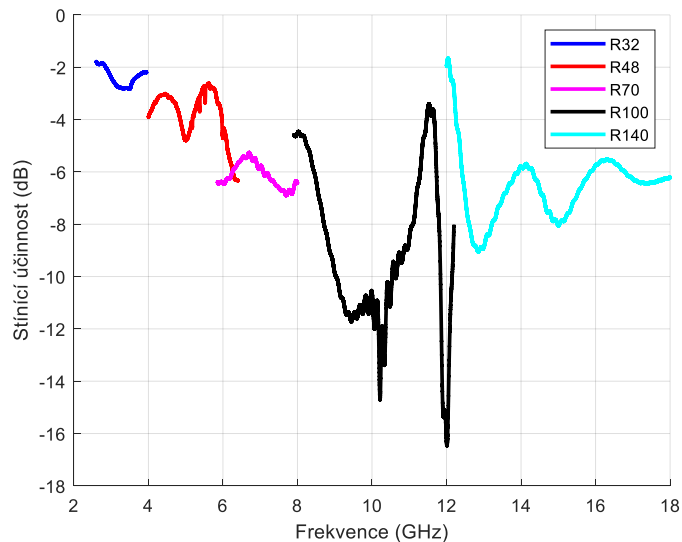


Obrázek 51 - Stínící účinnost vzorku CarbonPearl s tloušťkou 5 mm

V dalším obrázku 52, je graf se stejným materiálem jako na obrázku 51, tedy Carbon Pearl, rozdíl je pouze v tloušťce štítu (4 mm). Při porovnání vzorku, který má tloušťku 4 a 5 mm je teoretický předpoklad, že 4 mm vzorek bude mít menší hodnotu SE kvůli své tloušťce při stejných ostatních parametrech, protože se jedná o vzorek ze stejného materiálu pouze s rozdílnou tloušťkou. Při porovnání obrázku 51 a 52 je už na nejnižší frekvenci vidět, že je tento předpoklad naplněn, a i na ostatních vlnovodech souhlasí teorie s praxí. Dále je vidět, že i průběhy na všech frekvencích mají hodně podobný trend.



**Obrázek 52 - Stínící účinnost vzorku CarbonPearl s tloušťkou 4 mm**



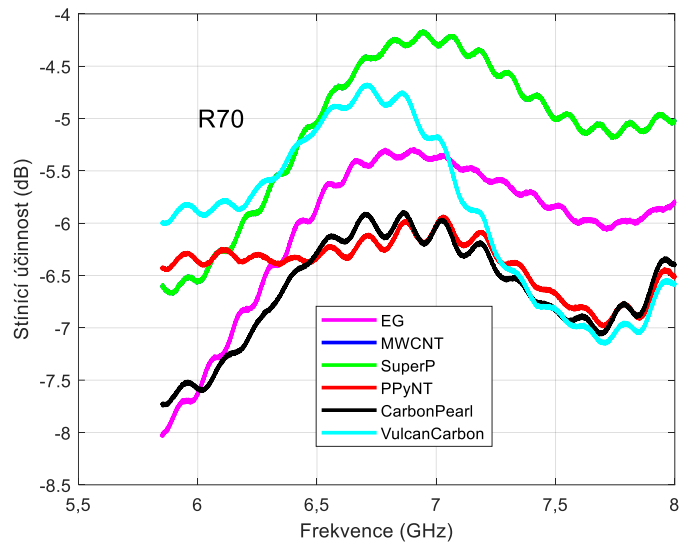
**Obrázek 53 - Stínící účinnost vzorku CarbonPearl s tloušťkou 3 mm**

Poslední obrázek 53 je ze všech štítů nejužší a jeho tloušťka je 3 mm. Jedná se také o Carbon Pearl. Při porovnání s ostatními tloušťkami jsou zde také návaznosti na kmitočtech tam, kde končí jeden vlnovod a začíná druhý. Na zmíněném obrázku 53 jsou všechny hodnoty SE nižší v celém frekvenčním pásmu nižší jak u tlustších vzorků, a tím pádem se měření shoduje s teorií. Výsledkem měření je to, že tloušťka štítu má vliv na hodnotu SE. SE záleží na faktorech jako jsou např. z čeho je štít vyroben, jaké má materiál vlastnosti, jaké je hm.% plniva atd.

#### **3.4.4 Porovnání stínící účinnosti na vlnovodu R70**

Na obrázku 54, je graf všech použitých materiálů a jejich hodnota SE na frekvenci 5,85 – 8,2 GHz, jedná se tedy o vlnovod R70 a všechny vzorky mají stejnou tloušťku 4 mm. Lze si povšimnout, že všechny vzorky mají podobný trend, akorát se mění hodnota SE. Z grafu lze

říct, že vzorek s plnivem SuperP má hodnotu SE nejnižší -4,2 dB, a naopak PPy-NT má tuto hodnotu na dané frekvenci nejvyšší -6 dB. Opět je nutné zdůraznit, že se vše odvíjí od daného materiálu a použitých frekvencí, neboť každý ze štítů má jiné vlastnosti a podle toho se průběh určitým způsobem mění. Výsledkem lze říct, že na každé frekvenci se budou různé vzorky chovat odlišně podle jejich struktury a vlastností. Každá aplikace si bude vyžadovat vlastní specifické vlastnosti štítu a podle toho je nutné volit, který materiál je možné v dané aplikaci použít.



Obrázek 54 - Stínící účinnost všech použitých vzorků na vlnovodu R70 s tloušťkou 4 mm

## 4 Závěr

Cílem práce bylo zpracování literární rešerše na téma stínění EMI, metod měření rozptylových parametrů a výpočtu SE kompozitních materiálů s elektricky vodivými plnivými. Následně byla experimentálně změřena a vyhodnocena SE štítů na bázi 6 různých kompozitů PDMS, a to s ohledem na jejich tloušťku a obsah vodivého plniva.

Teoretická část diplomové práce se zabývá problematikou EMI. V literatuře byly dohledány teoretické vztahy, které převádějí naměřené hodnoty rozptylových parametrů na efektivitu stínění; studovány byly i parametry, které efektivitu stínění ovlivňují. Na základě těchto znalostí bylo možné přibližně usuzovat, jak budou průběhy vypadat a těmto teoretickým předpokladům jsme se snažili v práci co nejpřesněji přiblížit. Dále byla zpracována rešerše dělení EMI podle typu a způsobu jejich měření. V neposlední řadě bylo důležité ukázat, jak lze EMI eliminovat. Eliminace EMI se hlavně provádí elektromagnetickým stíněním, které je i hlavní náplní této práce.

Náplní experimentální části práce byl detailní popis použitých materiálů a jejich složení. Následně je představen kompletní postup přípravy vzorků a výroby kompozitního štítu EMI. V práci je popsáno celkové pracoviště a vybavení potřebné pro měření rozptylových parametrů EMI štítů. Hlavním použitým měřicím přístrojem byl VNA. Nejprve bylo nutné vyzkoušet různé možnosti kalibrace VNA a na základě získaných výsledků vybrat optimální. Po vyzkoušení různých typů kalibrací byla nakonec vybrána kalibrace TOSM přímo s vlnovody, díky které bylo možné eliminovat většinu nežádoucích zvlnění u změřených průběhů. Změřeny byly parametry  $S_{11}$  a  $S_{21}$ , ze kterých byla vypočítána hodnota absorpce tak, aby bylo možné určit SE. Ta byla zpracována na všech vlnovodech, pro frekvenční rozsah 2,6 – 18 GHz a pro názornost byl v experimentální části diskutován zejména vzorek PPy-NT. Byla použita 1, 2 a 3 hm % plniva PPy-NT v PDMS. Výsledky ukázaly, že na nízké frekvenci u vlnovodu R32 (2,6 – 3,95 GHz) vychází SE necelých 30 % pro nejmenší obsah plniva (1 hm.%) a u největšího obsahu plniva (3 hm.%) je SE kolem 65 %. Obecně lze tedy konstatovat, že se vzrůstajícím hm. % plniva v PDMS, roste SE. U stejného vzorku, avšak u vlnovodu R140 (12,4 – 18 GHz) je SE 72 % pro nejmenší obsah plniva a pro největší je až 85 %. Celkově je SE silně závislá na frekvenci. Jestliže zhodnotíme výsledky reflexe, transmise a absorpce u stejného vzorku, vychází hodnota transmise na nejnižší frekvenci pro nejnižší hm. % kolem 72 %; SE reflexí či absorpcí je tak logicky nízká. Avšak čím jsou frekvence vyšší tím se množství prošlého záření snižuje, a tudíž rostou hodnoty reflexe a absorpce, a celková SE roste. Vzorky byly zhotoveny s různou tloušťkou a byla vyhodnocena i SE v závislosti na



tomto parametru. Naměřené hodnoty SE štítu z kompozitu PDMS a Carbon Pearl ukazují, že čím je tento štít silnější, tím bude hodnota transmise nižší v celém frekvenčním rozsahu. Posledním porovnáním je SE všech dostupných vzorků na vlnovodu R70 (5,85 – 8,2 GHz). Z výsledků je patrné, že SE na frekvenci 7 GHz je nejvyšší pro vzorek Carbon Pearl a nejnižší u vzorku SuperP, předpokládá se, že je to dáno jejich elektrickou vodivostí, která je nejvyšší právě u Carbon Pearl a nejnižší u SuperP.

## Literatura

- [1] THIVAKARAN, a PJ CHONG. *How to Prevent Electromagnetic Interference From Ruining Your Devices* [online]. In: . [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://blog.ttelectronics.com/electromagnetic-interference>
- [2] ČSN EN 61000-4-3 ED.3 (333432) Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-3: Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti. In: *TECHNOR* [online]. 2006 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-61000-4-3-ed-3-333432-181155.html>
- [3] NOVÁK, Ivo. Účinky elektromagnetického pole na lidský organismus. In: *Tzbinfo* [online]. 2015 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/13319-ucinky-elektromagnetickeho-pole-na-lidsky-organismus>
- [4] GEETHA, S., K. K. SATHEESH KUMAR, Chepuri R. K. RAO, M. VIJAYAN a D. C. TRIVEDI. EMI shielding: Methods and materials-A review. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2009, **112**(4), 2073-2086 [cit. 2023-07-21]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.29812
- [5] JIANG, Dawei, Vignesh MURUGADOSS, Ying WANG et al. Electromagnetic Interference Shielding Polymers and Nanocomposites - A Review. *Polymer Reviews* [online]. 2019, **59**(2), 280-337 [cit. 2023-07-21]. ISSN 1558-3724. Dostupné z: doi:10.1080/15583724.2018.1546737
- [6] Měření elektromagnetické stínící účinnosti planárních materiálů v pásmu 100 kHz až 1,5 GHz. In: *FEL ČVUT* [online]. 2010 [cit. 2023-07-21]. 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>
- [7] SANKARAN, Sowmya, Kalim DESHMUKH, M. Basheer AHAMED a S.K. KHADHEER PASHA. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2018, **114**, 49-71 [cit. 2023-07-21]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2018.08.006

- [8] Rozdíl mezi permitivitou a permeabilitou. In: *BETWEENMATES* [online]. 2023 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://cs.weblogographic.com/difference-between-permittivity>
- [9] Permeabilita. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Permeabilita>
- [10] KUMAR, Pradip, Uday NARAYAN MAITI, Anirban SIKDAR, Tapas KUMAR DAS, Asheesh KUMAR a V SUDARSAN. Recent Advances in Polymer and Polymer Composites for Electromagnetic Interference Shielding: Review and Future Prospects. *Polymer Reviews* [online]. 2019, **59**(4), 687-738 [cit. 2023-07-21]. ISSN 1558-3724. Dostupné z: doi:10.1080/15583724.2019.1625058
- [11] *Elektrická vodivost* [online]. In: . 2022 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: [http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Elektrick%C3%A1\\_vodivost](http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Elektrick%C3%A1_vodivost)
- [12] *CO JE KONDUKTANCE? ELEKTRICKÁ VODIVOST KOVŮ, VODY A DALŠÍCH MATERIÁLŮ* [online]. In: . 2022 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/events/page/45336/co-je-konduktance-elektricka-vodivost-kovu-vody-a-dalsich-materialu/>
- [13] MATHUR, Phalguni a Sujith RAMAN. Electromagnetic Interference (EMI): Measurement and Reduction Techniques. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2020, **49**(5), 2975-2998 [cit. 2023-07-21]. ISSN 0361-5235. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-020-07979-1
- [14] *Elektromagnetická kompatibilita*. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Svačina.
- [15] EMC TESTING: THE BEGINNER'S GUIDE: Chapter 2 - Radiated & Conducted Emissions. In: *EMC FastPass* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://emcfastpass.com/emc-testing-beginners-guide/emissions/>
- [16] *NĚKTERÉ OTÁZKY PŘEDCERTIFIKAČNÍCH TESTŮ EMC*. Brno, 2009. Dizertační práce. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc., Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.
- [17] Antennas. In: *ETS LINDGREN* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.ets-lindgren.com/products/antennas?page=Products-Landing-Page>

- [18] Měření umělou sítí. In: *ELUC* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1032>
- [19] CISPR 25. *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*. 2014.
- [20] *Eliminace elektromagnetického rušení stíněním*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Doc. Ing, Jiří Laurenc, CSc.
- [21] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-8: Testing and measurement techniques – Power frequency magnetic field immunity test* [online]. 141 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://webstore.iec.ch/publication/22272&preview>
- [22] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3 : Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test* [online]. 2020, 164 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://webstore.iec.ch/publication/59849>
- [23] VALAVAN, Sarangan. *Understanding electromagnetic compliance tests in digital isolators* [online]. 2014 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ti.com/lit/wp/slyy064/slyy064.pdf>
- [24] Tests for Measuring EMI Shielding Effectiveness. In: *LeaderTech* [online]. 2016 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://leadertechinc.com/blog/4-tests-measuring-emi-shielding-effectiveness/>
- [25] GONÇALVES, Fábio, Alfred PINTO, Renato MESQUITA, Elson SILVA a Adriana BRANCACCIO. Free-Space Materials Characterization by Reflection and Transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and Multi-Frequency Algorithms. *Electronics* [online]. 2018, 7(10) [cit. 2023-07-21]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: [doi:10.3390/electronics7100260](https://doi.org/10.3390/electronics7100260)
- [26] Understanding Common Mode vs. Differential Mode Signals. In: *CADENCE* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-understanding-common-mode-vs-differential-mode-signals>

- [27] EMC Basics: Common Mode vs. Differential Noise. In: *All About Circuits* [online]. 2022 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/industry-white-papers/emc-basics-common-mode-vs-differential-noise/>
- [28] What is the difference between common mode and differential mode?. In: *TDK* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://product.tdk.com/en/contact/faq/emc-components-0032.html>
- [29] AN1131: Design Guide for Reducing Radiated and Conducted Emissions in Isolated Systems Using Skyworks' Isolators. In: *SKYWORKS* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/application-notes/an1131-layout-guide.pdf>
- [30] *Components—Part 5: The Common Mode Filter's Acrobatic Ability to Separate Signals and Noise* [online]. In: . [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.tdk.com/en/tech-mag/noise/08>
- [31] CHUNG, D.D.L. Materials for electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2020, **255** [cit. 2023-07-21]. ISSN 02540584. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchemphys.2020.123587
- [32] Toroidal Transformer Mu-Metal Shielding Enclosure MuCan. In: *Don Audio* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.don-audio.com/Don-Audio-MuCan-Mu-Metall-Shielding-Enclosure>
- [33] CHUNG, D.D.L. *Carbon Materials: Science and Applications*. USA, 2019. ISBN 978-981-3221-90-1.
- [34] SIGRAFLEX® Flexible Graphite Foil and Tapes. In: *SGL Carbon* [online]. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigraflex-flexible-graphite-foil-and-tapes/>
- [35] KRUŽELÁK, Ján, Andrea KVASNIČÁKOVÁ, Klaudia HLOŽEKOVÁ a Ivan HUDEC. Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. *Nanoscale Advances* [online]. 2021, **3**(1), 123-172 [cit. 2023-07-21]. ISSN 2516-0230. Dostupné z: doi:10.1039/D0NA00760A

- [36] WANG, Sihong, Jin Young OH, Jie XU, Helen TRAN a Zhenan BAO. Skin-Inspired Electronics: An Emerging Paradigm. *Accounts of Chemical Research* [online]. 2018, **51**(5), 1033-1045 [cit. 2023-07-21]. ISSN 0001-4842. Dostupné z: doi:10.1021/acs.accounts.8b00015
- [37] BERÁNEK, Daniel. EKG elektrody: druhy a využití v diagnostice. In: *COMPEK Mercial Services* [online]. 2022 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://blog.compek.cz/ekg-elektrody-druhy-a-vyuziti-v-diagnostice/>
- [38] NEETIKA, Jain. *Electronic Paper Display (e-Paper) – How it works, Types, Applications* [online]. In: . [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://electricalfundablog.com/electronic-paper-display-epaper/>
- [39] SOMEYA, Takao. SKIN DISPLAYS WILL GIVE WEARABLES THEIR INDEPENDENCE. In: *IEEE Spectrum* [online]. 2021 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/skin-displays-will-give-wearables-their-independence#toggle-gdpr>
- [40] Flexible Resistor: Everything You Need to Know. In: *WELLPCB* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.wellpcb.com/flexible-resistor.html>
- [41] KOPECKÝ, Dušan, Martin VARGA, Jan PROKEŠ, Martin VRŇATA, Miroslava TRCHOVÁ, Jitka KOPECKÁ a Marek VÁCLAVÍK. Optimization routes for high electrical conductivity of polypyrrole nanotubes prepared in presence of methyl orange. *Synthetic Metals* [online]. 2017, **230**, 89-96 [cit. 2023-07-27]. ISSN 03796779. Dostupné z: doi:10.1016/j.synthmet.2017.06.004
- [42] SIGRATHERM® Highly Conductive Expanded Graphite Powder. In: *Sgl carbon* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigratherm-highly-conductive-expanded-graphite-powder/>
- [43] CONDUCTIVE CARBON BLACKS. In: *CABOT* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cabotcorp.com/solutions/products-plus/carbon-blacks-for-elastomer-reinforcement/conductive>

- [44] BLACK PEARLS® 2000 carbon black. In: *CABOT* [online]. [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fetc.com.tw/upload/files/BLACK-PEARLS-2000pdf.pdf>
- [45] Super P® Li. In: *Imerys* [online]. [cit. 2023-08-16]. Dostupné z: <https://www.imerys.com/product-ranges/super-p-li>
- [46] Waveguide Sizes. In: *EverythingRF* [online]. [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/tech-resources/waveguides-sizes>

## **Seznam příloh**

Přílohy jsou nahrané na portálu stag.