

## Diplomová práce

# Návrh elektromagnetického stínění elektrické součástky s využitím speciální textilie

*Studijní program:*

N0723A270003 Průmyslové inženýrství

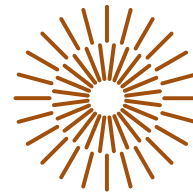
*Autor práce:*

**Bc. Michal Hájek**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Veronika Tunáková, Ph.D.  
Katedra materiálového inženýrství

Liberec 2024



## Zadání diplomové práce

# Návrh elektromagnetického stínění elektrické součástky s využitím speciální textilie

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Bc. Michal Hájek</b>
<i>Osobní číslo:</i>	T22000016
<i>Studijní program:</i>	N0723A270003 Průmyslové inženýrství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra hodnocení textilií
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

### Zásady pro vypracování:

1. Zmapujte současný stav poznání v oblasti: Textilie vhodné pro elektromagnetické stínění.
2. Popište dosud užívané měřicí metody elektromagnetického stínění plošných textilií.
3. Navrhněte vhodnou speciální textilii zajišťující elektromagnetické stínění elektricky citlivé součástky dle zadaných požadavků.
4. Vyroberte prototyp ochranného krytu a popište technologický postup.
5. Navrhněte a proveďte experiment za účelem ověření funkčnosti elektromagnetického stínění na součástce/elektrickém zařízení.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce: tištěná/elektronická

Jazyk práce: čeština

### Seznam odborné literatury:

1. PALANISAMY, Sundaramoorthy, Veronika TUNAKOVA, Shi HU, Tao YANG, Dana KREMENAKOVA, Mohanapriya VENKATARAMAN, Michal PETRU a Jiri MILITKY. Electromagnetic Interference Shielding of Metal Coated Ultrathin Nonwoven Fabrics and Their Factorial Design. *Polymers*. 2021, **13**(4), 484.
2. TUNÁKOVÁ, Veronika, Jan GRÉGR, Maroš TUNÁK a Gejza DOHNAL. Functional polyester fabric/polypyrrole polymer composites for electromagnetic shielding: Optimization of process parameters. *Journal of Industrial Textiles*. 2018, **47**(5), 686–711.
3. MAITY, Subhankar, Kunal SINGHA, Pulak DEBNATH a Mrinal SINGHA. Textiles in Electromagnetic Radiation Protection. *Journal of Safety Engineering*. 2013, **2**(2), 11-19.

Vedoucí práce:

doc. Ing. Veronika Tunáková, Ph.D.  
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání práce:

17. ledna 2024

Předpokládaný termín odevzdání: 20. května 2024

L.S.

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Maroš Tunák, Ph.D.  
garant studijního programu

V Liberci dne 29. dubna 2024

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci 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.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## **Poděkování**

Tímto bych rád upřímně poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Veronice Tunákové, Ph.D. za ochotu odborné pomoci, investování vlastního času, cenných připomínek a rad během mé práce, které se opíraly o získané zkušenosti v dané problematice. Dále bych rád poděkoval paní laborantce Šárce Řezníčkové za konzultaci, poskytnutí prostor a možnosti provést potřebné měření.

## ANOTACE

Tato diplomová práce se zaměřuje na elektromagnetické stínění pro ochranu citlivé elektroniky ve venkovním prostředí, například u letišť s radarovými systémy. Cílem je navrhnout efektivní ochranný obal, který minimalizuje poškození elektronických součástí vlivem elektromagnetického vlnění a snižuje potřebu jejich časté výměny. Dalším požadavkem je mechanická odolnost. Pro tento účel je využita speciální elektricky vodivá textilie, schopná odstínit elektromagnetická pole v širokém frekvenčním rozsahu 1–10 GHz. Tato textilie má navíc nízkou ohybovou tuhost a je snadno spojovatelná. Výzkum zahrnuje výběr a charakterizaci textilií s vysokou stínicí účinností, zkoumání elektromagnetické stínicí schopnosti a testování odolnosti textilií proti pronikání ostré hrany. Práce navíc obsahuje optimalizaci konstrukce ochranného obalu a metodiku jeho aplikace tak, aby byla co nejefektivnější a minimalizovala časové zpoždění při montáži. Začleněn je také návrh montážního přípravku pro tvarování textilie. Vytvořený ochranný obal je na závěr testován v reálných podmínkách.

## Klíčová slova

Elektromagnetické stínění; elektricky vodivá textilie; ochranný obal; elektronická součástka; radarové systémy; frekvenční rozsah; mechanické vlastnosti

## **ANNOTATION**

This thesis focuses on electromagnetic shielding for the protection of sensitive electronics in outdoor environments, such as airports with radar systems. The objective is to design an effective protective enclosure that minimizes damage to electronic components due to electromagnetic waves and reduces the need for frequent replacement. Another requirement is mechanical durability. For this purpose, a special electrically conductive fabric is used, capable of shielding electromagnetic fields in a wide frequency range of 1-10 GHz. In addition, this fabric has a low bending stiffness and is easy to connect. The research includes the selection and characterization of textiles with high shielding efficiency, investigation of electromagnetic shielding capability and testing the resistance of the textiles to sharp edge penetration. In addition, the work includes optimization of the shielding design and application methodology to be as efficient as possible and minimize installation time delays. Also included is the design of an assembly jig for forming the fabric. Finally, the created protective cover is tested in real conditions.

### **Key words**

Electromagnetic shielding; electrically conductive fabric; protective cover; electronic component; radar systems; frequency range; mechanical properties

## Obsah

Seznam použitých zkratk, značek, symbolů .....	10
Úvod .....	11
1 Analytická část .....	12
1.1 Elektromagnetická kompatibilita.....	12
1.1.1 Elektromagnetické spektrum .....	14
1.1.2 Princip elektromagnetického stínění .....	15
1.1.3 Výpočet stínící účinnosti .....	16
1.2 Elektricky vodivé textilie.....	17
1.2.1 Textilie tvořené pouze vodivou komponentou .....	17
1.2.2 Textilní struktury povrstvné vodivou komponentou .....	18
1.2.3 Rozdělení textilií dle umístění vodivé komponenty .....	19
1.3 Komerčně dostupné elektromagneticky stínící textilie .....	21
1.4 Metody hodnocení elektromagnetického stínění textilií .....	25
2 Experimentální část .....	30
2.1 Použité materiály .....	30
2.2 Testování SE vzorků pro frekvence do 3 GHz.....	32
2.2.1 Vliv velikosti vzorku na stínící účinnost .....	34
2.2.2 Porovnání stínící účinnosti vzorků .....	40
2.3 Testování SE vzorků pro frekvence do 6 GHz.....	43
2.4 Testování mechanických vlastností.....	47
2.5 Aplikace textilie v reálných podmínkách .....	52
2.6 Zhotovení prototypu přípravku pro úpravu tvaru stínící textilie .....	55
3 Diskuse výsledků experimentální části.....	61
Závěr.....	63
Seznam použité literatury .....	65



Seznam obrázků.....	68
Seznam tabulek.....	70
Seznam příloh.....	71

## Seznam použitých zkratek, značek, symbolů

<i>Symbol/Zkratka</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Popis</i>
Ag		Stříbro
ALU		Hliníková fólie
Anova		Analýza rozptylu
ASTM		American Society for Testing and Materials
Cu		Měď
dB		Decibel
EM		Elektromagnetické vlnění
EMC		Elektromagnetická kompatibilita
EMI		Elektromagnetické rušení
EMS		Elektromagnetické stínění
FSM		Free-space method
IS		Interval spolehlivosti
Ni		Nikl
NT		Netkaná textilie
PAD		Polyamid
PANI		Polyaniline
PEDOT		Poly(3,4-ethylendioxythiophen)
PES		Polyethersulfon
PET		Polyethylentereftalát
PP		Polypropylen
SEM		Rastrovací elektronový mikroskop
Sn		Zinek
TUL		Technická Univerzita v Liberci
$\alpha$	[-]	Hladina významnosti
$f$	[Hz]	Frekvence
F	[N]	Síla
SE	[dB]	Stínící účinnost
T	[tex]	Jemnost

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá elektromagnetickým stíněním, tedy ochranou konkrétní elektrostaticky/elektromagneticky citlivé elektroniky. Zmíněná elektronická součást se využívá při zabezpečení objektů a je umístěna ve venkovním prostředí. Bylo zjištěno, že tuto elektroniku, resp. její součást opakovaně poškozuje elektrostatické a elektromagnetické pole, které je přítomné v blízkosti např. letišť využívající radarové systémy s frekvencí cca 1-10 GHz.

Hlavní motivací této práce je návrh řešení, které by předcházelo problému popsanému výše a nebylo by nutno citlivou součást často vyměňovat kvůli nefunkčnosti. S tím jsou spojené jak finanční náklady na pořízení nové součástky, tak náklady spojené s instalací v místě ochrany objektu. Po nastudování problematiky a dostupných možných řešení ochrany citlivé elektroniky bylo přistoupeno k využití speciální elektricky vodivé textilie, která splňuje jeden z hlavních požadavků, a to je vysoká schopnost odstínit elektromagnetická pole ve frekvenčním rozsahu 1–10 GHz. Další výhodou použití textilie při ochraně elektronické součástky je její nízká ohybová tuhost a snadná spojovatelnost. Tato textilie bude tedy v práci použita pro konstrukci ochranného obalu pro zmíněnou elektronickou součástku, z něhož bude možno v případě potřeby součástku opakovaně vyjímat. Optimalizována je konstrukce textilního ochranného obalu a metodika jeho aplikace na elektronickou součástku tak, byla práce co nejefektivnější a nezpůsobila časovou mezeru při montáži na lince. S tím je spojený návrh montážního přípravku pro vytvarování plošné textilie.

Hlavním cílem práce je tedy navrhnout textilní ochranný obal pro konkrétní elektronickou součást, který bude splňovat jak požadovanou elektromagnetickou stínící účinnost, tak vybrané mechanické vlastnosti.

Řešení diplomové práce bylo provedeno v následujících krocích. Na základě rozsáhlé literární rešerše byly vytipovány textilie s relativně vysokou stínící účinností a získány jejich vzorky. Osm vybraných textilií bylo charakterizováno z hlediska jejich základních vlastností (tloušťka, plošná hmotnost, struktura). V následujícím kroku byla prozkoumána jejich elektromagnetická stínící schopnost pro dvě frekvenční pásma. Na závěr byla otestována odolnost vybraných textilií vůči pronikání ostří, která simulovala odolnost textilie, resp. textilního obalu při její montáži na elektronickou součástku. Ochranný obal vytvořený s využitím vybrané textilie byl otestován také v reálných podmínkách použití.

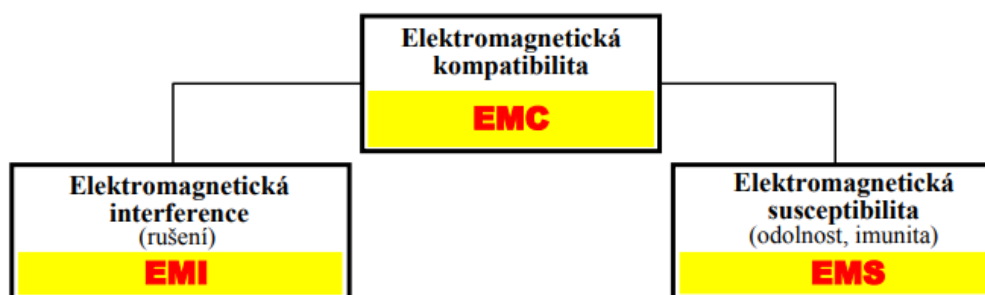
## 1 Analytická část

Analytická část práce seznámí čtenáře s problematikou elektromagnetické kompatibility (EMC), přičemž elektromagnetické stínění představuje klíčový prostředek, který umožňuje jak redukci rušivého vyzařování od zdrojů rušivých signálů, tak zvýšení elektromagnetické odolnosti na straně přijímačů těchto signálů. Tato kapitola dále shrnuje různé možnosti tvorby textilií se zvýšenou elektrickou vodivostí, a tedy i zvýšenou elektrickomagnetickou stínící účinností. Popsána jsou elektricky vodivá vlákna jako např. kovová vlákna, pokovená vlákna, uhlíková vlákna atd. Zvýšená pozornost je věnována komerčně dostupným textiliím schopným odstínit elektromagnetické pole. Poslední podkapitola se věnuje shrnutí metod vhodných pro hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti plošných materiálů, resp. plošných textilií.

### 1.1 Elektromagnetická kompatibility

Od raných dob rádiové a telegrafní komunikace je známo, že elektrické přístroje generují elektromagnetické vlny bohaté na spektrální obsah (frekvenční složky), a tyto vlny mohou způsobovat rušení nebo šum v různých elektronických a elektrických zařízeních, jako jsou například radiopřijímače a telefonní komunikace. Řada dalších zdrojů elektromagnetických emisí jako jsou blesky, relé, stejnosměrné elektromotory a výbojky, také generují elektromagnetické vlny bohaté na spektrální obsah a mohou způsobit rušení v těchto zařízeních [1].

Elektromagnetická kompatibility (EMC) je charakterizována schopností zařízení, systému nebo přístroje udržovat správnou funkci i v prostředí, kde působí jiné zdroje elektromagnetických signálů, a zároveň svou vlastní elektromagnetickou aktivitou nedovolit nepřijatelné ovlivňování okolí. To znamená, že nemá vyzařovat signály, které by mohly rušit činnost jiných zařízení [2, 3]. Rozdělení EMC je znázorněno na Obrázku 1.



Obrázek 1: Základní členění elektromagnetické kompatibility [2]

Elektromagnetické rušení (**EMI**) představuje vážný a narůstající typ environmentálního znečištění. Jeho dopady sahají od nepříjemných drobných rušivých zvuků při příjmu vysílání až po potenciálně fatální nehody způsobené poškozením bezpečnostně kritických kontrolních systémů. Různé formy EMI mohou způsobit poruchy v elektrických a elektronických zařízeních, bránit správnému využívání radiofrekvenčního spektra, způsobovat vzplanutí hořlavých nebo jinak nebezpečných atmosfér. S postupujícím pronikáním elektronických systémů do všech oblastí společnosti roste jak potenciál pro interferenční efekty, tak možnost vzniku závažných událostí způsobených EMI [2, 3].

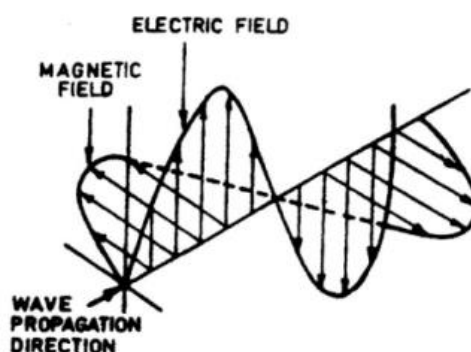
Elektromagnetická susceptibilita (**EMS**), známá také jako elektromagnetická citlivost nebo odolnost vůči rušení, označuje schopnost zařízení a systémů fungovat správně i v prostředí s elektromagnetickým rušením. EMS se zaměřuje na technická opatření, která zvyšují odolnost zařízení proti rušivým signálům. Cílem je minimalizovat dopady elektromagnetického rušení na zařízení, aniž by se přímo řešily zdroje tohoto rušení. [2].

Elektromagnetické stínění je klíčovým prvkem elektromagnetické kompatibility (**EMC**), který slouží jak ke snížení rušivého vyzařování ze zdrojů rušivých signálů, tak ke zvýšení elektromagnetické odolnosti přijímačů těchto signálů. Stínění zahrnuje konstrukční opatření určená k oslabení elektromagnetických polí v určité oblasti. K dosažení těchto cílů se používají technická řešení, známá jako stínicí kryty nebo stínění. [2, 4].

Stínění se používá k ochraně jednotlivých součástí, funkčních bloků a celých elektronických zařízení, které mohou být zdroji i přijímači elektromagnetického rušení. Jedná se o účinný způsob ochrany před rušením s kontinuálním nebo impulzním charakterem. Je však důležité si uvědomit, že stínění by mělo být aplikováno až jako poslední možnost, po vyčerpání ostatních metod zajištění elektromagnetické kompatibility, zejména optimalizace návrhu a konstrukce zařízení z hlediska EMC [2, 4].

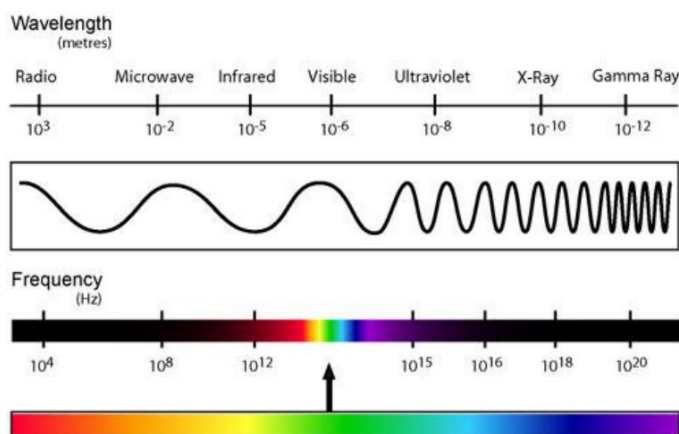
### 1.1.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetická vlna vzniká kombinací elektrické a magnetické složky, které jsou navzájem kolmé, viz Obrázek 2, a šíří se kolmo k rovině. Její vznik je spojen s pohybem elektricky nabitých částic a označuje se jako elektromagnetické záření. Tyto vlny se šíří jak prázdným prostorem, tak vzduchem a dalšími látkami. I když si lze obtížně představit jejich vlnový charakter, sdílí podobné charakteristiky s jinými typy vln [5, 6].



Obrázek 2: Kombinace elektrické a magnetické složky EM vlny [6]

Přes zdánlivé rozdíly jsou rádiové vlny, mikrovlny, rentgenové záření, a dokonce i viditelné světlo všechny varianty elektromagnetických vln. Tyto vlny spadají do elektromagnetického spektra, přičemž každá má svůj unikátní rozsah vlnových délek. Celkový rozsah vlnových délek elektromagnetických vln zahrnuje od velmi dlouhých po velmi krátké délky a je označován jako Elektromagnetické spektrum, které je znázorněno na Obrázku 3 [5–7].

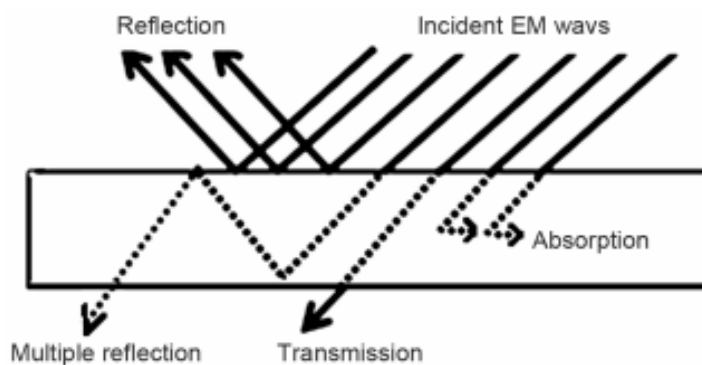


Obrázek 3: Elektromagnetické spektrum [5]

### 1.1.2 Princip elektromagnetického stínění

Elektromagnetické stínění lze vyjádřit v redukci magnetického a elektrického pole nebo intenzity rovinné vlny způsobené stíněním. Účinnost stínění a s tím spojené tlumení elektromagnetického rušení (EMI) závisí na frekvenci, vzdálenosti od zdroje, tloušťce a materiálu stínícího prvku.

Když elektromagnetické vlny dopadají na povrch objektu, probíhají čtyři různé mechanismy (odraz, vícenásobný odraz, absorpce a přenos). Cílem je zadržet elektromagnetickou vlnu, která může být buď odražena (vícekrát odrazem) nebo absorbována pomocí stínících materiálů. Obrázek 4 ilustruje mechanismus stínění elektromagnetických vln [5, 6, 8, 9].



Obrázek 4: Mechanismus stínění [6]

#### Odraz (Reflection)

Pokud je stínící materiál vyroben z vysoce vodivých materiálů, dochází k odražení elektromagnetických vln. V případě, že má stínící materiál omezenou vodivost, může část signálu proniknout skrz něj. Při průniku a dosažení protilehlé (rubní) strany materiálu narazí na další hranici a je odražen zpět do materiálu [8, 9].

#### Vícenásobný odraz (Multiple reflection)

Vícenásobné odrazy elektromagnetických vln vznikají kvůli různému složení povrchu materiálu na rubu a lici nebo fázím uvnitř stínícího materiálu. Materiály s větší tloušťkou, jako jsou pěnové materiály a kompozity s plnivem, vykazují vyšší vnitřní odrazy elektromagnetických vln [7, 8].

### Absorpce (Absorption)

Aby došlo k absorpci elektromagnetických vln, měl by stínící materiál obsahovat elektrické nebo magnetické dipóly pro interakci s elektromagnetickým polem. Materiál s vysokou dielektrickou konstantou poskytuje elektrické dipóly, zatímco materiál s vysokou magnetickou permeabilitou poskytuje magnetické dipóly pro absorpci elektromagnetických vln. Přítomné elektrické dipóly ve stínícím materiálu potlačují elektrické pole elektromagnetických vln a přeměňují je na teplo. Kromě těchto kritérií by měl kvalitní stínící materiál také mít nízkou povrchovou a objemovou rezistivitu [8–10].

### Přenos (Transmission)

V případě, kdy elektromagnetické vlny procházejí stínícím materiálem bez jakékoli ztráty signálu, je pozorován vysoký přenos elektromagnetických vln. Materiály, které nevedou elektrický proud, jako sklo, polyester a polypropylen, projevují minimální nebo žádnou ztrátu přenosu elektromagnetických vln [8].

#### 1.1.3 Výpočet stínící účinnosti

Výkonnost/funkčnost elektromagnetické stínící účinnosti se hodnotí pomocí účinnosti elektromagnetického stínění. Účinnost stínění (SE) je obvykle vyjádřena v decibelech (dB) jako funkce logaritmu poměru intenzit elektrického ( $E$ ), magnetického ( $H$ ) nebo rovinného vlnového pole [5, 9].

$$SE = 20 \log_{10} \left( \frac{E_0}{E_1} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{H_0}{H_1} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

kde  $E_0$ ,  $H_0$  je intenzita dopadající elektrické magnetické vlny a  $E_1$ ,  $H_1$  je elektrické magnetické vlnění prošlé stínící přepážkou.



## 1.2 Elektricky vodivé textilie

Pro elektromagnetické stínění (EMS) jsou nejvhodnější kovové materiály. Nejlepšími z nich jsou stříbro, hliník, měď, nerezová ocel, železo, zlato, nikl, mosaz a například i grafit [6, 11]. Tyto elektricky vodivé materiály dobře pohlcují a odrážejí elektromagnetické vlny (EM), ale mají i značné nevýhody, kterými jsou například vysoká hmotnost, možnost koroze a nejsou vůbec pružné [11]. Z těchto důvodů se spíše používají kombinace kovových materiálů s polymerními materiály, v textilním odvětví pak s přírodními nebo syntetickými vlákny [12].

### 1.2.1 Textilie tvořené pouze vodivou komponentou

Textilní struktury (tkaniny, pleteniny, netkané textilie) mohou být vyrobené zcela z vodivé komponenty pomocí elektricky vodivých vláken, jako je například měděný nebo stříbrný drát. Tyto tkaniny dokážou odrážet elektromagnetické vlny a vytvářet ochrannou bariéru kolem elektronických zařízení.

#### Stříbrná vlákna

Tkaniny vyrobené ze stříbrných vláken mají vysokou elektrickou vodivost a také vykazují vlastnosti elektromagnetického stínění. Stříbro je dobrým vodičem elektriny a dokáže efektivně odvádět elektromagnetické vlny.

#### Hliníková vlákna a měděná vlákna

Hliníková vlákna mají výhodu nízké měrné hmotnosti, zatímco měděná vlákna nabízejí nejvyšší vlastní elektrickou vodivost ze všech kovů. Oba tyto materiály však za normálních podmínek okolního prostředí podléhají povrchové oxidaci.

#### Uhlíková vlákna

Textilie s obsahem uhlíkových vláken představují další efektivní možnost pro elektromagnetické stínění. Uhlíková vlákna vykazují vysokou elektrickou vodivost a zároveň mají schopnost absorpce, což přispívá k efektivnímu pohlcování elektromagnetických vln. Tyto vlastnosti umožňují textiliím s uhlíkovými vlákny poskytovat účinnou ochranu proti elektromagnetickému rušení v různých aplikacích, včetně elektroniky, zdravotnických zařízení a vojenských systémů [6, 10, 13, 14].

### Vlákna z vodivých polymerů

Tato vlákna jsou vyrobeny z polymerů (například PANI, PEDOT), které obsahují vodiče nebo konjugované molekuly, což umožňuje přenos elektrického proudu. Díky své flexibilitě a odolnosti se vlákna z vodivých polymerů používají v široké škále aplikací, včetně elektroniky, textilního průmyslu a biomedicíny [6, 10, 13, 14].

#### 1.2.2 Textilní struktury povrstvné vodivou komponentou

Přírodní nebo syntetická vlákna se na EMS samostatně nepoužívají, protože například bavlna, polyester, polyamid, polyakrylonitril a acetát celulózy vykazují velmi nízkou elektrickou vodivost za suchého stavu, a tudíž i nízké EMS [12]. Umělá vlákna jsou vysoce hydrofobní. To ale nelze tvrdit u přírodních vláken, která jsou hydrofilní a dokážou sorbovat určité množství vody, která zapříčiní mírné zvýšení elektrické vodivosti materiálu [10].

K získání potřebných finálních vlastností různých materiálů, jako je například EMS a pružnost, probíhá mísení kovových vláken s přírodními nebo syntetickými vlákny. Kovová vlákna zastávají EMS vlastnost a například přírodní vlákno, bavlna, snižuje vzájemné tření vláken v textili [10, 11] a dodává výsledné textilii další požadované typické textilní charakteristiky, jako je vzhled, omak, prodyšnost, nízká hustota, nízká ohybová tuhost, atd. Plošné textilie je možno dělit na: tkané, pletené a netkané. Vedle mísení lze také využít technik pokovování, jako je například chemické a elektrochemické. Tento proces zahrnuje aplikaci tenké vrstvy elektricky vodivého materiálu na povrch elektricky nevodivé textilie pomocí různých technik, jako je například napařování, nanášení, laminace nebo mísení ve formě sypkých listů, sítí, pokovovacích povlaků, prášků plněných v polymerním kompozitu nebo samostatných vláken. Výsledná textilie má schopnost vést elektrický proud, což umožňuje různým elektronickým zařízením nebo senzorům interagovat s tělem nebo okolním prostředím. Tyto vodivé textilie nacházejí široké uplatnění v oblastech jako je nositelná elektronika, zdravotní péče, ochranné oblečení a mnoho dalších, kde je vyžadována kombinace flexibilního a pohodlného textilního materiálu s elektrickou vodivostí [6, 11, 15].

### 1.2.3 Rozdělení textilií dle umístění vodivé komponenty

#### Nástřík

Vodivý povlak roztoku PET s příměsí 51 % hmotnostních pevných látek stříbra, který je nanesen na textilii. Poskytuje vyšší stínění elektromagnetického pole pro frekvenci 1-10 GHz, podle tloušťky nástříku. Například tloušťkou nástříku 1 mm se dosáhne EMS až 70 dB [8].

#### Pokovená ultratenká netkaná textilie

Jedná se o pokovení textilie zhotovené z materiálu PES, PAD, PP, skleněných vláken nebo viskózy kovovou vrstvou z Cu, Sn a Ni. Textilie se vyrábí v pásech netkané textilie, se kterým se nadále pracuje. Pro lepší stínící účinnost se mohou pásy vrstvit, natáčet a dosáhnout tak EMS od 53 do 73 dB při frekvenci 1,5 GHz [11].

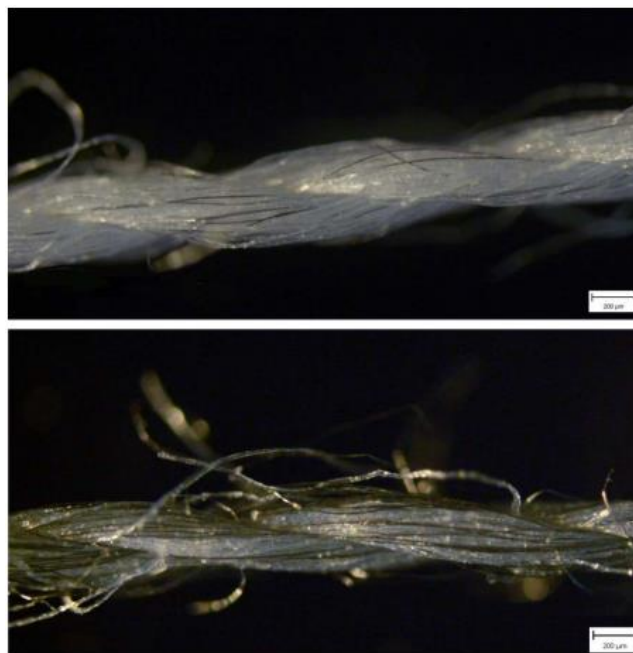
Pokovování vláken a textilií je obvykle založeno na metodách, jako je laminování hliníkovými fóliemi, barvení sulfidem mědi nebo bezproudové pokovování určitými kovovými složkami. Bez elektronické pokovování je neelektrolytická metoda nanášení kovů z roztoku, kterou lze vysvětlit pomocí teorie smíšeného potenciálu, kombinací oxidačních a redukčních procesů [10].

#### Hybridní pletenina

Kovový drát, například nerezová ocel, je pleten samostatně nebo společně s bavlněnou přízí. Umístění kovových součástí v pletené struktuře je hlavním faktorem určujícím schopnost stínění pleteniny. Podle výzkumu vykazuje nejvyšší stínící účinnost žebrová pletenina struktury Milano. Pro jednu vrstvu pleteniny se EMS pohybuje okolo 10 dB při frekvenci 0,3 GHz, kde závisí na uspořádání filamentů (buď je kovový drát přikládán souběžně s přízí nebo se střídají po řádcích). Při dvou vrstvách položené paralelně na sebe se EMS pohybuje okolo 13-15 dB. Při natočení druhé vrstvy o 90° se EMS pohybuje okolo 20-25 dB [16].

### Multifunkční kovové kompozitní textilie

Příze jsou složeny z konvekčního PP vlákna a různých obsahů stříží kovového vlákna. EMS se liší podle příměsi kovových vláken v přízi, kde 75 % komponentu a 25 % PP vlákna vykazuje nejvyšší stínící účinnosti, která je 50,5 dB pro frekvenci 1,5 GHz. Pro nejnižší poměr vláken 1 % kovových příměsí a 99 % PP EMS vykazuje účinnost 13,16 dB při 1,5 GHz [13].



Obrázek 5: Mikroskopický snímek dvou různých přízí [13]

Na Obrázku 5 je mikroskopický pohled na dvě příze různého poměru složení komponent. Horní pohled je pro přízi s poměrem 15 % kovových a 85 % PP vláken. Spodní pohled ukazuje složení příze 60 % kovových a 40 % PP vláken [13].

### Epoxidové kompozity plněné uhlíkovými vlákny

Autoři článku popisují textilií vyrobenou z uhlíkových vláken jako tkanina plátňové vazby, která bude využita jako plnivo epoxidového kompozitu. Jemnost jedné uhlíkové pásky se rovná 196 tex pro útkové a osnovní nitě. EMS se liší podle dostavy osnovy a útku, čím vyšší je dostava osnovy, tím vyšší je elektromagnetická stínící účinnost. Kompozity vykazují schopnost stínit 12–52 dB při 1,5 GHz. Například kompozit s dostavou osnovních a útkových rovingů 18 dm<sup>-1</sup> dosáhl EMS 36 dB při frekvenci vln 1,5 GHz [17].

### 1.3 Komerčně dostupné elektromagneticky stínící textilie

#### NaturalShield

Stínící textilie na Obrázku 6 je typická vzhledem na lící straně podobným běžným textiliím, a i měkkým omakem. Jedná se kombinaci bavlny na lící straně a nanesené vrstvy stříbra na straně rubní. Tato pokovená tkanina je vhodná například pro oděvy, závěsy, ložní prádlo a všude, kde je vyžadováno EMS bez drsnosti metalizované strany. Stínící účinek se pohybuje v rozmezí od 20 do 30 dB a 100 MHz až 2,2 GHz [10].



Obrázek 6. NaturalShield [10]

#### FlecTron

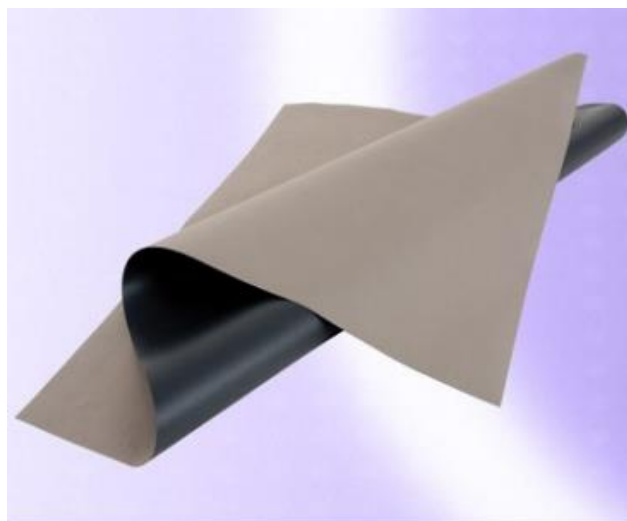
Strukturou ripstop tkanina, viz Obrázek 7, s nízkým povrchovým elektrickým odporem a tloušťkou menší než 1,5 mm. Tkanina je vyrobena z kombinace polyesteru a jeho pokovením mědí. Je vysoce ohebná, odolná a lze s ní manipulovat jako s klasickou textilií. Používá se pro výrobu krytů nebo oděvů [10].



Obrázek 7. FlecTron® [10]

### **FlecTron® -N**

Stejná EMS jako u FlecTron ale díky přidavku niklu k celkové kombinaci mědi a polyesteru je odolnější vůči dehtování, ale také je nebezpečný pro kontakt s pokožkou. Proto se s ním musí pracovat v ochranných rukavicích. Využití je hlavně v průmyslu. Vzhled textilie odpovídá znázornění na Obrázku 8 [10].



*Obrázek 8. FlecTron® -N [10]*

### **See-Through Conductive Fabric**

Elastická nylonová pletenina potažena stříbrem. Stínící účinnost je 67 dB při 1 MHz nebo 33 dB při 1 GHz, přičemž se její EMS účinnost zvyšuje při uzemnění. Lze ji použít jako podšívku do vesty, kryt mikrovlnné trouby nebo monitoru a různých domácích spotřebičů. Nevýhodou je však opotřebení stříbra na vrchu tkaniny [10]. Na Obrázku 9 je znázorněno, proč pletenina nese anglické označení See-through.



*Obrázek 9. See-Through Conductive Fabric [10]*

### Meftex

Základem pro tuto textilii je polyesterová netkaná textilie Milife, která je pokovena mědí nebo niklem. Vyrábí se ve třech variantách, kde je rozdílem množství naneseného kovu na plochu textilie [18]. Netkaná textilie Meflex disponuje následujícími vlastnostmi, viz Tabulka 1 a její vzhled je totožný, jako tomu je na Obrázku 10.



Obrázek 10: Meftex [18]

Tabulka 1: Obchodní rozdělení vlastností textilie Meftex

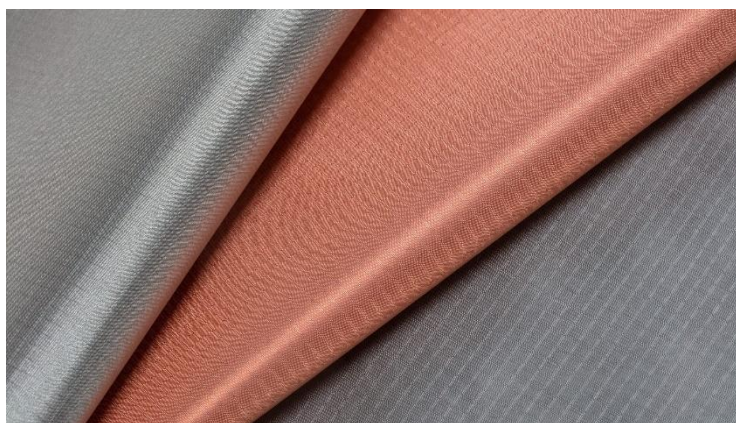
Vlastnost	Meftex 10	Meftex 20	Meftex 30
Množství kovu [g/m <sup>2</sup> ]	3±1	5±1	7±1
Plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	13±1	25±1	37±1
EMS [dB] (30 MHz <math><f</math> <math><20</math> GHz)	Až 60	60	65

### Shieldex

Textilie od společnosti Shieldex jsou dostupné ve formě tkanin, pletenin a netkaných materiálů. Vodivé tkaniny jsou převážně využívány jako technické textilie v oblasti textilních vodičů, senzorové technologie a stínění elektromagnetického záření ve frekvenčním rozsahu 0,2 GHz až 14 GHz. S ohledem na svou nízkou váhu jsou vodivé tkaniny používány jako tkaniny pro elektromagnetickou kompatibilitu v různých technických produktech [19].



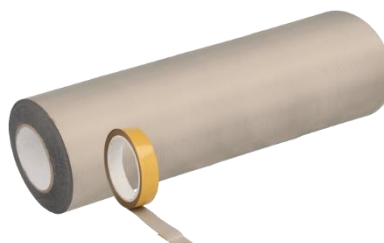
Produkty jsou vyrobeny z vodivých vláken. Tato vodivá vlákna jsou vyrobená z kombinace různých materiálů, včetně vodivé komponenty jako je stříbro, měď, nikl nebo cín a syntetických vláken, kterými jsou například polyester nebo nylon. Vizuální vzhled kombinací materiálů pokovení lze pozorovat na Obrázku 11. Tyto materiály jsou navrženy tak, aby poskytovaly vysokou úroveň elektromagnetické stínění, což znamená, že jsou schopny absorbovat nebo odrazit elektromagnetické signály a minimalizovat jejich průnik do nebo z textilních produktů [19].



Obrázek 11: Shieldex [19]

### **Holland Shielding**

Textilie s elektricky vodivými vlastnostmi je vyrobena z polyesteru, který je metalizován mědí a niklem, což z ní činí mimořádně pevný a flexibilní materiál. Tato textilie projevuje vodivost ve všech směrech, tj. podél os X, Y a Z. Dodává se buď jako tkanina nebo jako pásek (viz Obrázek 12) s tlakově citlivým lepidlem, což umožňuje snadnou aplikaci na plastová pouzdra a zakrývání komplexních tvarů. Vodivá textilie má nízký kontaktní odpor, a ve verzi pásky nabízí vynikající lepicí sílu [20].



Obrázek 12: Holland Shielding [20]

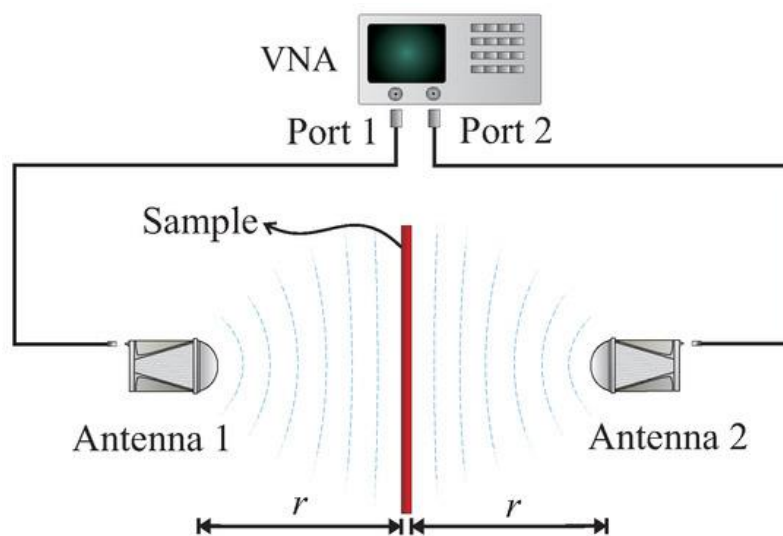


## 1.4 Metody hodnocení elektromagnetického stínění textilií

Účinnost stínění je klíčovým parametrem, který často určuje rozsah použití daného materiálu. I když je možnost určit účinnost stínění pro kovové štíty pouze na základě znalosti elektrických a magnetických parametrů materiálů, pokud jde o materiály obsahující propletená kovová vlákna nebo grafitová vlákna, plastové materiály s metalizovaným povrchem nebo kompozitní materiály, je nutno k určení účinnosti stínění pouze její skutečné měření. Existuje několik dostupných metod, které umožňují měřit účinnost stínění. Pro plošné stínící konstrukce však v současnosti neexistují žádné normy, které by definovaly hodnocení malých vzorků o velikosti pouze několika desítek centimetrů. Proto se používají modifikace zkoušek dle norem MIL-STD-285 a ASTM D4935 [21].

### Free-Space Method (FSM)

FSM se běžně používá u stavebních materiálů, za účelem odhadu jejich vlivu na telekomunikace. Rozpoložení jednotlivých součástí měřící metody je znázorněno na Obrázku 13. Antény a jejich prostor lze považovat za dvouportovou síť, které je charakterizováno chování svými čtyřmi S-parametry ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ). Naměřené parametry jsou ovlivněny okolním prostorem, kde probíhá odraz elektromagnetických vln [22].



Obrázek 13. Free-Space method [22]

### Zařízení vyvinuto laboratoří Federal University

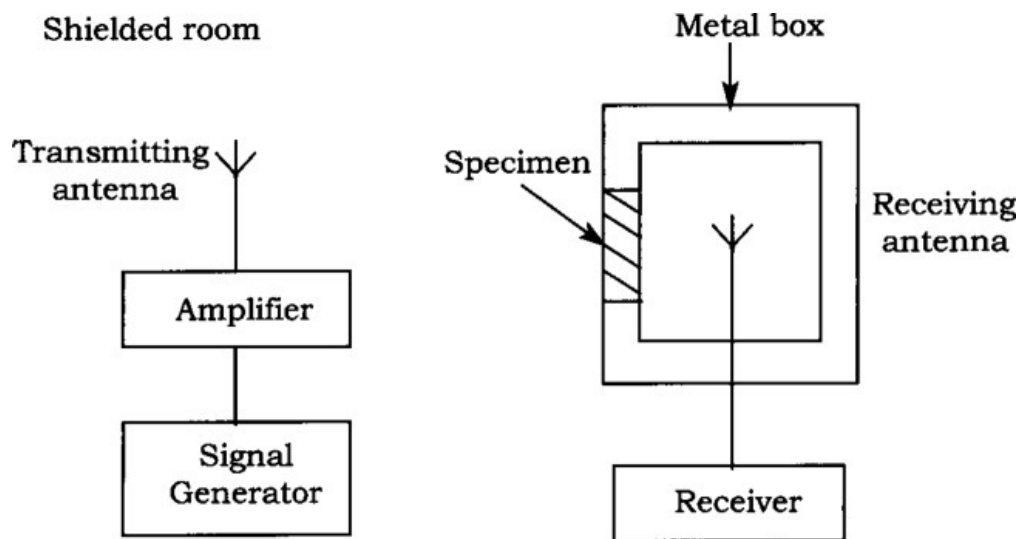
Toto zařízení je vyvinuto a aplikováno laboratoří Federal University of Minas Gerais. Konstrukce zařízení je z nevodivých materiálů, aby se zamezilo odrazu vln, tudíž se jedná o přesnější měření než u FSM. Zařízení neobsahuje elektromagnetické absorbéry na vzdory ceny výroby. Na obrázku 7 je na levé straně skica zařízení a na pravé se nachází jeho foto. Rozsah jeho měření je omezen pouze anténou a přijímačem, ale funguje na frekvenci 1-6 GHz nebo 1-18 GHz [22].



Obrázek 14: Zařízení FUoMG [22]

### Shield box method

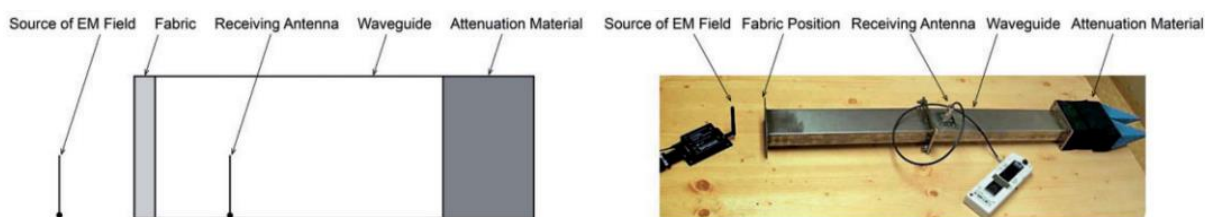
Široce používána metoda pro srovnávací měření těles z různých materiálů stínění. Zařízení se skládá z kovové krabice, která je znázorněna na Obrázku 15, a elektricky těsného svaru. Krabice má na jedné straně otvor pro vzorek a je vybavena přijímací anténou. Vysílací anténa je umístěna vně boxu, kde se její vysílání přijímá přes otevřený port nebo pomocí zkušebního vzorku nasazený přes port. Nevýhodou této metody je obtížné dosažení elektrického kontaktu mezi krabicí a vzorkem. Další nevýhodou je omezená vysílací frekvence, která dosahuje pouze 500 MHz [6].



Obrázek 15. Shield Box Method [22]

### Modifikace Shield Box metody

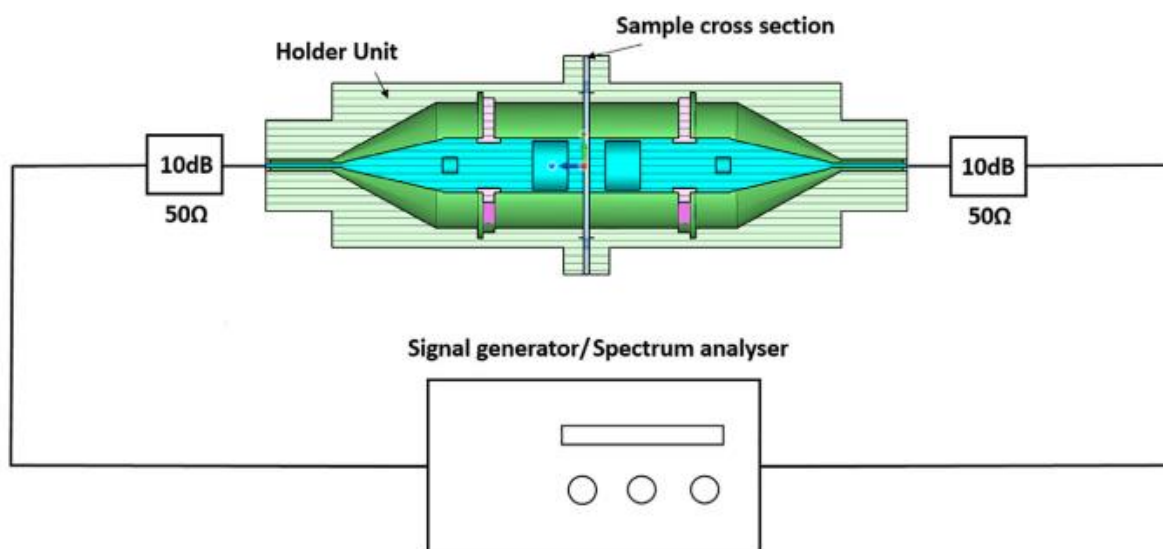
Metoda je primárně určena pro rychlá srovnávací měření nově vyrobených vzorků. Hlavní výhodou je to, že není nutná úprava zkoušeného vzorku na předepsané rozměry nebo speciální tvar. Tato modifikace zařízení, znázorněného na Obrázku 16, byla zhotovena na Technické Univerzitě v Liberci. Pro úzké frekvenční pásmo je třeba vlnovod specifických rozměrů. Tato metoda byla vyvinuta jako rychlejší řešení koaxiálního přenosu [23].



Obrázek 16. Modifikované zařízení TUL [23]

### Metoda koaxiálního přenosu

Metoda koaxiálního přenosového vedení pro měření účinnosti stínění překonává omezení techniky stíněné skříně a je nyní preferovanou metodou. Hlavní výhodou této techniky je skutečnost, že výsledky získané v různých laboratořích jsou srovnatelné. Další výhodou je hodnocení stínění na relativně širokém frekvenčním pásmu,  $30 \text{ MHz} < f < 1,5 \text{ GHz}$ . Kromě toho může být koaxiální přenosové vedení také použito k rozlišení dat na odražené, absorbované a přenášené složky. Se standardními koaxiálními kabely lze dosáhnout dynamického rozsahu asi 80 dB. Americká společnost pro testování a materiály, ASTM D4935, přijala techniku koaxiálního přenosového vedení jako uznávanou standardní metodu pro měření účinnosti stínění [6, 24]. Schéma metody koaxiálního přenosu je znázorněno na Obrázku 17.

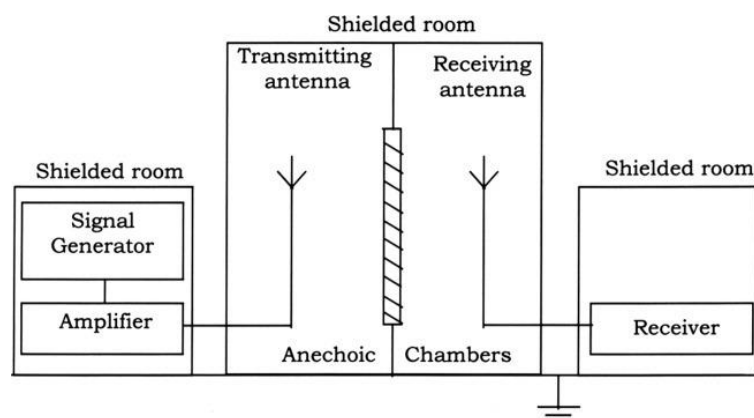


Obrázek 17. Koaxiální měření [9]

Testy se provádějí na malých vzorcích kruhového tvaru. Měření lze provádět na specifických frekvencích pomocí generátoru modulovaného signálu, krystalového detektoru a laděného zesilovače nebo alternativně v rozmítaném režimu s použitím sledovacího generátoru a spektrálního analyzátoru jako přijímače. V režimu bod po bodu se systém nejprve nastaví na danou frekvenci bez držáku vzorku v lince. Variabilní atenuátor se nastaví na maximum a zaznamená se úroveň signálu. Poté se do linky vloží držák vzorku a útlumový člen se redukuje, dokud se nezaznamená stejná hodnota jako předtím. Útlum získaného signálu je přímým měřítkem účinnosti stínění vzorku [6, 9, 21, 24].

### Shield room method

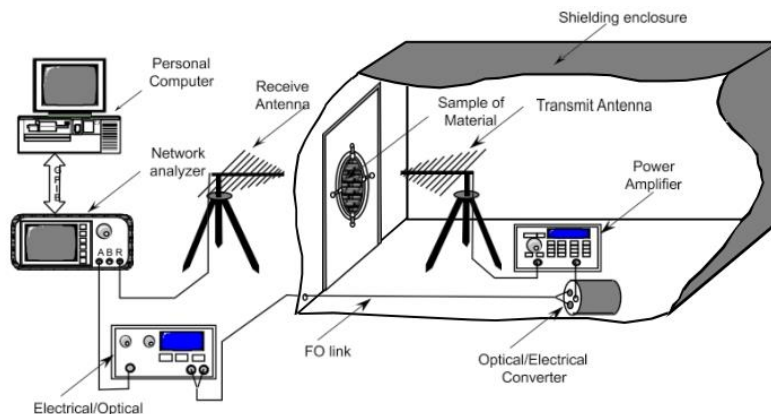
Metoda stíněné místnosti, viz Obrázek 18, je nejsofistikovanější metodou a byla vyvinuta, aby překonala omezení metody Shield box z Obrázku 15. Obecný princip je stejný jako u metody Shield box s tím rozdílem, že každá ze součástí měřicího systému, generátor signálu, vysílací anténa, přijímací anténa a záznamník jsou izolovány v oddělených místnostech, aby se eliminovala možnost rušení. Kromě toho jsou antény umístěny v bezodrazových komorách velikosti místnosti a velikost zkušební vzorku je značně zvětšena [6].



Obrázek 18. Shield room method [6]

### Metoda MIL-STD-285

Tato metoda byla vyvinuta v USA pro vojenské účely a byla publikována v roce 1956. Je to pravděpodobně nejčastěji odkazovaná norma, která se zabývá měřením útlumu stíněných krytů v rozsahu frekvence 100 kHz až 10 GHz. Zdroj signálu je umístěn uvnitř testované skříně a přijímací zařízení je vně skříně, viz Obrázek 19. Měřený vzorek stíní otvor krytu. Nevýhodou posledních dvou zmíněných metod je požadavek na velikost vzorku, který může být větší než 0,5 m [21].



Obrázek 19. Schéma MIL-STD-285 [21]

## 2 Experimentální část

Experimentální část práce si klade za cíl analyzovat osm různých typů textilií, které byly zvoleny na základě literární rešerše a průzkumu trhu. Hlavním požadavkem na textilii je její dostačující elektromagnetická stínící účinnost. Mezi další požadavek patří dostatečná mechanická odolnost vůči materiálu, který byl aplikován na elektrickou součástku. Pilotním testovaným materiálem byla hliníková lepicí páska, která sice splňovala požadavek na výši elektromagnetického stínění, ale docházelo k protrhnutí při kompletaci samotné součástky do jejího ochranného domku.

Na základě literární rešerše bylo vybráno osm zkušebních vzorků různých strukturních vlastností, použitého materiálu pokovení, plošné hmotnosti a tloušťky. Pro tento experiment byly použity vzorky z dvou firem, které byly ochotné poskytnout testovací vzorky. Jedná se o firmu MEFTEX, ze které byly použity tři druhy netkané pokovené textilie a firmu Shieldex, kde bylo ze širokého sortimentu vybráno dohromady pět vzorků zastupující pokovené netkané textilie, pleteniny a tři tkaniny různého materiálového složení.

Cílem experimentální části je vybrat elektricky vodivou textilii, která disponuje nejlepší kombinací stínící účinnosti a mechanické odolnosti. Za tímto účelem bylo zvoleno hodnocení textilií pomocí přerušného koaxiálního vedení, a to na dvou frekvenčních pásmech v celkovém rozsahu: 30 MHz - 6 GHz. Po hodnocení mechanické odolnosti byl zvolen test průniku čepelí. Zvolený materiál bude následně testován v terénních podmínkách, kde se zaznamená jeho chování při působení vnějších vlivů a potvrdí se jeho funkčnost.

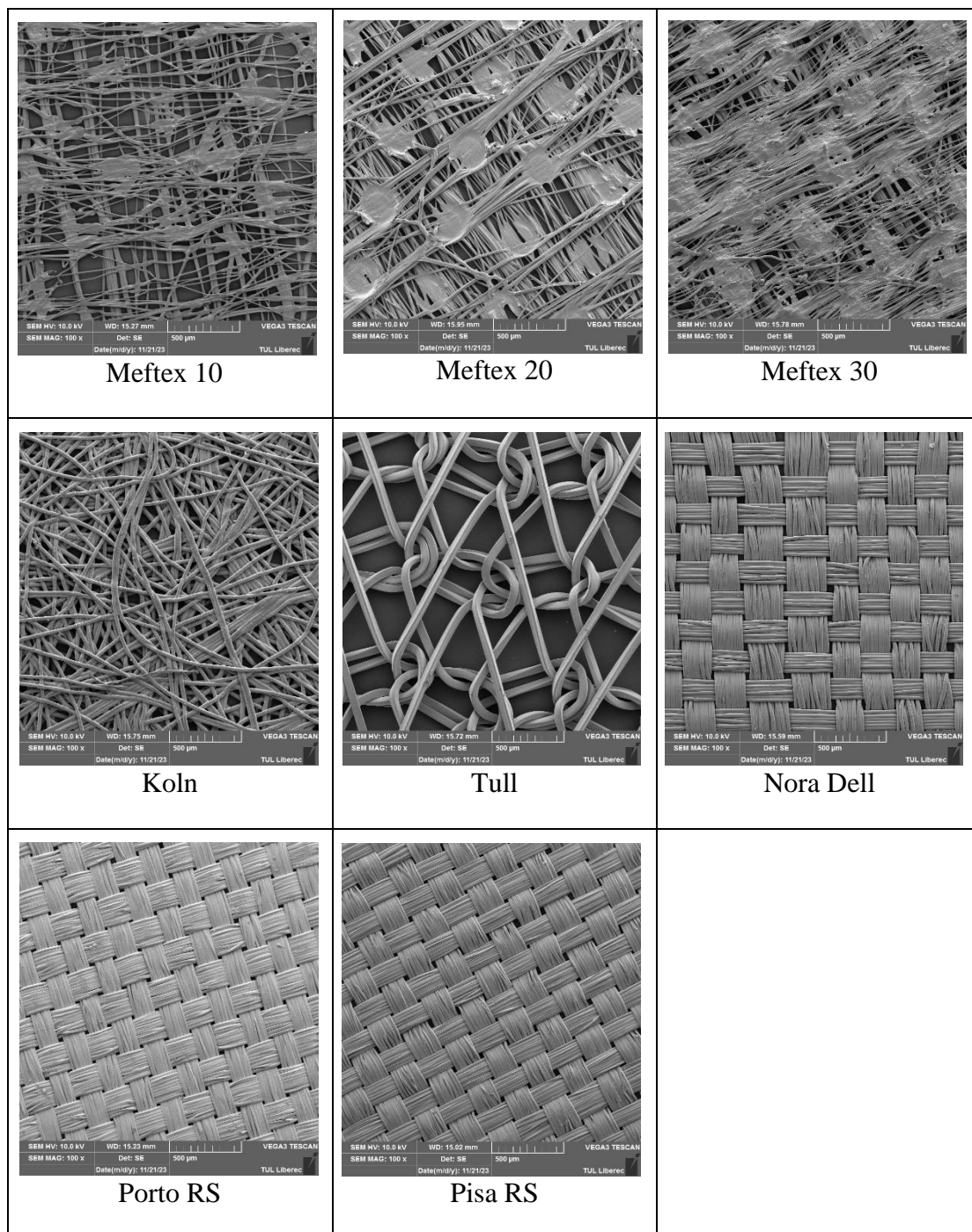
Posledním cílem experimentu je navrhnout přípravek, který usnadní manipulaci s textilií při její úpravě z plošné textilie do formy s kruhovým průřezem. Tato úprava pomocí přípravku je tvořena za účelem minimalizace časové náročnosti při montáži na výrobní lince pro danou elektrickou součástku.

### 2.1 Použité materiály

Vybrané vzorky byly popsány pomocí základních textilních charakteristik, jako je: struktura textilie, materiál substrátu i pokovení, tloušťka (ČSN EN ISO 5084,  $n = 10$ ), plošná měrná hmotnost (ČSN EN 12127,  $n = 10$ ) a průměr vláken (pomocí Image J,  $n = 20$ ).



Dále byly pořízeny snímky z elektronového mikroskopu, aby byla zjištěna struktura pokovené textilie, jako je možno vidět na Obrázku 20. Všechny snímky jsou k dispozici v Příloze 1 tohoto dokumentu.



Obrázek 20: SEM snímky pokovených textilií se zvětšením 100x

Tabulka 2: Základní charakteristika pokovených vzorků

	Tloušťka [mm]	Průměr vláken [μm]	Plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	Materiál pokovení	Materiál substrátu	Struktura
<b>Meftex 10</b>	0,05	8,32	13,00	Cu + Ni	100% PES	NT
<b>Meftex 20</b>	0,07	8,21	25,00	Cu + Ni	100% PES	NT
<b>Meftex 30</b>	0,11	6,20	37,00	Cu + Ni	100% PES	NT
<b>Koln</b>	0,12	25,16	95,00	Cu	100% PAD 6.6	NT
<b>Tull</b>	0,20	58,35	33,00	Ag	100% PAD 6.6	Pletenina
<b>Nora Dell</b>	0,10	21,34	100,00	Ag + Cu + Ni	100% PAD 6.6	Tkanina
<b>Porto RS</b>	0,09	13,46	120,00	Cu + Sn	100% PES	Tkanina
<b>Pisa RS</b>	0,09	11,47	80,00	Cu + Ni	100% PES	Tkanina

V Tabulce 2 jsou zaznamenány průměrné hodnoty jednotlivých charakteristik včetně materiálu pokovení a materiálu pokovované základní textilie, který uváděl distributor na oficiálních stránkách. Z provedeného porovnání vyplývá, že textilie Tull vyčnívá velikostí průměru vláken. S ohledem na tloušťku vzorků Tull a Koln, která přímo ovlivňuje ohybovou tuhost vzorků, se zdá, že tyto textilie nebudou vhodné pro určené použití plnicí funkci ochranného obalu.

## 2.2 Testování SE vzorků pro frekvence do 3 GHz

První testování stínící účinnosti vzorků proběhlo na přístroji Rohde & Schwarz Vector Network Analyzer ZNC3 s držákem vzorků Electro Metrics EM2107-A, který je určený pro hodnocení SE při frekvencích 30 MHz do 3GHz [25]. Toto měření je v korespondenci s normou ASTM D4935-10 a poslouží k výběru tří vzorků s nejvyšším SE, které budou zajímavé pro finální použití. Vzorky s nižší stínící schopností nebudou podrobovány dalším zkouškám.



Obrázek 21: Vector Network Analyzer ZNC3 [25]

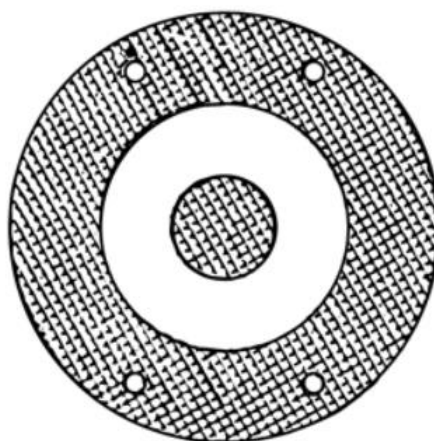


Uspořádání přístroje, na kterém byla prováděna zkouška (Obrázek 22), je téměř totožné se schématem na Obrázku 17.



Obrázek 22: Vektorový přístroj katedry materiálového inženýrství

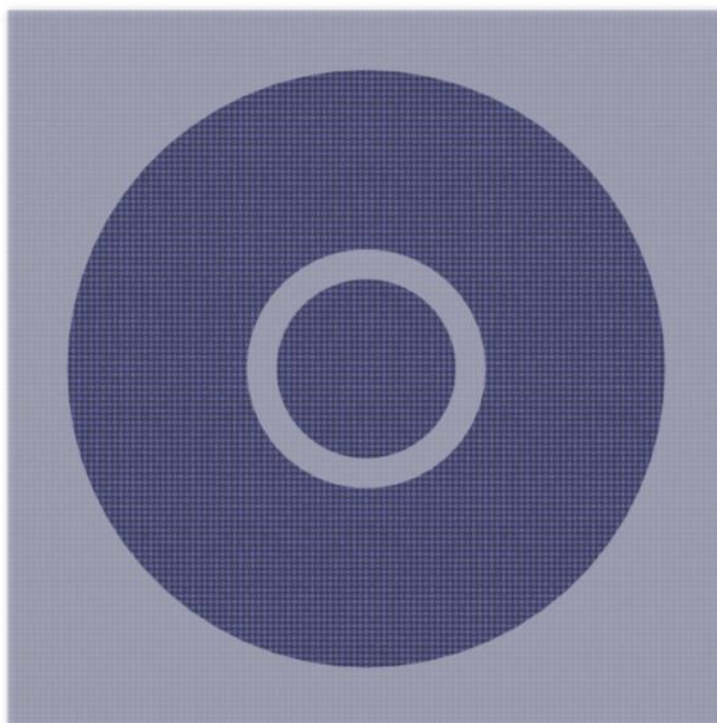
Dle předpisu normy ASTM D4935-10 je nutné dodržovat její postup a uložení vzorku na měřicí hlavici, která má z pohledu půdorysu tvar dvou vepsaných kruhových součástí, jako tomu je na Obrázku 23, přičemž vnější průměr hlavice je cca 13,5 cm Z normy vyplývá, že je třeba pokrýt celou měřicí hlavici zkoušeným materiálem.



Obrázek 23: Půdorys hlavice koaxiální metody [24]

### 2.2.1 Vliv velikosti vzorku na stínící účinnost

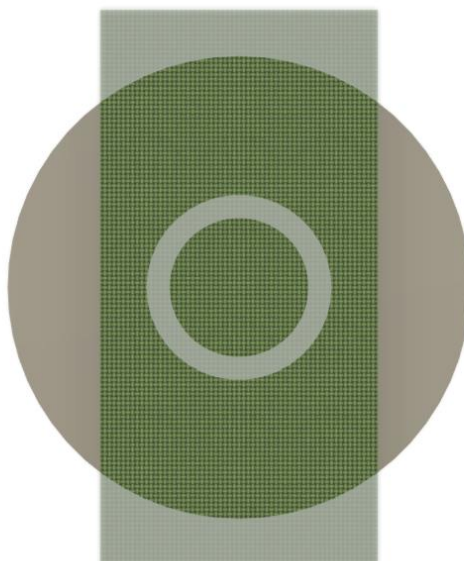
Jak již bylo zmíněno, při provádění měření musí být hlavice přístroje plně zakryta testovaným materiálem, jako tomu je na Obrázku 24, aby se dosáhlo reprezentativních výsledků. Část testovaných vzorků byla k dispozici v nedostatečné šířce, aby se splňoval předpoklad přesného odečtu hodnot, a proto byl proveden experiment, zda je významný statistický rozdíl v měření elektromagnetické účinnosti vzorku: (a) plného (cca 20 x 20 cm), (b) úzkého (cca 8 x 20 cm), (c) nastaveného (dva vzorky o velikosti 8 x 20 cm spojené pomocí lepicí pásky). Výsledky jsou k nalezení v dalších podkapitolách.



Obrázek 24: Normované zakrytí hlavice vzorkem

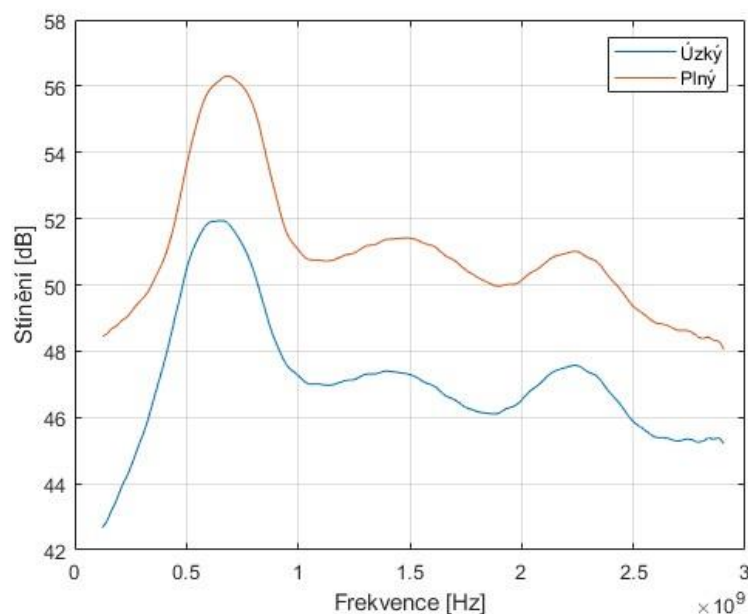
#### Test vlivu úzkého vzorku na SE

Úzký vzorek je označení pro materiál, který svými rozměry neumožňuje plné zakrytí testované hlavice, jako tomu je na Obrázku 24. Pro tento test byla vybrána textilie Meftex 10. Zakrytí hlavice přístroje za použití těchto materiálů je vyobrazeno na obrázku 25, kdy je důležitým aspektem umístění vzorku tak, aby zakrýval prostor mezikruží dvou částí, které jsou znázorněny na půdorysném pohledu Obrázku 23.



Obrázek 25: Uložení krátkého vzorku na testovací hlavici

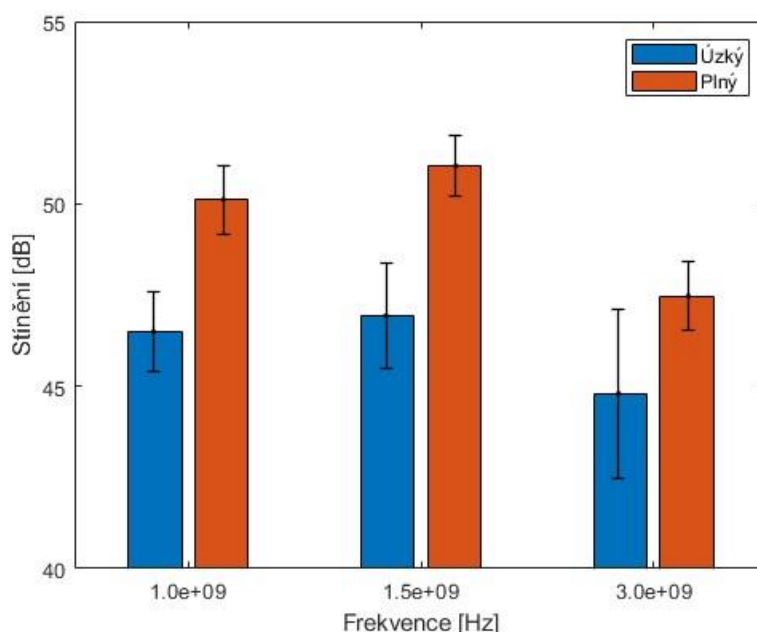
Pro získání dat bylo provedeno deset měření pro každou velikost vzorku. To znamená, že bylo naměřeno deset měření úzkého provedení (šíře 8 cm) a deset měření správného zakrytí hlavice, plným vzorkem tak, jako je tomu na Obrázku 24. Pro každý soubor dat byla vytvořena průměrná hodnota v celém frekvenčním rozsahu. Na Obrázku 26 jsou zobrazeny průměrné hodnoty SE na celém měřeném frekvenčním pásmu.



Obrázek 26: Grafické znázornění průměrných hodnot SE vzorku plného a úzkého

Jak je vidět z Obrázku 26, průběh SE je velmi podobný pro obě testované varianty, ale je viditelné, že tam je posun. Na základě tohoto vyobrazení není možné určit, zda se jedná o statisticky významný nebo nevýznamný rozdíl, a proto je potřeba provést další testovací metody.

Další vizuální možností zjištění významnosti vlivné proměnné, šířky vzorku, je vytvoření sloupcových grafů s 95% intervalem spolehlivosti průměrné hodnoty. Pro tento účel byla vybrána data z frekvenčního rozsahu, a to 1, 1,5 a 3 GHz. V těchto bodech se spočetla průměrná hodnota ze všech deseti měření pro každý vzorek a byla vynesena se do grafu s IS, jako tomu je na Obrázku 27.



Obrázek 27: Porovnání průměrných hodnot včetně 95% IS vzorků pro 3 vybrané frekvence vzorku plného a úzkého

Z Obrázku 27 je viditelné, že se 95% IS překrývají pouze u frekvence 3 GHz a u zbylých dvou jsou mimo dosah. Z tohoto grafické vyhodnocení by se dalo předpokládat, že vliv šířky vzorku byl potvrzen u dvou nižších frekvencí. Tento předpoklad bude potvrzen pomocí testování hypotéz.

Jako statistický nástroj byl zvolen párový t-test, který vzájemně otestuje SE při frekvenci 1 GHz obou vzorků. T-test byl vypočítán v programu MS Excel. Před samotným testováním byly zvolené hypotézy  $H_0$  a  $H_1$ , přičemž  $H_0$  představuje statisticky nevýznamný rozdíl mezi oběma průměrnými hodnotami a hypotéza  $H_1$  statisticky významný rozdíl.

Test je prováděn na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Tabulka 3: Párový t-test pro frekvenci 1 GHz pro SE vzorku plného a úzkého

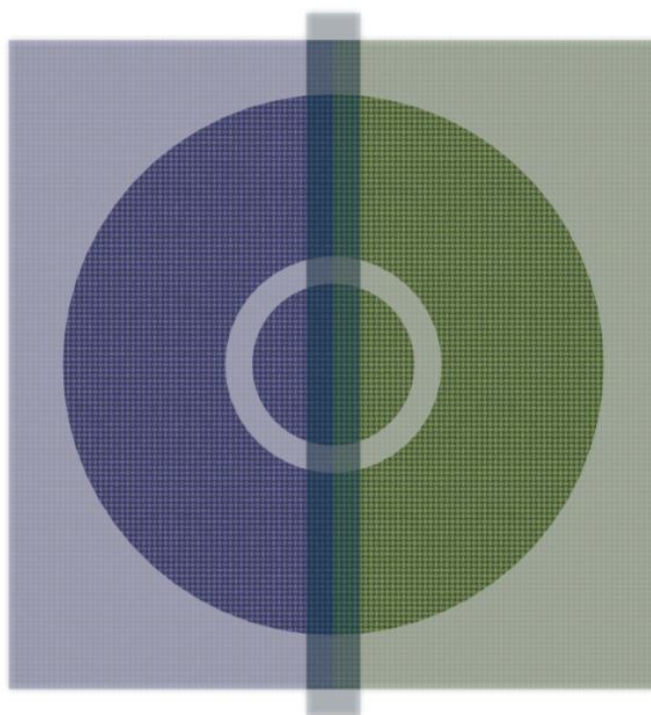
Předpoklad normální rozdělení dat			
	Soubor 1	Soubor 2	Hypotézy
Střední hodnota	46,50	50,11	H0 t Stat < t krit (2)
Rozptyl	2,27	1,76	H1 t Stat >= t krit (2)
Pozorování	10,00	10,00	
Pears. korelace	-0,11		
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0,00		
Rozdíl	9,00		
<b>t Stat</b>	<b>5,40</b>		
P(T<=t) (1)	0,00		
t krit (1)	1,83		
P(T<=t) (2)	0,00		
<b>t krit (2)</b>	<b>2,26</b>		

Sledované výsledné hodnoty v Tabulce 3 jsou **t Stat** a **t krit (2)**. Na pravé straně tabulky jsou stanovené hypotézy, které rozhodnou o výsledku. Jelikož je hodnota **t Stat** větší jak **t krit(2)**, tak se na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  zamítá nulová hypotéza **H0** a přiklání se k alternativní hypotéze **H1**, tudíž je mezi hodnotami SE statisticky významný rozdíl.

S ohledem na výsledek je nutné najít jiné řešení naměření vzorků stínící textilie, který jsou k dispozici v úzkém provedení, protože tento styl nevyhovuje a data se nedají považovat za validní.

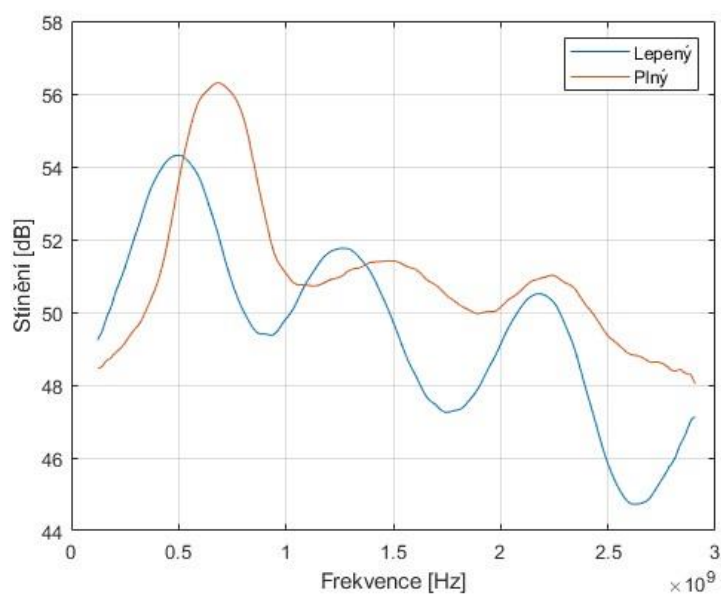
### Test vlivu nastavení (spojení) vzorku na SE

Vzorek označený jako nastavený nese označení spojení materiálu na dotek po celé délce jedné strany tak, aby výsledná plocha testovaného vzorku splňovala požadovanou potřebnou velikost k zakrytí celé hlavice přístroje, jako tomu je na Obrázku 24. Spojení dvou stejných vzorků proběhlo lepící nevodivou páskou tak, aby se v místě spoje vzorky nepřekrývaly a aby nevznikaly mezery. Tyto tři faktory hrají důležitou roli pro získání přesných dat.



Obrázek 28: Schéma spojení materiálu

Na Obrázku 28 je schéma nastavení vzorku tak, aby splňoval požadavek zakrytí celé hlavice. Spojený je stejný materiál, ve schématu jsou použity různé barvy, aby se kladl důraz na dva díly. Ke spojení byla použita již zmiňována lepicí páska, která protíná střed souřadného systému hlavice.

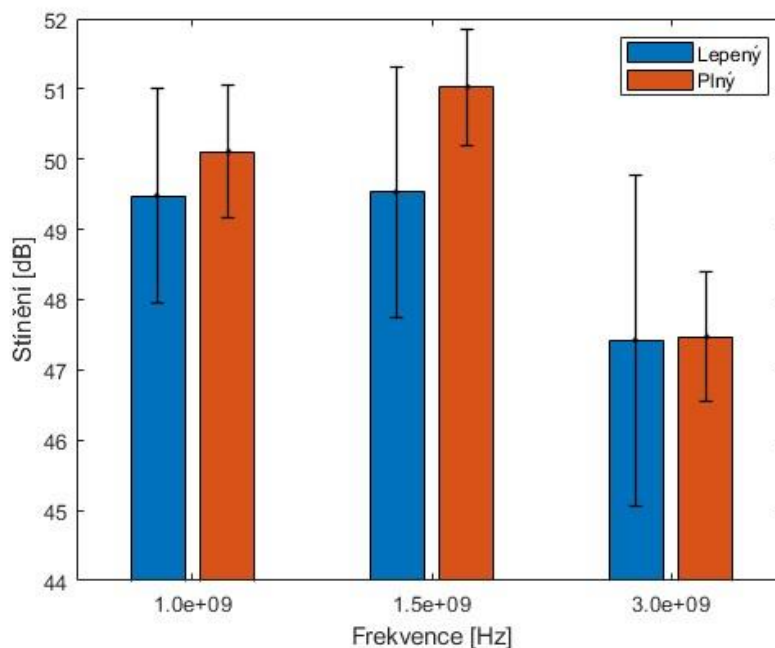


Obrázek 29: Grafické znázornění průměrných hodnot SE vzorku plného a lepeného



Pro tento experiment byla použita textilie Meftex 10. Cílem experimentu bylo zjistit, zda průměrné hodnoty SE vzorku nastaveného jsou stejné s průměrnými hodnotami SE vzorku plného a slepení vzorku lepicí páskou je vhodné řešení problému, který způsobuje nedostatečná šíře vzorku. Pro oba vzorky bylo provedeno deset měření SE na celém frekvenčním pásmu. Průběh SE je graficky vyobrazen na Obrázku 29, kde jsou vyneseny průměrné hodnoty z deseti měření obou vzorků pro jednotlivé frekvence. Z vizuálního hlediska průběhu SE je viditelné, že tyto dva druhy aplikace materiálu na hlavici jsou rozdílné, ale i tak mají podobný trend a jsou si znatelně blízké, protože se ve třech místech protínají. Velikost kolísání křivky lepeného vzorku je dána nepřesným nastavením hran dvou částí materiálu.

Pro přehlednější zobrazení se z průměrných hodnot průběhu SE se odečetly hodnoty stínícího účinku pro frekvenci 1, 1,5 a 3 GHz. Na obrázku 30 jsou pomocí sloupcového grafu zobrazeny průměrné hodnoty SE pro jednotlivé frekvence s 95% intervalem spolehlivosti.



Obrázek 30: Porovnání průměrných hodnot včetně 95% IS vzorků pro 3 vybrané frekvence vzorku plného a lepeného

Z Obrázku 30 je zřejmé, že se 95% IS překrývají pro všechny studované frekvence, tudíž lze považovat úpravu vzorků za statisticky nevýznamnou a je vidět, že slepení vzorku nemá statisticky významný vliv na SE. Pro potvrzení se data SE frekvence 1 GHz otestovala párovým t-testem. Vybraným testem se testuje hypotéza  $H_0$  oproti  $H_1$ .  $H_0$  představuje podobnost a statistickou nevýznamnost vlivu nastavení vzorků a  $H_1$  zastává rozdíl SE za statisticky významný. T-test se provádí na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  pomocí programu MS Excel.

Tabulka 4: Párový t-test pro frekvenci 1 GHz pro SE vzorku plného a lepeného

Předpoklad normálního rozdělení dat			
	Soubor 1	Soubor 2	Hypotézy
Střední hodnota	49,49	50,11	<b>H0</b> t Stat < t krit (2)
Rozptyl	4,57	1,76	H1 t Stat >= t krit (2)
Pozorování	10,00	10,00	
Pears. korelace	-0,30		
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0,00		
Rozdíl	9,00		
<b>t Stat</b>	<b>0,69</b>		
P(T<=t) (1)	0,25		
t krit (1)	1,83		
P(T<=t) (2)	0,50		
<b>t krit (2)</b>	<b>2,26</b>		

Vyhodnocení testu z programu MS Excel se zpracovalo stejným postupem jako u testu úzkého vzorku. Na pravé straně jsou stanovené hypotézy, které se určily před zahájením t-testu. Z uvedené rovnosti a nerovnosti je zřejmé, že hodnota **t Stat** je menší než předepsaná hodnota studentova rozdělení **t-krit (2)**, a proto se výsledek přiklání k hypotéze **H0**.

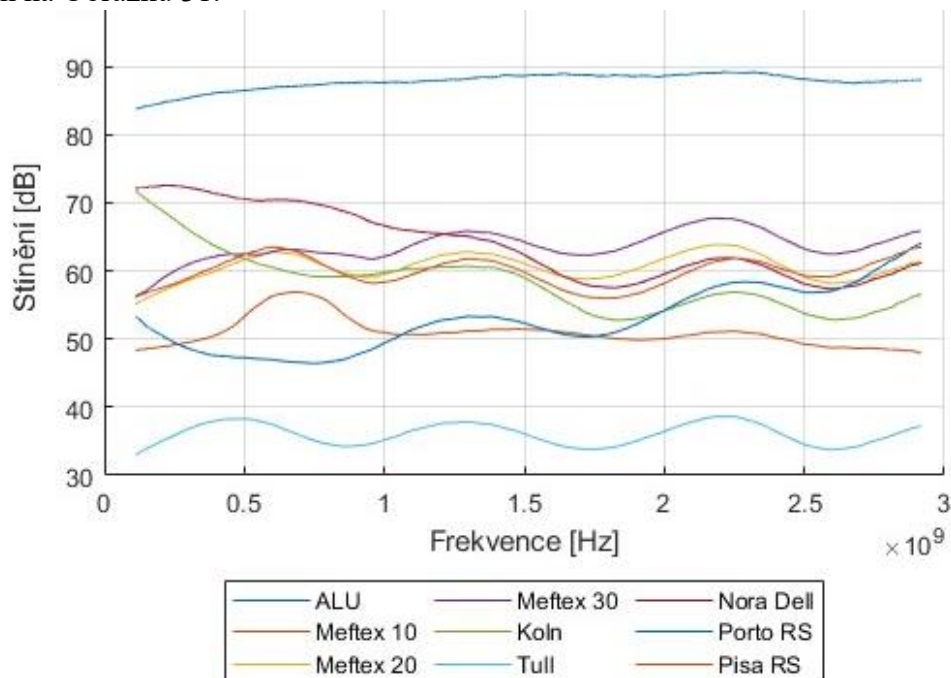
Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  se nezamítá hypotéza **H0**, tudíž rozdíl hodnot není statisticky významný a je zde možnost, měřit SE na upravených vzorcích, tzn. vzorcích užších, přiložených těsně k sobě a slepených pomocí lepicí pásky.

### 2.2.2 Porovnání stínící účinnosti vzorků

V této podkapitole bude proveden porovnání SE hodnocené na frekvenčním pásmu od 30 MHz do 3 GHz. Vzorky, které neměly dostatečnou šíři byly nastaveny postupem popsaným v podkapitole 2.2. Pro tento frekvenční rozsah se během jednoho měření odečetlo 2000 hodnot, které se následovně zpracovaly v programu Matlab a byly porovnány s referenčním materiálem označeným ALU. Pro každý vzorek bylo provedeno deset měření, ze kterých se vytvořilo grafické znázornění průběhu stínění v závislosti na frekvenci vysílače, které pomohlo k vybrání třech nejlepších vzorků pro další testování. Výsledek měření má selektovat tři vzorky, které dosáhnou nejvyšších hodnot SE a budou se nadále podrobovat měřením SE vyšších frekvencí a mechanické zkoušky.



Ze souboru dat pro jednotlivé vzorky byly stanovené průměrné hodnoty v celém frekvenčním rozsahu (2000 bodů). Závislost průměrných hodnot SE na frekvenci pro všechny vzorky je zobrazen na Obrázku 31.



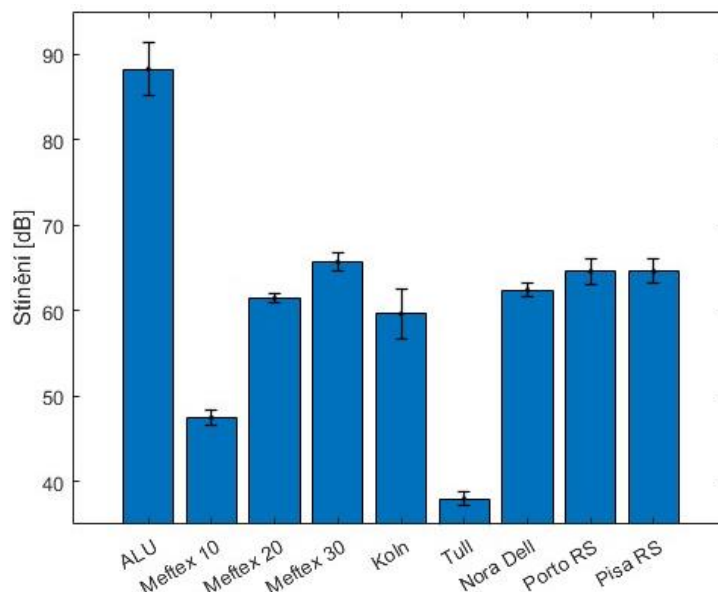
Obrázek 31: Grafické znázornění stínící účinnosti všech vzorků

Uvedené křivky prošly úpravou v programu Matlab, aby se zlepšila jejich vizuální čitelnost ve sjednoceném zobrazení. Jedná se o funkci `>> smoothdata()`. Výsledkem tohoto experimentu je zjištění, které tři vzorky jsou nejvhodnějšími kandidáty na další testování z hlediska SE pro frekvenci do 3 GHz. Odečtené byly proto hodnoty při maximální frekvenci, a to 3 GHz a byla vypočítána průměrná hodnota, spolu s směrodatnou odchylkou a 95% IS, jako tomu je v Tabulce 5. Tyto operace byly provedeny v programu MS Excel.

Tabulka 5: SE při frekvenci 3 GHz s 95% IS

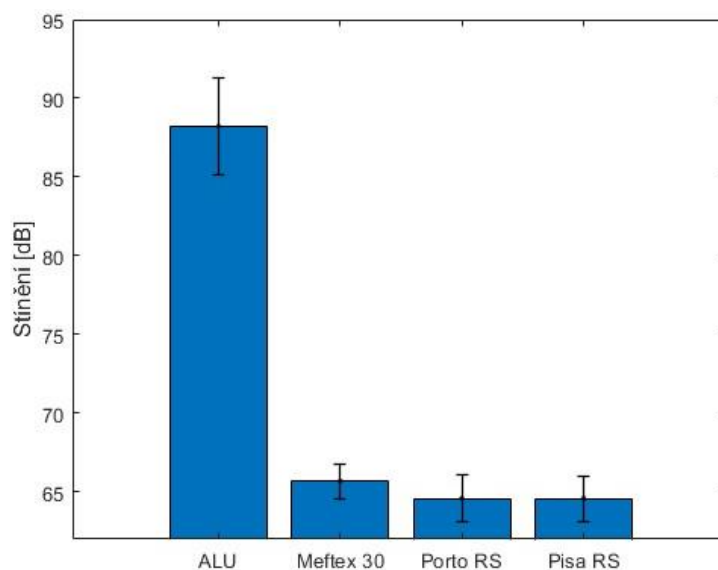
Frekvence 3,00E+09 [Hz]	ALU	Meftex 10	Meftex 20	Meftex 30	Koln	Tull	Nora Dell	Porto RS	Pisa RS
Stínění [dB]	88,23	47,47	61,47	65,69	59,60	37,97	62,42	64,58	64,59
Velikost	10,00								
Sm. odchylka [dB]	5,01	1,29	0,80	1,79	4,77	1,28	1,35	2,44	2,33
95% IS [dB]	3,10	0,80	0,49	1,11	2,95	0,80	0,84	1,51	1,44

Tabulka 5 může posloužit k verdiktu zkoušky, ale pro lepší vizuální přehled byly průměrné hodnoty SE vyneseny do sloupcových grafů spolu s jejich 95% IS, jak je znázorněno na Obrázku 32.



Obrázek 32: Grafické porovnání stínící účinnosti všech vzorků při frekvenci 3 GHz

Grafické znázornění výsledku měření (Obrázek 32), při působení maximální možné frekvence přístroje 3 GHz, pomohlo k vyhodnocení tří nejlepších kandidátů pro další testování. Vybrány byly textilie Meftex 30, Pisa RS a Porto RS. Předpoklad z kapitoly 2.1. potvrdil, že Tull nebude vhodným kandidátem. Dalším nevhodným vzorkem je Meftex 10, kde se dalo očekávat podle Tabulky 2, že vzorek s nejmenší plošnou hmotností nebude dosahovat podobných hodnot, jako ostatní, protože při stejném materiálovém složení disponuje minimálně polovinou plošné hmotnosti.



Obrázek 33: 3 vzorky s nejlepšími vlastnostmi při frekvenci 3 GHz

Při důkladném porovnání třech vybraných kandidátů je viditelné, že se jejich 95% intervaly spolehlivosti při působení maximální frekvence překrývají, tudíž lze tvrdit, že mezi SE těchto vzorků není velký statistický rozdíl. Hodnoty všech textilií jsou k dispozici v tabulce 5, kde je zaznamenána hodnota stínícího účinku s intervalem spolehlivosti a směrodatnou odchylkou. Porovnání s referenčním materiálem ALU za působení frekvence 3 GHz vykazuje nedostačující stínící účinnost u všech textilií. Další zkouška vybraných textilií se uskuteční za předpokladu lepší stálosti stínění při vyšší frekvenci.

### 2.3 Testování SE vzorků pro frekvence do 6 GHz

Testování vzorků působením frekvencí 1.5 GHz - 6 GHz proběhlo na Katedře materiálového inženýrství Fakulty textilní, která je součástí Technické univerzity v Liberci. Katedra je vybavena vektorovým analyzátozem NanoVNA-F V3, které umožňuje generovat frekvenční rozsah do 6 GHz. Toto zařízení využívá testovací hlavici EM-2108 [26], která je vyobrazena na obrázku 34.



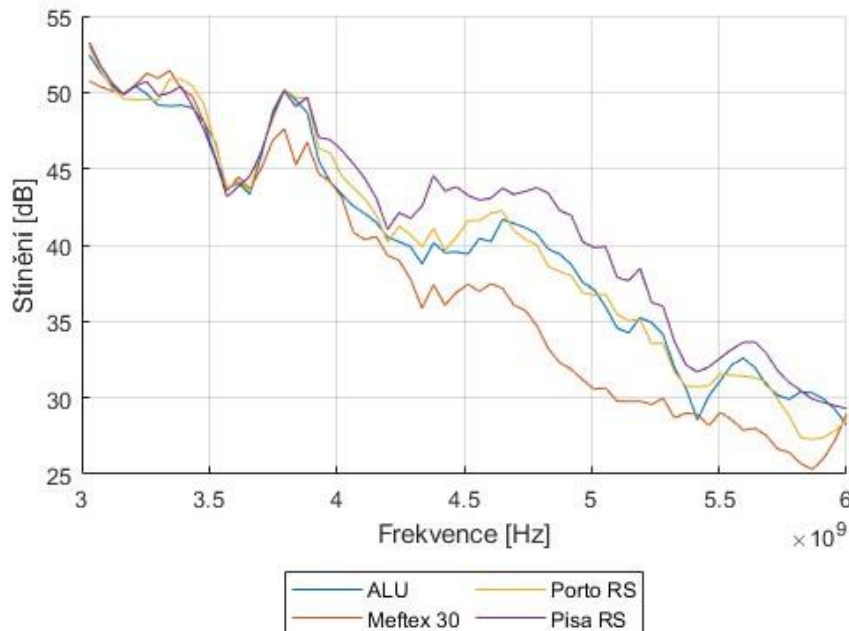
Obrázek 34: Testovací hlavice EM-2108 [26]

EM-2108 je testovací zařízení pro hodnocení elektromagnetické účinnosti stínění (SE) plošných materiálů. Měřeny jsou vzorky kruhové, o průměru cca 16 mm. Navzdory tomu, že ASTM D4935-10 je v současnosti omezeno na horní frekvenci 1,5 GHz, EM-2108 plně splňuje požadavky na měření SE uvedené v ASTM D4935-10 až do 10 GHz. Plný rozsah hlavice sice umožňuje měření při 10 GHz, ale připojený vektorový analyzátor NanoVNA-F V3 umožňuje pouze maximální hodnotu 6 GHz. Toto omezení nebrání k realizaci testování.

Pro tento experiment byly pomocí raznice vyseknuty vzorky kruhového průřezu o průměru 16 mm. Pro každý vzorek se připravilo 10 stejných preparátů.

Jedním z cílů práce je najít textílii, která bude prosperovat lepší stínící účinnosti než hliníková lepící páska. Tato páska sice vyhovovala svou SE vlastností, ale při aplikaci dochází k poškození její samotné struktury s čímž je spojena ztráta schopnosti stínit elektromagnetické pole. Z tohoto důvodu je ke třem vybraným vzorkům přiřazen další vzorek značený jako **ALU**, aby se mohly porovnat hodnoty s materiálem, který se v praxi osvědčil. Výsledek z měření by měl být jedním ze dvou faktorů, který rozhodne o ideálním řešení.

Pro měření se nastavil frekvenční rozsah tak, aby navazoval na předešlé testování, a to je od 3 GHz do 6 GHz. Pro tento rozsah se rovnoměrně odečetlo 100 hodnot a každý vzorek podstoupil deset měření. Z každého souboru dat se pro jednotlivé frekvence vypočítala průměrná hodnota pomocí programu MS Excel a vynesla se do grafu na obrázku 35. Tato vizuální operace je jen informativní pro sledování trendu SE závislé na zvyšující se frekvenci působící na vzorek.



Obrázek 35: Grafické znázornění stínící účinnosti pro 6 GHz

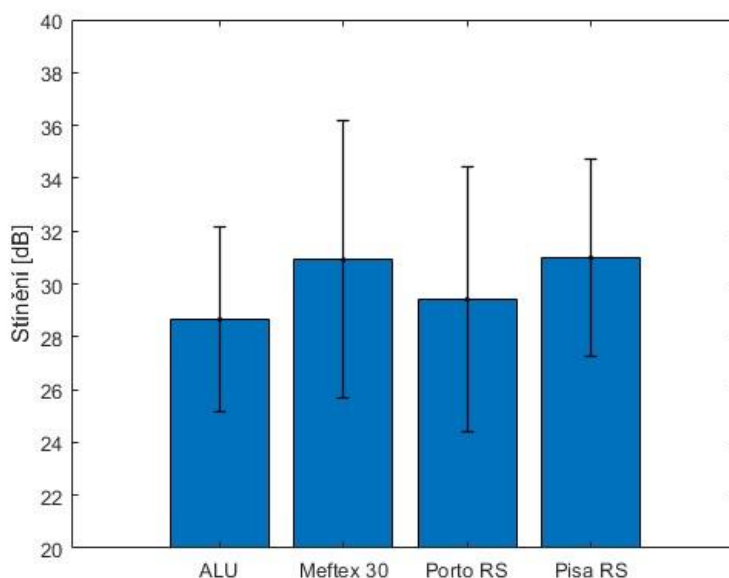
Grafické znázornění na Obrázku 35 vykazuje velice podobné chování všech vzorků, jenom s malým rozdílem v hodnotách SE. Křivky závislosti SE na frekvenci bohužel nestačí ke správnému vyhodnocení nejhodnějšího vzorku a proto se vytvořilo přehlednější zobrazení.

Dalším krokem úpravy dat bylo sestrojení sloupcového grafu s 95% IS pro průměrné hodnoty při maximální frekvenci 6 GHz. V Tabulce 6 jsou vyneseny již zmíněné průměrné hodnoty pro jednotlivé vzorky a zároveň jejich IS.

Tabulka 6: SE při frekvenci 6 GHz s 95% IS

Frekvence [Hz]	ALU	Meftex 30	Porto RS	Pisa RS
6,00E+09				
Stínění [dB]	28,65	30,92	29,41	30,98
Velikost	10			
Sm. odchylka [dB]	5,63	8,47	8,06	6,01
95% IS [dB]	3,49	5,25	4,99	3,72

Z Tabulky 6 je zřejmé, že hodnoty SE si jsou velice blízké. Díky získaným datům lze sestrojit sloupcový diagram, který poslouží jako vizuální pomůcka pro vyhodnocení dat.



Obrázek 36: Grafické porovnání stínící účinnosti při frekvenci 6 GHz

Grafické znázornění na Obrázku 36 vykazuje, že se 95% IS všech vzorků překrývají. Z toho lze usoudit, že mezi SE jednotlivých vzorků není statisticky významný rozdíl. Pro ověření tvrzení se provedlo testování dat v programu MS Excel pomocí testu zvaným ANOVA, který pracuje s jedním faktorem. Testuje se hypotéza  $H_0$ , kdy jsou si data rovna oproti alternativní hypotéze  $H_1$ , která zastává statistický rozdíl. Testuje se na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Tabulka 7: ANOVA: jeden faktor pro SE ( $f = 6$  GHz)

Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl		
ALU	10	286,50	28,65	31,70		
Meftex 30	10	309,15	30,92	71,82		
Porto RS	10	294,13	29,41	64,90		
Pisa RS	10	309,76	30,98	36,11		
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	39,58	3	13,19	<b>0,26</b>	0,86	<b>2,87</b>
Všechny výběry	1840,78	36	51,13			
Celkem	1880,36	39				

Sledované hodnoty z Tabulky 7 jsou  $F$  a  $F$  krit.  $F$  představuje výstupní hodnotu závislou na vstupních datech a  $F$  krit je dána tabulkovým rozdělením.

Pro vyhodnocení výsledku platí, že  $F$  je výrazně menší než  $F$  krit a to znamená, že mezi daty není významný statistický rozdíl. Dle výsledku na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  se nezamítá nulová hypotéza  $H_0$  a lze usoudit, že není významný statistický rozdíl v SE jednotlivých vzorků a dají se považovat za podobné.

Z výsledků testu vzorků při frekvenci 6 GHz nelze určit, jaký je nejvhodnější materiál z pohledu vlastností EMS. Nejvyšší SE vykazuje Meftex 30 a Pisa RS, ale jelikož není statisticky prokázána jejich rozdílnost, tak se nadále považují za rovné s ostatními. Zajímavým výsledkem je SE referenčního vzorku ALU, kdy dosáhl nejmenších naměřených hodnot. Díky celistvé struktuře materiálu s nejmenší porozitou by se očekávalo, že bude naopak disponovat hodnot nejvyšších.

Podobnost dat není velkým problémem pro výběr ideálního materiálu, protože je potřeba provést ještě jednu zkoušku, která se zabývá testováním mechanických vlastností plošných textilií.

## 2.4 Testování mechanických vlastností

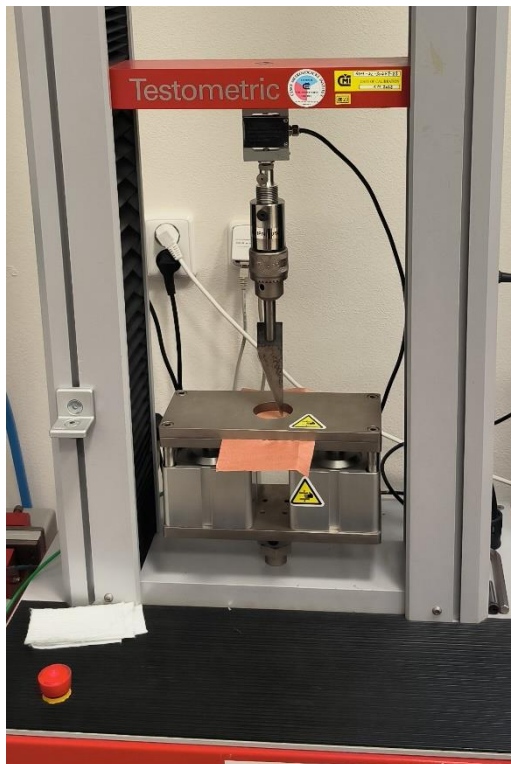
Jak bylo zmíněno výše, textilie, ze které bude vyroben ochranný obal musí splnit vyšší mechanickou odolnost než hliníková lepicí páska, která prokázala tendenci k poškození při aplikaci na elektrickou součástku. Toto poškození je způsobeno zasouvání elektrické součástky do ochranného pouzdra. V tomto pouzdře ostrá hrana (způsobující poškození hliníkové pásky) slouží k aretaci elektrického senzoru pomocí třecích sil, aby se zabránilo jeho samovolnému pohybu. Tato hrana proniká aplikovaným materiálem, který slouží jako elektromagnetický stínící (EMS) prvek, poškodí ho, čímž se naruší konzistentní vrstva stínícího materiálu a materiál přestává mít schopnost stínit elektromagnetické pole

Předpokládá se, že vybraná stínící textilie bude díky vzájemnému provázání vláken dominovat svou mechanickou odolností nad lepicí páskou a s tím spojeným protrhnutím o hranu ochranného domku. Dalším důležitým faktorem je to, že se jedná o jednorázovou aplikaci bez opakovaného namáhání. Proto byl zvolen test, který simuluje reálné namáhání elektromagneticky stínícího materiálu (v němž je umístěna elektronická součástka) při vkládání do ochranného domku, a to jednorázový průnik ostří materiálem a potřebnou síla, která vzniká odporem vzorku při průniku čepelí materiálem připomínající řez.

Test, který je zaměřen na mechanické vlastnosti plošných textilií, se nepokouší simulovat přesně ten samý průnik, ale spíše se přibližuje reálným podmínkám. Proto bylo zvoleno testování na přístroji Testometric M350-10CT, který pracuje na principu konstantního zatížení. Tento přístroj je umístěn na Technické univerzitě v Liberci, konkrétně na Katedře technologií a struktur. Testování je prováděno v souladu s interní normou IN 24-205-01/01, známou jako Zkouška průniku čepelí plošnými textiliemi. Tato zkouška umožňuje posoudit, jak plošné textilie odolávají při průniku hrany podobné té, která se vyskytuje v ochranném pouzdře elektrické součástky. Je to klíčový krok směrem k vybrání materiálu, který je schopen poskytnout lepší ochranu před elektromagnetickými interferencemi a zároveň zachovat svou mechanickou stavbu.

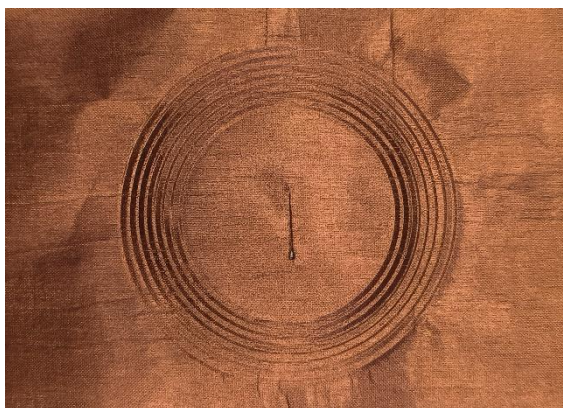


Na Obrázku 37 se nachází fotografie přístroje Testometric M350-10CT. Hlavními částmi jsou upínací pneumatické čelisti, které jako jediné udávají požadovaný rozměr vzorku a pohyblivá hlava, která upíná zkušební těleso a vykonává vertikální pohyb.



*Obrázek 37: Testometric M350-10CT*

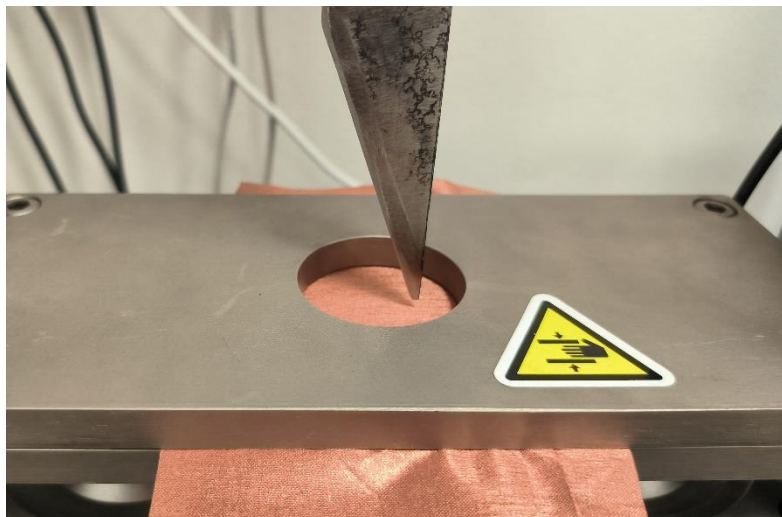
V čelistech se nachází upnutý vzorek, který je limitován minimálními rozměry kruhového rozměru o průměru 100 mm. Je to dáno sérií drážek na čelistech, které napnou a za aretují testovaný vzorek. Textilie po zkoušce je vidět na Obrázku 38, kdy je čitelné mezikruží z deformace čelistmi a průnik čepele.



*Obrázek 38: Vzorek po zkoušce průniku čepele*



Průběh zkoušky spočívá ve sledování síly potřebné k průrazu ostří skrze testovaný materiál a následného odporu vzorku při průchodu čepele. Tyto dva faktory pomůžou rozhodnout, který z testovaných materiálů je nejodolnější.



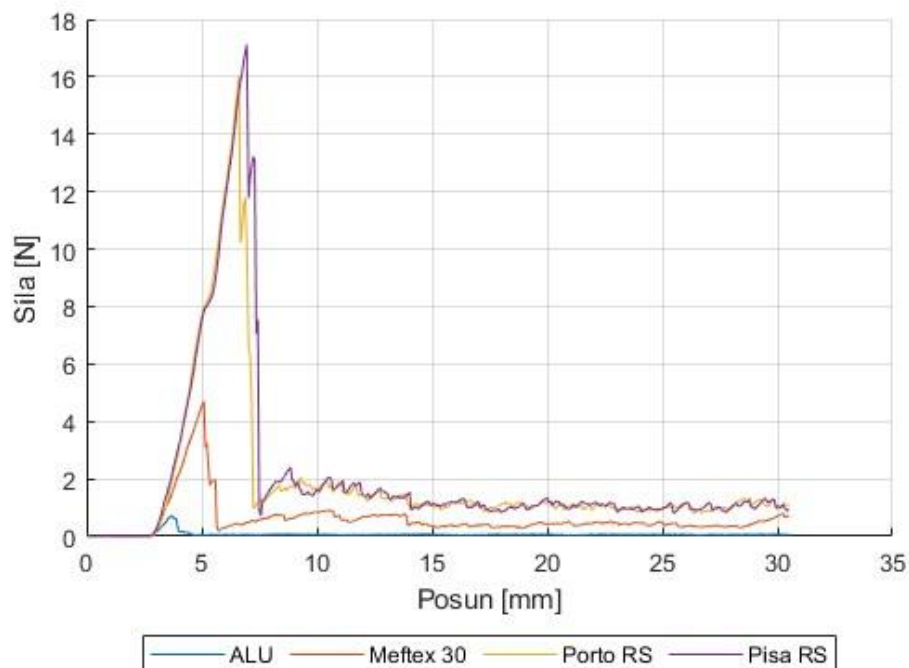
Obrázek 39: Počáteční pozice ostří ke zkoušenému vzorku

Před začátkem zkoušky se musí v přístroji nastavit vstupní parametry, které jsou vypsány v Tabulce 8. Rychlostí zkoušky se rozumí konstantní rychlosti pohybu hlavy s čepelí směrem ke vzorku (dolů) a je udávána v milimetrech za minutu. Pro potřeby tohoto testu není nutností vysoké rychlosti, protože jde pouze o porovnání mechanických vlastností a vybrání nejlepšího vzorku. Dalším parametrem je průměr otvoru v čelistech, který je konstantně nastaven na 40 mm a zatížení hlavy. Předpětí není v tomto testu potřeba.

Tabulka 8: Vstupní parametry přístroje

Rychlost zkoušky [mm/min]	100
Předzátěž	Vypnuto
Průměr [mm]	40
Zatížení hlavy [N]	100

Pro každý vzorek byly provedeny 3 měření. Pro jednotlivé soubory dat byly vypočítány průměrné hodnoty průběhu zkoušky a byly vyneseny do grafu, který je na Obrázku 40. Díky grafickému zobrazení je možno určit, který vzorek disponuje největší odolností vůči průchodu ostří.



Obrázek 40: Grafické znázornění průměrných hodnot průniku ostří vzorky

Na obrázku 40 je grafické znázornění velikosti síly, která byla vyvinuta k průniku ostří vzorkem. Rostoucí síla znamená, že se špička ostří dostala k materiálu a vlivem konstantní rychlosti stále roste do svého maxima, které značí průnik ostří skrze materiál. Po průniku dochází k poklesu vyvíjené síly, která spadne na téměř konstantní hodnotu. Tento cyklický trend kolísání znázorňuje vyvíjenou sílu potřebnou k prořezu čepele materiálem. Podle grafu je už téměř jasné, že textilie s nejlepší mechanickou odolností jsou Porto RS a Pisa RS.

Tabulka 9: Maximální síla potřebná k průniku ostří vzorky

	ALU	Meftex 30	Porto RS	Pisa RS
F [N]	0,72	4,70	16,03	17,12

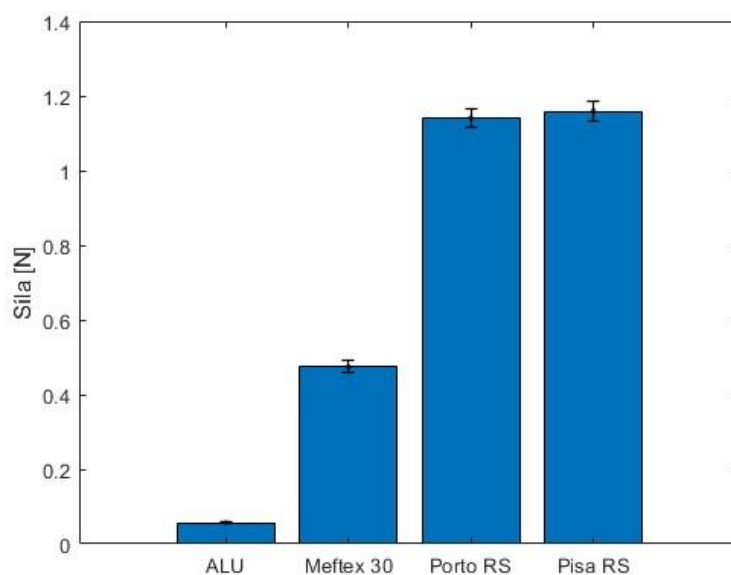
V Tabulce 9 jsou vypsány maximální hodnoty síly potřebné k průniku ostří skrze materiál. Tvzení z vyhodnocení grafu Obrázku 40 se potvrdilo i numericky.

Důležitým aspektem je i síla vyvinutá při průchodu čepele ostří skrze materiál. Tato část se nachází za maximem vyvinuté síly, kdy klesne na danou hodnotu a udržuje se v konstantním rozmezí. Pro cyklický trend růstu a poklesu se stanovily průměrné hodnoty jednotlivých souborů dat, ze kterých se opět vyhodnotil vzorek s nejlepšími mechanickými vlastnostmi.

Tabulka 10: Průměrné hodnoty síly z průniku ostří materiálem s 95% IS

	ALU	Meftex 30	Porto RS	Pisa RS
Průměr [N]	0,06	0,47	1,14	1,16
Velikost	320			
Sm. odchylka [N]	0,01	0,15	0,22	0,26
95% IS [N]	0,01	0,02	0,02	0,03

Hodnoty z Tabulky 10 se následně posloužily k vytvoření sloupcových grafů průměrných hodnot síly při dalším prořezání s 95% IS. Toto grafické znázornění poslouží k vizuálnímu porovnání všech vzorků.



Obrázek 41: Grafické porovnání průměrů síly řezu materiálem s 95% IS

Nejlepší mechanickou odolností disponuje Porto RS a Pisa RS. Síla vyvinutá v průniku je téměř 19 krát větší oproti hliníkové páске a trojnásobná vůči Meftex 30. U této textilie je to pravděpodobně dáno její strukturou anizotropního uspořádání vláken, které odpovídá netkané textilii. Intervaly spolehlivosti Porto RS a Pisa RS se překrývají, proto se rozdíl jejich mechanické odolnosti berou za statisticky nevýznamné.

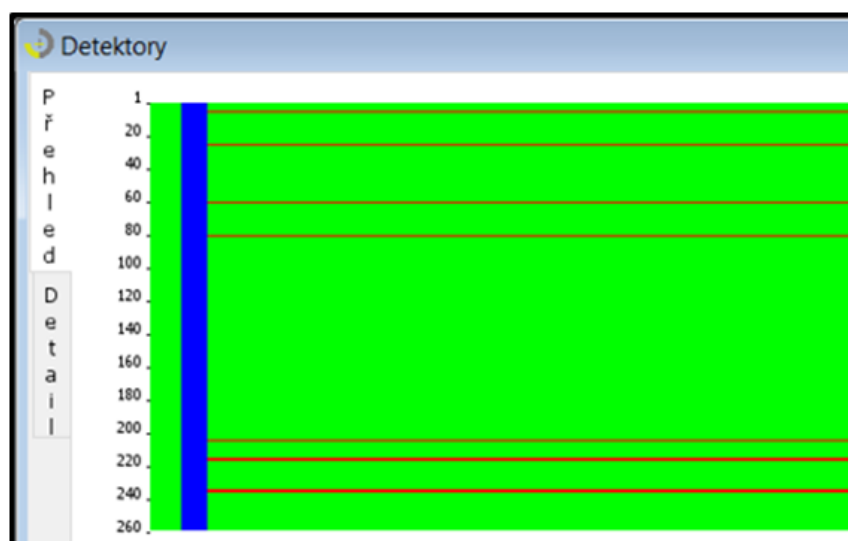
## 2.5 Aplikace textilie v reálných podmínkách

Posledním testem, kterým bude vybraná textilie podrobena, je test v reálných podmínkách. Jedná se o umístění elektrické součástky v blízkosti reálného radarového elektromagnetického vlnění, které při působení na danou součástku zapříčiní její nefunkčnost.

Pro tento test se vybrala speciální textilie od firmy Shieldex s názvem Pisa RS. Tato textilie vykázala v testování SE nejvyšší stínící účinnost, a to 31 dB při působení frekvence 6 GHz, společně s Meftex 30, ale s výhodou trojnásobné pevnosti v mechanickém namáhání. Dominance mechanických vlastností rozhodla mezi jednotlivými vzorky. Druhotnou volbou pro aplikaci v reálných podmínkách byla textilie Porto RS, která prokázala podobnou mechanickou odolnost i statisticky nevýznamný rozdíl ve stínící účinnosti v porovnání s Pisa RS.

Elektrická součástka se využívá ke střežení proti vniknutí do objektu a je instalována v četném sériovém zapojení po jeho obvodu. Varianta umístění v řešené situaci je připevnění čidla na plotové soustavě se vzájemnou roztečí necelých dvou a půl metru po celkové délce 1,3 kilometru. Postižená část elektromagnetickým vlněním se odhaduje na úsek s celkovým počtem 260 čidel, na které je nutno aplikovat ochranný prvek.

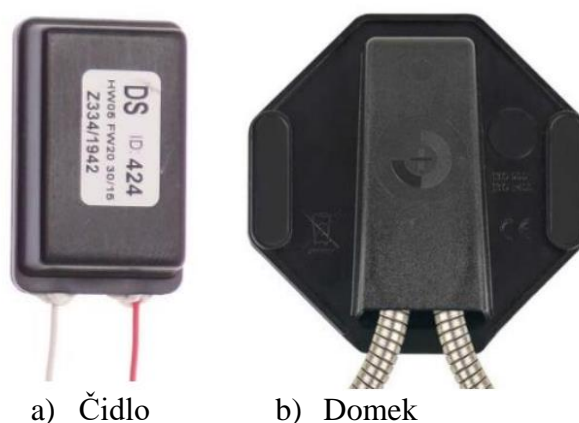
Plotové zabezpečení je součástí sestavy obsahující základní desku, která přijímá data z jednotlivých čidel a dále je pomocí integrovaného systému vyhodnocuje. Díky vlastnímu softwaru lze získat online vizualizaci i retrospektivní náhled do uběhlého období.



Obrázek 42: Stav detektorů před aplikací ochranné textilie

Na Obrázku 42 je vyobrazen přijímaný signál z jednotlivých detektorů daného úseku. Každý detektor je označen vlastním pořadovým číslem a pro každé číslo je barevně vyobrazen stav, ve kterém se detektor nachází. Zelená znamená, že je čidlo bez poplachu a bez poruchy. Červená barva značí buď poplach, který je vyvolán třetí stranou nepovoleným vniknutím nebo může značit jeho nefunkčnost. Modrý svislý pruh v tomto případě znázorňuje dobu načtení plotového úseku z jednotky, takže je pro vyhodnocení irelevantní.

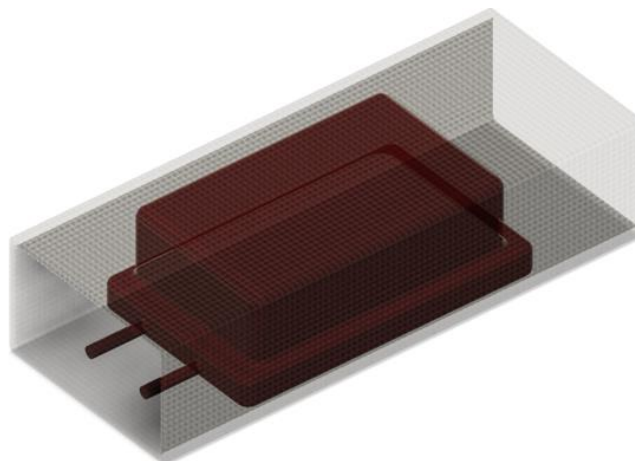
Z Obrázku 42 lze tedy určit, že detektory, které mají v horizontálním směru červené označení, jsou rušené elektromagnetickým vlněním a je potřeba aplikovat ochrannou textilií, aby se zabránilo omezením v jejich fungování.



*Obrázek 43: Části detektoru: (a) elektrická součástka určená k ochraně a (b) polymerní ochranný domek do něž se součástka vkládá*

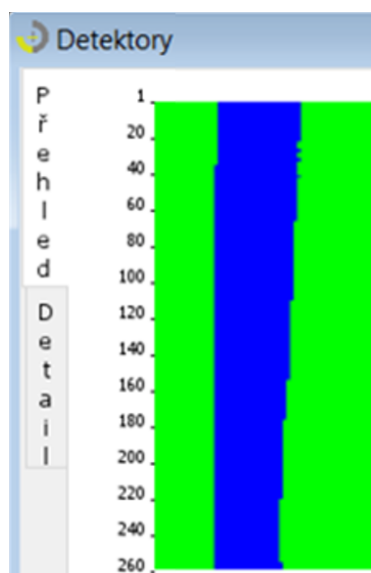
Na Obrázku 43 jsou vyobrazeny obě části detektoru. Stíněná elektrická součástka (a) a ochranný domek (b), který slouží k uchycení a ochraně čidla proti mechanickému poškození vnějšími vlivy. Samotné čidlo se tedy nachází v ochranném domku a úkolem je aplikovat elektromagneticky stínící textilií tak, aby se nacházela mezi těmito jednotlivými komponenty. Řešení problému je takové, že se čidlo po jeho ploše obalí ochrannou textilií a vloží se do domku, který bude nadále plnit mechanickou ochranu proti vnějším vlivům. Toto řešení bylo zvoleno jako ideálním, protože se zabrání opotřebení aplikované textilie, která takto bude staticky a jednorázově uložena do sestavy detektoru. Jediný faktor, který může poškodit textilií je ten, že při aplikaci do domku (Obr. 43(b)), se vystaví aretačním hranám nacházejícím se na vnitřní straně a může dojít k protrhnutí. Toto však bylo simulováno v kapitole 2.4 a po otestování reálnou situací se ověřila odolnost i proti těmto aretačním hranám.

Čidlo detektoru bylo obaleno textilií Pisa RS tak, jako tomu je na obrázku 43, aby bylo kompletně zakryto po jeho obvodu a délce. Je důležité, aby textilie pokryla celý povrch čidla.



Obrázek 44: Čidlo v ochranné textilii

Obalené čidlo se zasune zpět do ochranného domku. Tímto způsobem se aplikuje textilie na všechny čidla, které vykazují poruchový stav dle Obrázku 42. Kompletním obalením povrchu elektrické součástky se zamezí přímému působení elektromagnetického vlnění vyvolané radarovým systémem. Jako ochranný prvek také působí kovová bužírka chránící samotné kabely. Tuto bužírku lze vidět na Obrázku 43 (b). Díky této úpravě se předchází jevu absorpce, popsáným v kapitole 1.1.2, který by mohl zapříčinit přenosu elektromagnetického vlnění skrze přívodní kabely detektoru přímo do detektoru.



Obrázek 45: Stav detektorů po aplikaci ochranné textilie

Po aplikaci ochranné textilie na elektrickou součástku se opět stáhla data z jednotky plotového zabezpečení, aby se provedla kontrola funkčnosti. Na obrázku 45 lze vidět, že aplikace ochranné textilie úspěšně odstranila poruchu vybraných detektorů. To lze posoudit z porovnání Obrázku 42 a 45, kde vyobrazené vodorovné červené oblasti zmizely, nadále se neobjevují a čidla nevykazují anomální chování zapříčiněným působením elektromagnetickým vlněním vysílaným radarovou technikou.

Test aplikace v reálných podmínkách provozu se dá považovat za úspěšný a lze říci, že vybraná elektromagneticky stínící textilie Pisa RS firmy Shieldex je vhodnou variantou jako efektivnější řešení oproti prvotně používané hliníkové lepící pásce. Pisa RS disponuje lepšími mechanickými vlastnostmi, které nevyžadují nutnou úpravu ochranného domku, rychlejší aplikací na samotné čidlo a také dosáhla vyšších stínících hodnot, které jsou však statisticky nevýznamné.

## **2.6 Zhotovení prototypu přípravku pro úpravu tvaru stínící textilie**

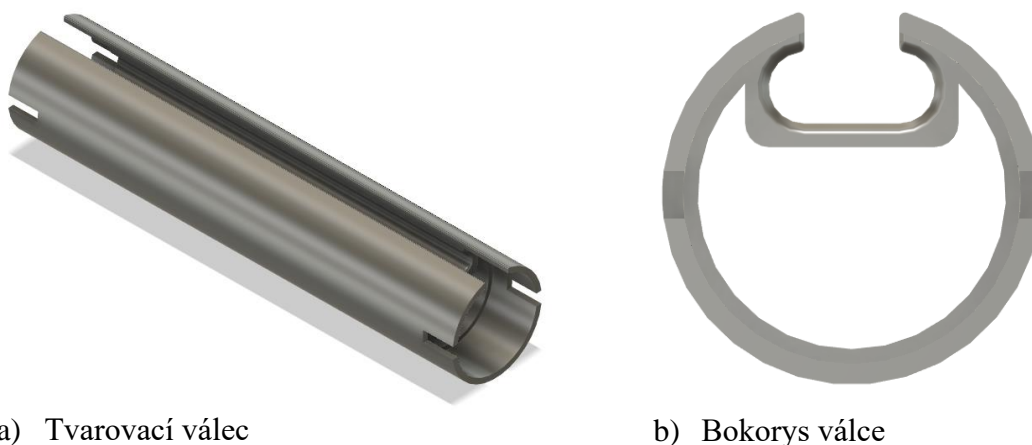
Plotové zabezpečení sloužící ke střežení objektu proti vniknutí nepovolaným osobám se dodává v délkách závislých na požadavku zákazníka. Jsou však maximální omezení, které určují délku a počet detektorů v jednom úseku. Maximální délka jednoho úseku činí 350 čidel na 1,5 kilometru. To znamená, že pokud bude obvod objektu delší jak 1,5 kilometru, tak se musí vyrobit více linek, které se na sebe sériově zapojí. Hlavní myšlenkou je to, že se jedná o velké množství detektorů, které je nutno co v nejkratším termínu smontovat na výrobní lince, která je optimalizována tak, aby kompletace byla co nejméně časově náročná.

Zmíněné faktory byly klíčové pro tento experiment, protože se muselo navrhnout takové řešení, které bude plnit požadované funkce na elektromagnetické stínění, mechanickou odolnost proti protržení a snadnou aplikaci materiálu na samotné čidlo během výrobního procesu. Hliníková páska sice splňovala požadavky EMS, ale byla časově náročná při aplikaci na čidlo a nutnosti úpravy ochranného domku, aby nedošlo k jejímu poškození. Při testování v reálných podmínkách se osvědčila technika vytvoření z plošné textilie tvar kruhového průřezu, do kterého se čidlo pouze navléklo a aplikovalo do ochranného domku. Tento styl aplikace by se mohl uplatnit i ve výrobním procesu zahrnující montáž detektoru.



Finální tvar textilie by měl být kruhového průřezu. K tomu byl navrhnout přípravek, na kterém je možno upravit větší metráž textilie, která by se následně dělila na požadovanou délku. Popis jednotlivých částí přípravku bude nastíněn na prototypu. Jednotlivé díly byly modelovány v programu Fusion 360 za použití školní licence dostupné pro studenty TUL. Modely dílů byly vyrobeny pomocí 3D tisku.

Kruhového průřezu se docílí namotání textilie okolo válce, který slouží k vytvarování požadovaného tvaru o daném průměru. Obvod samotného čidla činí 100 mm, takže je potřeba minimální obvod kružnice o stejné hodnotě. Průměr trubky byl stanoven na 32 mm.

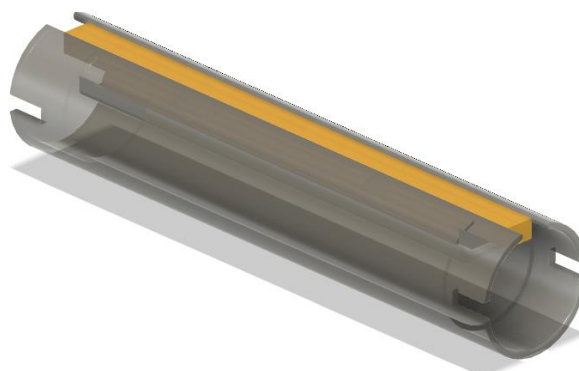


a) Tvarovací válec

b) Bokorys válce

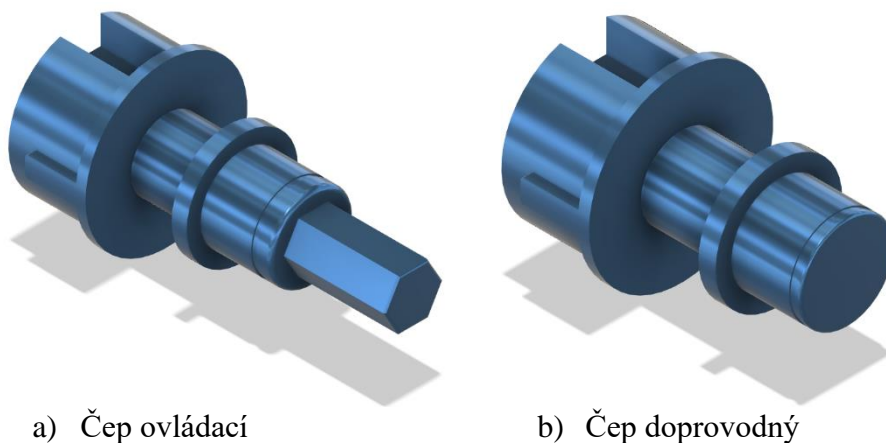
Obrázek 46: Tvarovací válec (a) Tvarovací válec a (b) Bokorys válce

Na pohledu (a) Obrázku 46 je pohled na tvarovací válec, podél kterého se bude tvarovat textilie. Konce válce jsou navrženy pro vložení čepů, které poslouží k přenosu točivého momentu. Pohled (b) bokorys válce, kde je důležitá drážka pro vložení magnetového skřipce (Obrázek 47), který zaaretuje textilii.



Obrázek 47: Tvarovací válec s magnetovým skřipcem



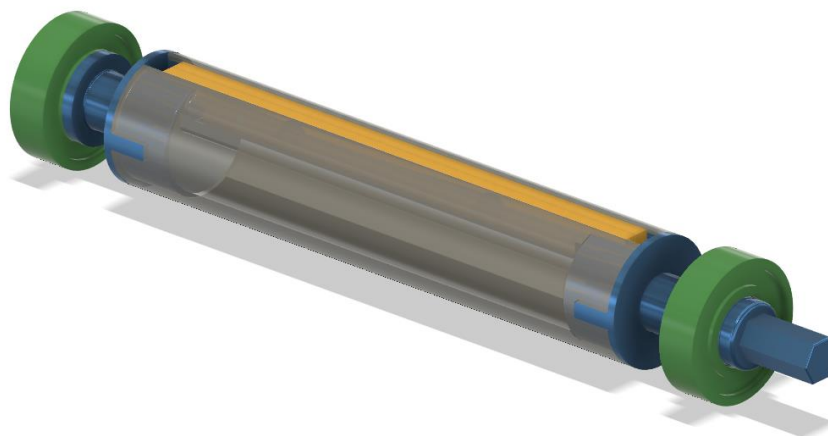


a) Čep ovládací

b) Čep doprovodný

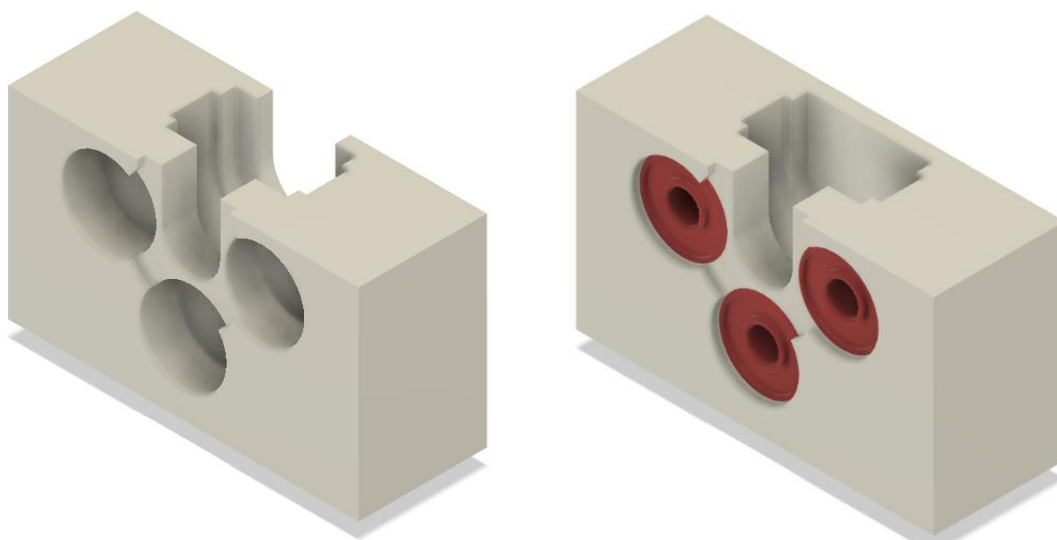
*Obrázek 48: Čepy uchycení válce (a) Čep ovládací a (b) Čep doprovodný*

Na Obrázku 48 jsou vyobrazeny čepy, které se nasadí na boky tvarovacího válce. Čep (a) bude sloužit k přenášení točivého momentu do celé soustavy, kde se na šestihran nasadí klička pro jednodušší manipulaci. Čep (b) slouží pouze jako opěrný a středící prvek. Na oba čepy se nasadí kuličkové ložisko Kinex 6003, které je zvýrazněno zelenou barvou. Kompletace dílů je na Obrázku 49. Čepy mají vymodelovanou drážku pro dodatečnou aretaci magnetového skřípce umístěného ve válci a také navržené vodící drážky, které slouží jako zámek s válcem.



*Obrázek 49: Tvarovací válec s čepy*

Kompletace na Obrázku 49 umožňuje uchycení textilie a přenesení točivého momentu do soustavy tak, aby došlo k obmotání textilie okolo tvarovacího válce a následnému slepení obou konců. Pro statické upevnění válce v prostoru se musí celek vložit do rámu, který bude oporou pro ložiska. Ložiska jsou jediným kontaktním místem tvarovacího válce s rámem přípravku.

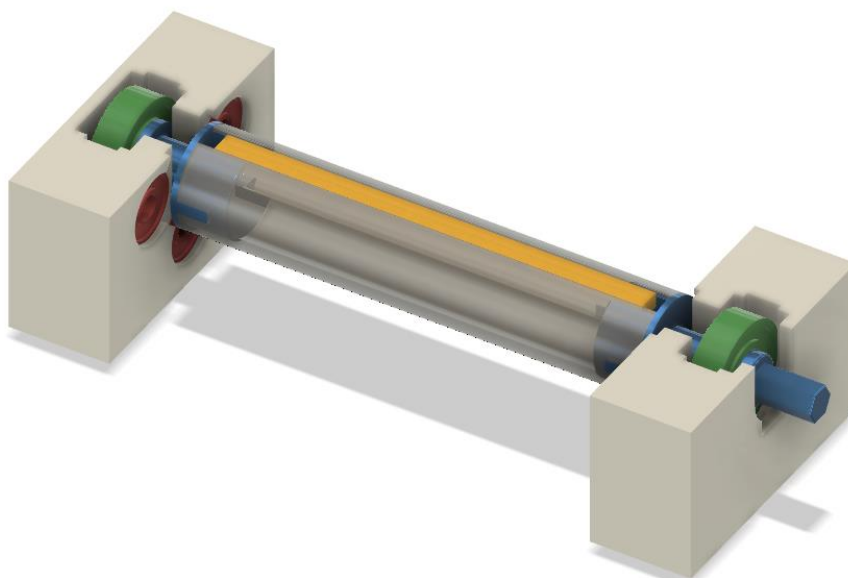


a) Bok hnacího čepu

b) Bok s ložisky

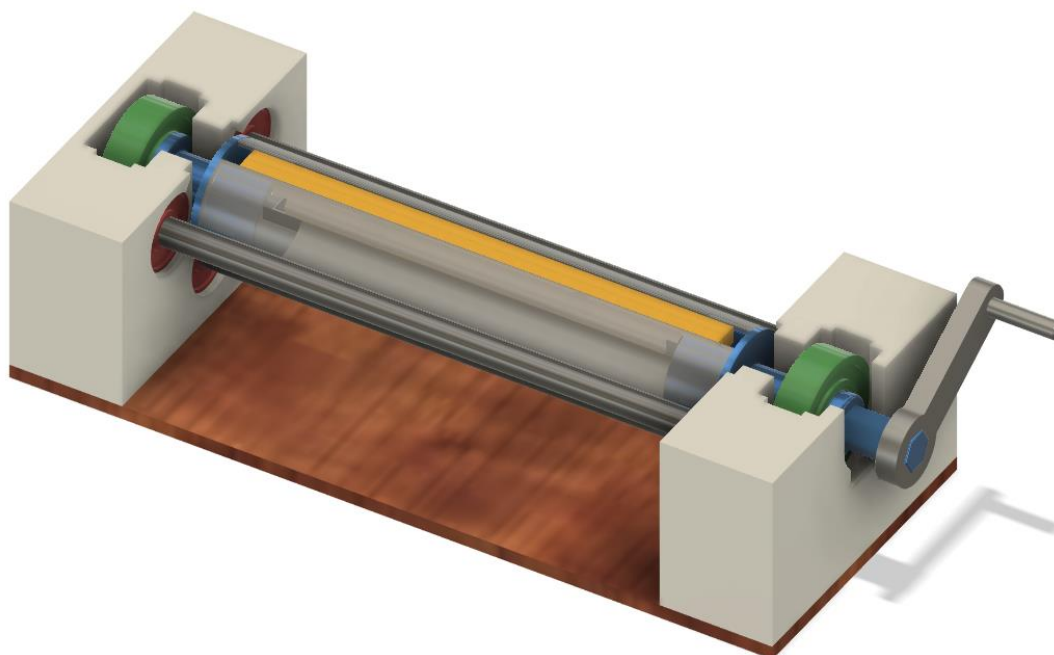
*Obrázek 50: Boky rámu přípravku (a) Bok hnacího čepu (b) Bok s ložisky*

Boky rámu přípravku jsou znázorněny na Obrázku 50, kde (a) je bok pro vložení hnacího čepu s šestihranem (Obrázek 48 (a)) a (b) je bok se znázorněnými kuličkovými ložisky ZKL 608 červenou barvou. Kuličková ložiska jsou určena pro vložení hlazené vodící tyče průměru 8 mm, která bude v těsném kontaktu s tvarovacím válcem. Ložiska se nachází po obou stranách a jsou vzájemně protilehlá.



*Obrázek 51: Kompletace sestavy s boky*

Obrázek 51 znázorňuje usazení sestavy válce do boků rámu přípravku. Červená ložiska jsou rozmístěna po 80° podél obvodu tvarovacího válce. Do protilehlé dvojice ložisek přijde hlazená vodící tyč o průměru 8mm. Tyto tyče poslouží jako přítlačný systém textilie k tvarovacímu válci. Tímto přítlakem se docílí přesného požadovaného průměru konečného tvaru textilie a usnadní tak i proces pojení. Tyto přítlačné tyče lze vidět na Obrázku 52, kde je vyobrazená kompletní sestava přípravku včetně kličky pro vytvoření točivého momentu potřebný systémem.



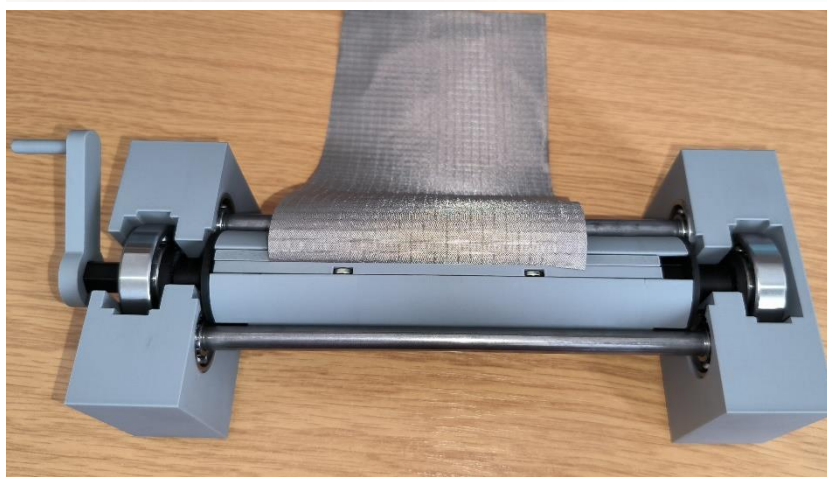
*Obrázek 52: Model prototypu přípravku pro úpravu textilie*

Jednotlivé díly sestavy byly vytisknuty na 3D tiskárně a sestaveny dle předchozího popisu. Díly, kterými jsou ložiska a vodící tyče, se sehnaly dle požadavků ve specializované prodejně. Postup zpracování textilie probíhá v jednotlivých krocích, které jsou znázorněny na Obrázku 53. Prvním krokem (a) je chycení textilie do magnetického skřípce, který se následně zasune do tvarovacího válce a společně s čepý se vloží do rámu přípravku (b). Dalším krokem (c) je otočení válcem tak, aby bylo možné nanést pojivo na textili. U kroku (d) se otáčí s přípravkem, aby došlo k rovnoměrnému nanesení pojiva a následnému vytvrzení. Po vytvrzení pojiva se válec vytáhne z přípravku, odejmou se čepý a za skřípec se vytáhne modifikovaná textilie kruhového průřezu. Magnetický skřípec se rozezne a textilie je připravena k použití.

a)



b)



c)



d)



*Obrázek 53: Zpracování textilie na reálném přípravku*

### 3 Diskuse výsledků experimentální části

Na základě literární rešerše byly vytipovány elektricky vodivé textilie potenciálně vhodné pro tvorbu ochranného obalu pro součástku citlivou na elektromagnetické rušení. Pro získání základní charakteristiky textilií byly pořízeny snímky z elektronového mikroskopu SEM, které v první řadě posloužily jako nástroj pro určení průměru vláken jednotlivých vzorků. Průměr vláken úzce souvisí s tloušťkou materiálu, která byla jednou z podmínek vybrání ideální textilie na předem určený druh použití. Pomocí těchto hodnot se předběžně vyřadily z osmi vybraných textilií vzorky Koln a Tull.

Hlavní vlastností, kterou speciální textilie měly disponovat, byla vysoká stínící účinnost, která se nejdříve testovala frekvencemi do 3 GHz. Tento test posloužil k tomu, aby se selektoval počet celkových vzorků na tři nejlepší, které se následně podrobily testem elektromagnetické stínící účinnosti za působení frekvencí do 6 GHz. Ještě před prvním měřením bylo nutné provést test, který určil statisticky významný nebo nevýznamný rozdíl mezi SE textilie, která nepokrývala hlavici měřicího přístroje, jako tomu je v normě ASTM D4935-10. Při použití textilie, která nepokrývala celou hlavici (vzorek šíře 8 cm), jak je tomu napsáno v normě, se zamítla hypotéza  $H_0$  a přiklonilo se na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  k alternativní hypotéze, která potvrdila statisticky významný rozdíl vůči měření vzorku s plným zakrytím hlavice (šíře vzorku 14 cm). Navrženo bylo spojení úzkých vzorků tak, aby byla hlavice přístroje zakryla po celé ploše. Tento vzájemný test nezamítl hypotézu  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  a proto se měření mohlo uskutečnit, protože mezi nastaveným a plným vzorkem nebyl statisticky významný rozdíl ve stínící účinnosti.

V dalším kroku byl v reálných podmínkách otestován i referenční vzorek hliníkové pásky, který prokázal úspěšné stínění přímo na daném místě řešeného problému. Hodnoty stínící účinnosti referenčního vzorku žádná textilie nepřekonala, i přes to byly vybrány tři textilie s nejlepšími výsledky (s nejvyšším SE), které se se podrobily dalšímu měření. Textilie, které prokázaly nejvyšší stínící účinnost byly Meftex 30, Porto RS a Pisa RS.

Výsledkem testování SE textilií frekvencí do 6 GHz s referenčním vzorkem rozhodlo, že mezi všemi vzorky Meftex 30, Porto RS a Pisa RS není statisticky významný rozdíl v jejich stínící účinnosti. Tato hypotéza se potvrdila při sestavení sloupcového grafu pro SE při maximální frekvenční hodnotě 6 GHz s 95% IS. Druhým zvoleným testem byla jednofaktorová ANOVA, která na základě statistického testování hypotéz potvrdila výsledek ze sloupcového grafu.



Dalším krokem byla testována požadovaná vyšší mechanická odolnost textilie, v porovnání s referenčním vzorkem, a to proti průniku hrany skrze povrch materiálu. Nešlo o simulaci reálného problému, ale pouze o přiblížení se k realitě a zjištění, která textilie prokazuje nejvyšší odolnost proti průniku čepelí. Jelikož při testu frekvencí do 6 GHz nedošlo k redukci zkoušených vzorků, tak se předpokládalo, že tomu tak bude teď. Tato zkouška prokázala, že textilie Pisa RS s tkaninou Porto RS disponuje nejvyšší mechanickou odolností vůči prořezu z vybraných vzorků. Pevnost těchto textilií v porovnání s hliníkovou folií byla téměř 19x vyšší a 3x vyšší, než dosáhl Meftex 30.

Pro test v reálných podmínkách byla zvolena textilie Pisa RS firmy Shieldex, která byla aplikována na elektrickou součástku vystavovanou elektromagnetickým vlněním vysokých hodnot. Po aplikaci stínící textilie se projevila značná změna (nedošlo k poruše žádného z čidel, kde byl aplikován textilní obal) a potvrdila se tak funkčnost v této diplomové práci navrženého technického řešení.

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout textilní ochranný obal pro konkrétní elektronickou součást, který bude splňovat jak požadovanou elektromagnetickou stínící účinnost, tak vybrané mechanické vlastnosti. Dalším bodem bylo navrhnout přípravek, díky kterému bude možné vytvarovat vybranou textilií do požadovaného tvaru.

V první fázi byla provedena základní charakteristika osmi vybraných vzorků elektromagneticky stínících textilií zvolených na základě průzkumu trhu. Vzorky byly charakterizovány z hlediska materiálového složení substrátu i pokovení, změřena byla tloušťka textilie dle normy ČSN EN ISO 5084, plošná měrná hmotnost v souladu s normou ČSN EN 12127 a pořízeny byly také snímky pomocí SEM elektronového mikroskopu, které posloužily k určení struktury textilií. Pořízené snímky byly vstupním parametrem pro program Image J, pomocí něhož byl stanoven průměr vláken dané textilie. Na základě naměřených dat se dalo očekávat, že vzorek Koln a Tull nebude vyhovovat pro dané použití z důvodu nevyhovující tloušťky textilie, která byla nejvyšší ze všech vzorků, a to 0,20 mm a 0,12 mm.

Za účelem testování elektromagnetické účinnosti stínění textilie byl zvolen postup hodnocení pomocí přerušného koaxiálního vedení ve dvou frekvenčních pásmech v celkovém rozsahu: 30 MHz - 6 GHz. Testování probíhalo v souladu s normou ASTM D4935-10 za použití dvou různých koaxiálních měřících hlavic a vektorových analyzátorů, kterými byly Rohde & Schwarz Vector Network Analyzer ZNC3 pro frekvenční pásmo 30 MHz – 3 GHz a NanoVNA-F V3 pro rozsah 3 GHz – 6 GHz. Před měřením byl proveden experiment, který prozkoumal vliv neúplného zakrytí testovací hlavičky na výsledné hodnoty stínící účinnosti a také vliv na výsledné hodnoty při použití lepeného vzorku tak, aby tuto hlavičku plně zakryl. Potvrzen byl statisticky významný rozdíl v SE mezi plným a neúplným zakrytím hlavičky textilií a statisticky nevýznamný rozdíl při použití vzorku lepeného. Proto byla pro další měření požadována úprava testovaných vzorků, u kterých jejich rozměry nesplňovaly předpoklad plného zakrytí testovací hlavičky.

K testování sady textilních materiálů za působení frekvenčního pásma  $30 \text{ MHz} < f < 3 \text{ GHz}$  byl přidán vzorek referenčního materiálu – hliníkové folie, který má ověřenou stínící schopnost v reálných podmínkách. Tento vzorek dosáhl hodnot elektromagnetického stínění 88,23 dB při působení frekvence 3 GHz.



Žádná z vybraných textilií nevykázala tak vysokou SE účinnost, a proto byly vybrány tři textilie, které dosáhly nejvyšších hodnot, kterými jsou Meftex 30 (SE = 65,69 dB), Porto RS (SE = 64,58 dB) a Pisa RS (SE = 64,59 dB). Tyto tři textilie se i s referenčním vzorkem podrobily testování ve frekvenčním pásmu  $3 \text{ GHz} < f < 6 \text{ GHz}$ . Výsledkem tohoto testu se prokázal statisticky nevýznamný rozdíl mezi jednotlivými vzorky v jejich stínící účinnosti při působení maximální frekvence 6 GHz, tudíž lze jejich SE účinnost považovat za srovnatelnou.

Posledním kritériem bylo najít textiliu, která bude disponovat nejvyšší mechanickou odolností proti průniku hrany čepele, a to proto, že při aplikaci textilie do plastového pouzdra elektronické součástky je textilie mechanicky namáhána ostrou hranou. V případě protržení vzorku se významně snižuje jeho schopnost odstínit elektromagnetické pole. Tento experiment se realizoval na přístroji Testometric M350-10CT, který je v korespondenci s interní normou IN 24-205-01/01, známou jako Zkouška průniku čepelí plošnými textiliemi. Nejvyšších hodnot potřebné síly k průniku materiálem se prokázala textilie Pisa RS, která dosáhla odporu 17,12 N. Referenční vzorek prokázal odolnost pouhých 0,72 N.

Pro test v reálných podmínkách byla vybrána textilie Pisa RS. Po aplikaci na elektrickou součástku vystavovanou elektromagnetickému vlnění se potvrdila stínící schopnost textilie jako dostačující – nedošlo k poruše žádného čidla opatřeného ochrannou textilií ve sledovaném čase. Potvrzena byla tedy funkčnost (ochrana vůči elektromagnetickému záření, mechanická odolnost) v této diplomové práci navrženého technického řešení.

Na závěr práce byl navržen a zhotoven přípravek, který napomáhá k úpravě plošné textilie do tvaru s kruhovým průřezem tak, aby aplikace elektromagneticky stínící textilie na elektrickou součástku byla co nejjednodušší a vyhovovala snížení náročnosti aplikace při samotné montáži a kompletace zařízení ve výrobním procesu.

## Seznam použité literatury

- [1] PAUL, Clayton R. a Scully R C. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. B.m.: John Wiley & Sons, 2022. ISBN 978-1-119-40434-7.
- [2] SVAČINA, J. *ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA*. B.m.: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2002
- [3] WILLIAMS, Tim. *EMC for Product Designers*. B.m.: Newnes, 2016. ISBN 978-0-08-101014-3.
- [4] ZHANG, Hong-Li, Yu XIA a Jing-Gang GAI. Ultrathin Active Layer for Transparent Electromagnetic Shielding Window. *ACS Omega* [online]. 2018, **3**(3), 2765–2772. ISSN 2470-1343, 2470-1343. Dostupné z: doi:10.1021/acsomega.7b02033
- [5] MISTIK, S. İlker, Erhan SANCAK1, İsmail USTA, E. Dilara KOÇAK a Mehmet AKALIN1. INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING PROPERTIES OF BORON AND CARBON FIBRE WOVEN FABRICS AND THEIR POLYMER COMPOSITES. In: *RMUTP International Conference: Textiles & Fashion*. 2012.
- [6] 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. ISSN 00218995, 10974628. Dostupné z: doi:10.1002/app.29812
- [7] YIN, Jianjun, Wensuo MA, Zuobin GAO, Xianqing LEI a Chenhui JIA. A Review of Electromagnetic Shielding Fabric, Wave-Absorbing Fabric and Wave-Transparent Fabric. *Polymers* [online]. 2022, **14**(3), 377. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym14030377
- [8] JAGATHEESAN, Krishnasamy, Alagirusamy RAMASAMY, Apurba DAS a Ananjan BASU. Electromagnetic shielding behaviour of conductive filler composites and conductive fabrics – A review. *INDIAN J. FIBRE TEXT. RES.* 2014.
- [9] MUNALLI, D., G. DIMITRAKIS, D. CHRONOPOULOS, S. GREEDY a A. LONG. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **173**, 106906. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.106906
- [10] MAITY, Subhankar, Kunal SINGHA, Pulak DEBNATH a Mrinal SINGHA. Textiles in Electromagnetic Radiation Protection. *Journal of Safety Engineering*. 2013.
- [11] PALANISAMY, Sundaramoorthy, Veronika TUNAKOVA, Shi HU, Tao YANG, Dana KREMENAKOVA, Mohanapriya VENKATARAMAN, Michal PETRU a Jiri MILITKY. Electromagnetic Interference Shielding of Metal Coated Ultrathin Nonwoven Fabrics and Their Factorial Design. *Polymers* [online]. 2021, **13**(4), 484. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13040484

- [12] PALANISAMY, Sundaramoorthy, Veronika TUNAKOVA a Jiri MILITKY. Fiber-based structures for electromagnetic shielding – comparison of different materials and textile structures. *Textile Research Journal* [online]. 2018, **88**(17), 1992–2012. ISSN 0040-5175, 1746-7748. Dostupné z: doi:10.1177/0040517517715085
- [13] ŠAFÁŘOVÁ, Veronika a Jiří MILITKÝ. Multifunctional metal composite textile shields against electromagnetic radiation-effect of various parameters on electromagnetic shielding effectiveness. *Polymer Composites* [online]. 2017, **38**(2), 309–323. ISSN 02728397. Dostupné z: doi:10.1002/pc.23588
- [14] GRÉGR, J. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. B.m.: Technická univerzita v Liberci. 2014
- [15] TUNÁKOVÁ, Veronika, Jan GRÉGR, Maroš TUNÁK a Gejza DOHNAL. Functional polyester fabric/polypyrrole polymer composites for electromagnetic shielding: Optimization of process parameters. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2018, **47**(5), 686–711. ISSN 1528-0837, 1530-8057. Dostupné z: doi:10.1177/1528083716667262
- [16] TUNAKOVA, Veronika, Maros TUNAK, Vladimir BAJZIK, Larysa OCHERETNA, Svitlana ARABULI, Olena KYZYMCHUK a Viktoriia VLASENKO. Hybrid knitted fabric for electromagnetic radiation shielding. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2020, **15**, 155892502092539. ISSN 1558-9250, 1558-9250. Dostupné z: doi:10.1177/1558925020925397
- [17] TUNAKOVA, Veronika, Maros TUNAK a Jana NOVOTNA. Porous, low thickness carbon-fiber reinforced epoxy composites with excellent flexibility and superior electromagnetic radiation protection. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2023, **53**, 152808372311598. ISSN 1528-0837, 1530-8057. Dostupné z: doi:10.1177/15280837231159867
- [18] ARSYLINE.CZ. *MEFTEX® | Meftex* [online]. [vid. 2024-01-21]. Dostupné z: <https://www.meftex.cz/cs>
- [19] Shieldex EMI/RF/EMC Shielding Fabric and Materials - Textile Shielding. *Shieldex® – Metallized Technical Textiles* [online]. [vid. 2024-01-21]. Dostupné z: [https://www.shieldex.de/en/products\\_categories/fabrics/](https://www.shieldex.de/en/products_categories/fabrics/)
- [20] SOLUTIONS, Holland Shielding Systems BV | Leader in EMI/RFI shielding gaskets and. Conductive textile & tapes. *Holland Shielding Systems B.V.* [online]. [vid. 2024-01-21]. Dostupné z: <https://hollandshielding.com/en/conductive-textile>
- [21] IN: WIĘCKOWSKI, TADEUSZ W., a JAROSŁAW M. JANUKIEWICZ. Methods For Evaluating The Shielding Effectiveness Of Textiles. *Wroclaw University of Technology: FIBRES & TEXTILES*. 2006, (Vol. 14.), 5. ISSN 1230-3666.

- [22] 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), 260. ISSN 2079-9292. Dostupné z: doi:10.3390/electronics7100260
- [23] ŠAFÁŘOVÁ, Veronika, Maroš TUNÁK, Martin TRUHLÁŘ a Jiří MILITKÝ. A new method and apparatus for evaluating the electromagnetic shielding effectiveness of textiles. *Textile Research Journal* [online]. 2016, 86(1), 44–56. ISSN 0040-5175, 1746-7748. Dostupné z: doi:10.1177/0040517515581587
- [24] D09 COMMITTEE. *Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials* [online]. B.m.: ASTM International. nedatováno [vid. 2023-06-22]. Dostupné z: doi:10.1520/D4935-18
- [25] ZNC3 / 9kHz to 3GHz 2-port Vector Network Analyzer / Rohde & Schwarz USA, Inc. / AV-iQ [online]. [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.av-iq.com/avcat/ctl1642/index.cfm?manufacturer=rohde-schwarz-usa&product=znc3>
- [26] Test Fixture, Shielding Effectiveness | EM-2108 | 1.5 GHz – 10 GHz. *EM Antennas* [online]. 27. říjen 2022 [vid. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://em-antennas.com/product/test-fixture-shielding-effectiveness-em-2108-1-5-ghz-10-ghz/>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní členění elektromagnetické kompatibility [2].....	12
Obrázek 2: Kombinace elektrické a magnetické složky EM vlny [6].....	14
Obrázek 3: Elektromagnetické spektrum [5].....	14
Obrázek 4: Mechanismus stínění [6].....	15
Obrázek 5: Mikroskopický snímek dvou různých přízí [13].....	20
Obrázek 6. NaturalShield [10].....	21
Obrázek 7. FlecTron® [10] .....	21
Obrázek 8. FlecTron® -N [10].....	22
Obrázek 9. See-Through Conductive Fabric [10] .....	22
Obrázek 10: Meftex [18] .....	23
Obrázek 11: Shieldex [19].....	24
Obrázek 12: Holland Shielding [20].....	24
Obrázek 13. Free-Space method [22] .....	25
Obrázek 14: Zařízení FUoMG [22] .....	26
Obrázek 15. Shield Box Method [22].....	27
Obrázek 16. Modifikované zařízení TUL [23].....	27
Obrázek 17. Koaxiální měření [9] .....	28
Obrázek 18. Shield room method [6] .....	29
Obrázek 19. Schéma MIL-STD-285 [21].....	29
Obrázek 20: SEM snímky pokovených textilií se zvětšením 100x.....	31
Obrázek 21: Vector Network Analyzer ZNC3 [25] .....	32
Obrázek 22: Vektorový přístroj katedry materiálového inženýrství .....	33
Obrázek 23: Půdorys hlavice koaxiální metody [24] .....	33
Obrázek 24: Normované zakrytí hlavice vzorkem.....	34
Obrázek 25: Uložení krátkého vzorku na testovací hlavici.....	35
Obrázek 26: Grafické znázornění průměrných hodnot SE vzorku plného a úzkého.....	35
Obrázek 27: Porovnání průměrných hodnot včetně 95% IS vzorků pro 3 vybrané frekvence vzorku plného a úzkého .....	36
Obrázek 28: Schéma spojení materiálu .....	38
Obrázek 29: Grafické znázornění průměrných hodnot SE vzorku plného a lepeného.....	38

Obrázek 30: Porovnání průměrných hodnot včetně 95% IS vzorků pro 3 vybrané frekvence vzorku plného a lepeného .....	39
Obrázek 31: Grafické znázornění stínící účinnosti všech vzorků .....	41
Obrázek 32: Grafické porovnání stínící účinnosti všech vzorků při frekvenci 3 GHz.....	42
Obrázek 33: 3 vzorky s nejlepšími vlastnostmi při frekvenci 3 GHz.....	42
Obrázek 34: Testovací hlavice EM-2108 [26] .....	43
Obrázek 35: Grafické znázornění stínící účinnosti pro 6 GHz.....	44
Obrázek 36: Grafické porovnání stínící účinnosti při frekvenci 6 GHz.....	45
Obrázek 37: Testometric M350-10CT .....	48
Obrázek 38: Vzorek po zkoušce průniku čepelí.....	48
Obrázek 39: Počáteční pozice ostří ke zkoušenému vzorku.....	49
Obrázek 40: Grafické znázornění průměrných hodnot.....	50
Obrázek 41: Grafické porovnání průměrů síly řezu materiálem s 95% IS.....	51
Obrázek 42: Stav detektorů před aplikací ochranné textilie.....	52
Obrázek 43: Části detektoru: (a) elektrická součástka určená k ochraně a (b) polymerní ochranný domek do nějž se součástka vkládá .....	53
Obrázek 44: Čidlo v ochranné textilii.....	54
Obrázek 45: Stav detektorů po aplikaci ochranné textilie.....	54
Obrázek 46: Tvarovací válec (a) Tvarovací válec a (b) Bokorys válce .....	56
Obrázek 47: Tvarovací válec s magnetovým skřipcem.....	56
Obrázek 48: Čepy uchycení válce (a) Čep ovládací a (b) Čep doprovodný.....	57
Obrázek 49: Tvarovací válec s čepy .....	57
Obrázek 50: Boky rámu přípravku (a) Bok hnacího čepu (b) Bok s ložisky .....	58
Obrázek 51: Kompletace sestavy s boky .....	58
Obrázek 52: Model prototypu přípravku pro úpravu textilie .....	59
Obrázek 53: Zpracování textilie na reálném přípravku .....	60

## Seznam tabulek

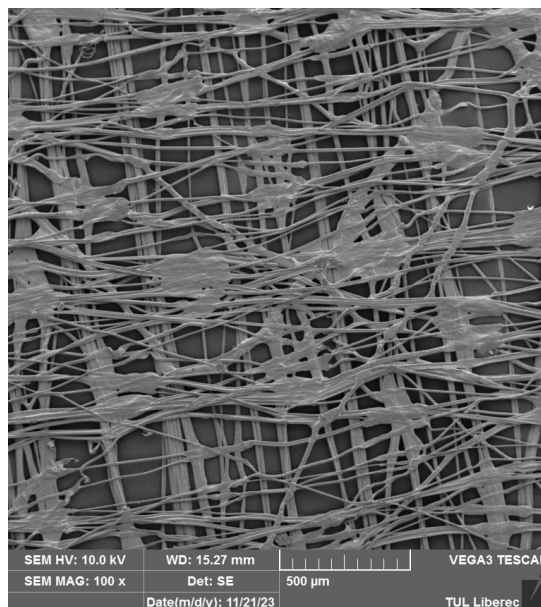
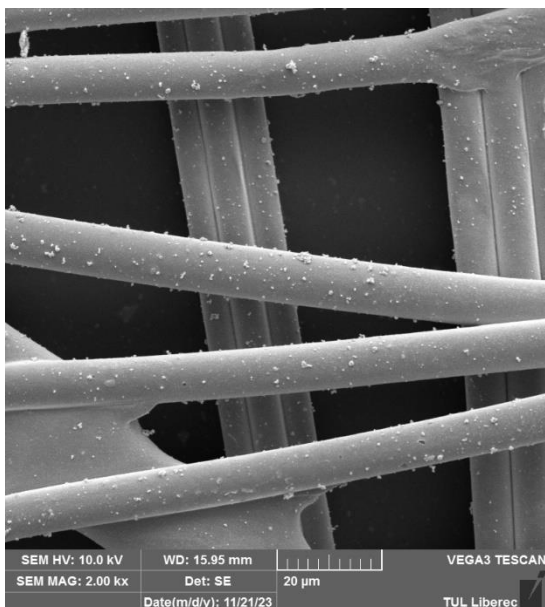
Tabulka 1: Obchodní rozdělení vlastností textilie Meftex .....	23
Tabulka 2: Základní charakteristika pokovených vzorků.....	32
Tabulka 3: Párový t-test pro frekvenci 1 GHz pro SE vzorku plného a úzkého .....	37
Tabulka 4: Párový t-test pro frekvenci 1 GHz pro SE vzorku plného a lepeného .....	40
Tabulka 5: SE při frekvenci 3 GHz s 95% IS.....	41
Tabulka 6: SE při frekvenci 6 GHz s 95% IS.....	45
Tabulka 7: ANOVA: jeden faktor pro SE (f = 6 GHz) .....	46
Tabulka 8: Vstupní parametry přístroje.....	49
Tabulka 9: Maximální síla potřebná k průniku ostří vzorky .....	50
Tabulka 10: Průměrné hodnoty síly z průniku ostří materiálem s 95% IS.....	51



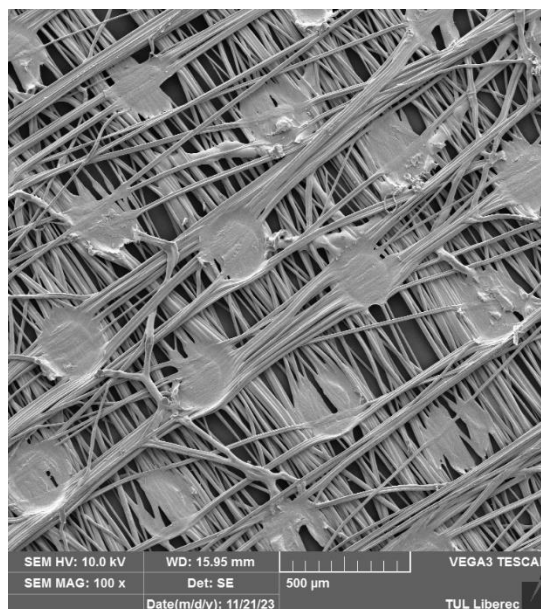
## Seznam příloh

### 1. Příloha 1: Elektronové snímky vzorků zvětšených 2000x a 100x

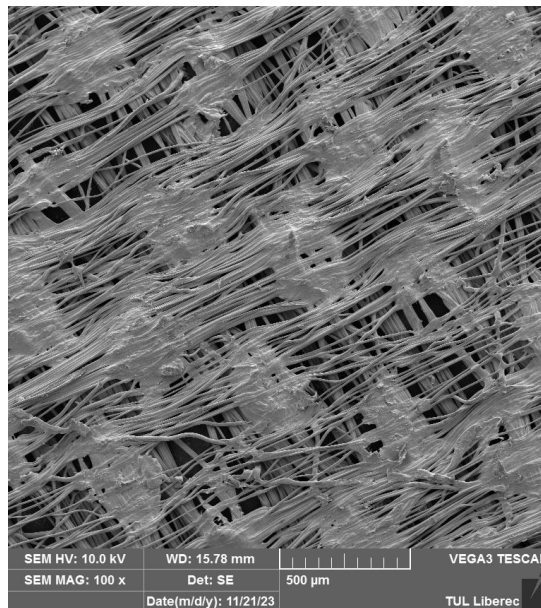
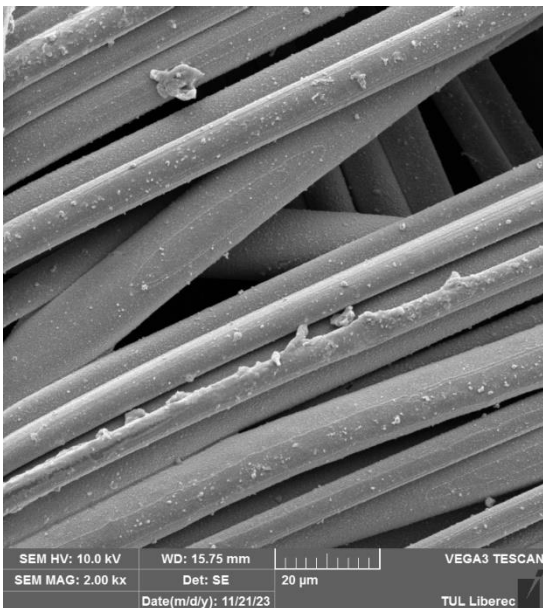
Vzorek 1



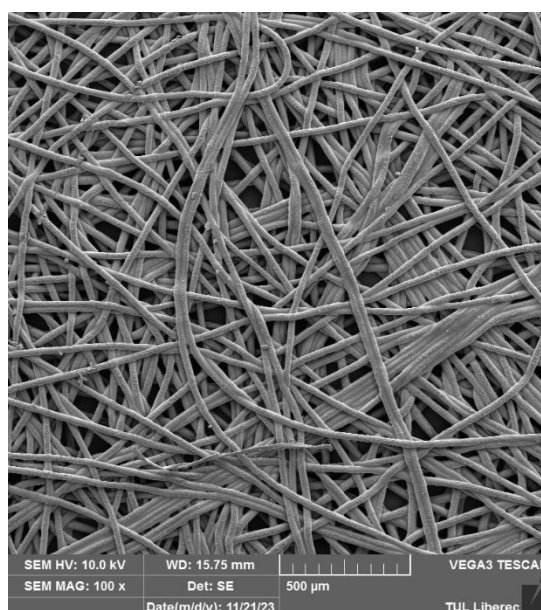
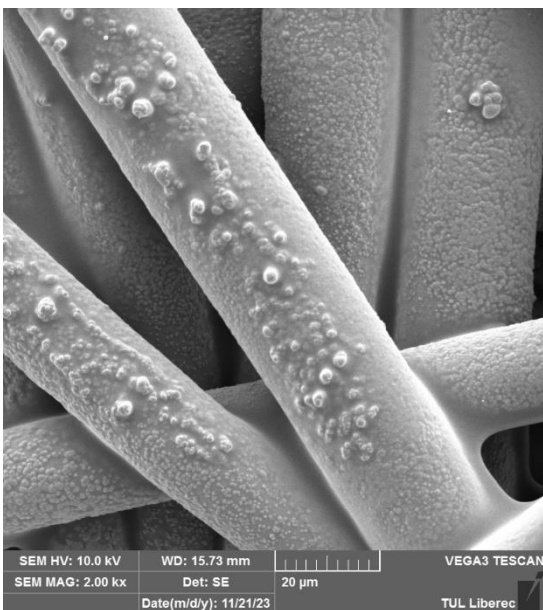
Vzorek 2



Vzorek 3

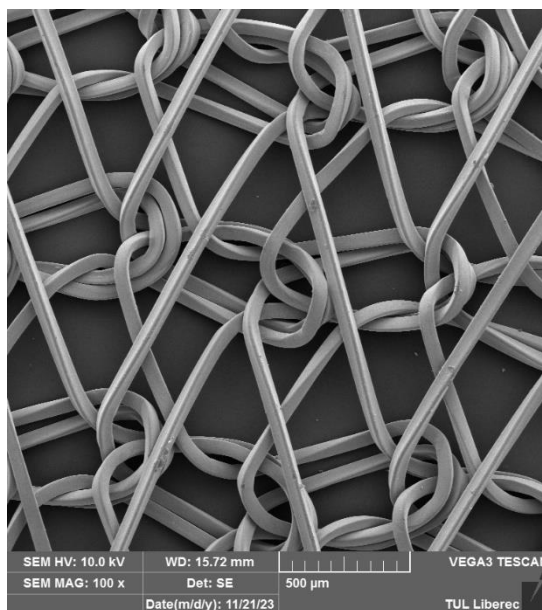
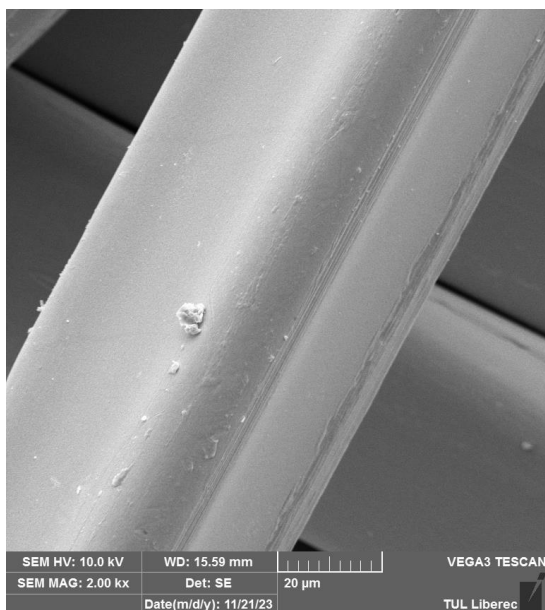


Vzorek 4

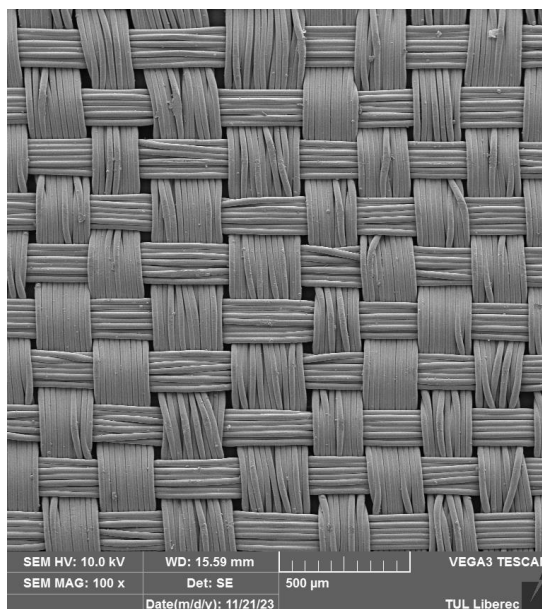
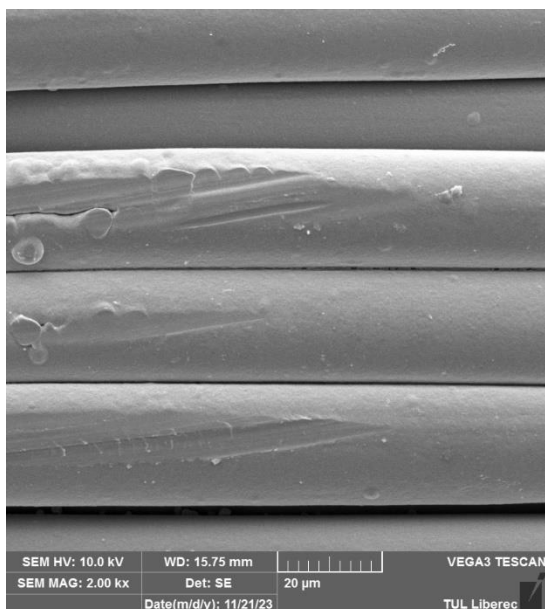




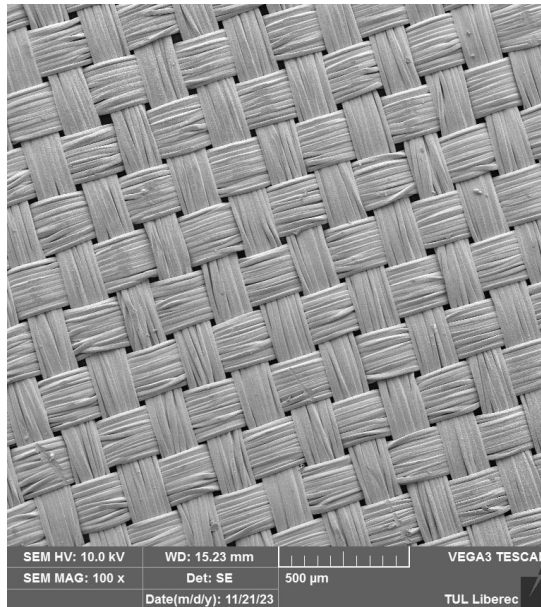
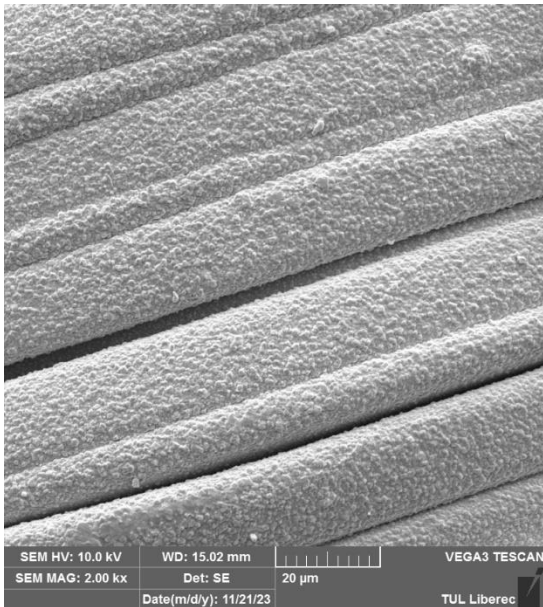
Vzorek 5



Vzorek 6



Vzorek 7



Vzorek 8

