



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



TEXTILIE SE ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ VŮČI ELEKTROMAGNETICKÉMU SMOGU

Ing. Veronika Šafářová

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: TEXTILIE SE ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ
VŮČI ELEKTROMAGNETICKÉMU SMOGU
Autor: Ing. Veronika Šafářová
Obor doktorského studia: Textilní technika
Forma studia: Prezenční
Školící pracoviště: Katedra textilních materiálů
Školitel: prof. Ing. Jiří Militký, CSc.

Složení komise pro obhajobu disertační práce

Předseda: prof. Ing. Luboš Hes, DrSc., Dr.h.c.
Místopředseda: doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.
Členové: doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.
prof. Ing. Jaroslav Šesták, DrSc., Dr.h.c.
doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.
Ing. Blanka Tomková, Ph.D.
doc. RNDr. Jiří Vaníček, CSc.
Oponenti: Ing. Jiří Procházka
doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.

S disertační prací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci.

ANOTACE

V současné době je každý z nás vystaven expozici elektromagnetického záření jak doma, tak v zaměstnání a není pochyb o tom, že elektromagnetická pole mají biologické účinky na lidský organismus. Tato skutečnost vytváří podnět k potřebě vývoje textilií a oděvů s dostatečnou ochranou vůči tzv. elektrosmogu. Tato disertační práce se zabývá tvorbou plošných textilií a následně oděvů se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním, popř. oděvním průmyslu. Hlavní pozornost je věnována návrhu a následnému průzkumu textilních struktur v linii „vlákno – příze – textilie“ především z hlediska elektrického chování, odolnosti vůči elektromagnetickému smogu a vybraným komfortním a užitným charakteristikám vyvinutých textilií. V práci jsou porovnány různé metody měření elektromagnetické stínící účinnosti textilií. Navrženo a otestováno je nové zařízení určené pro měření parametru stínící účinnosti plošných materiálů. Na závěr je prozkoumán také vztah mezi elektrickou vodivostí a elektromagnetickým stíněním. Výsledky práce ukazují, že navržené textilie a oděvy splňují požadavky kladené jak na dostatečnou úroveň odstínění elektromagnetického pole, tak na příznivé mechanické, termofyziologické a užitné vlastnosti.

Klíčová slova: efektivita elektromagnetického stínění, elektrické vlastnosti, hybridní textilie, kovová vlákna

ANNOTATION

Electromagnetic radiation surrounds us both at home and in work each day nowadays and there is no doubt that electromagnetic radiation may pose serious health effects on the human body. This fact creates an impulse for the necessity of development of fabrics and clothing with sufficient electromagnetic smog protection. This thesis examines the possibilities of creating fabrics and clothes with increased resistivity to electromagnetic smog while preserving basic characteristics of textile structures designated for clothing purposes. The main attention is paid to design and subsequent examination of textile structures „fiber – yarn – fabric“ especially in terms of electrical behavior, electromagnetic smog resistivity and chosen thermo-physiological comfort and utility characteristics of developed fabrics. Comparison of fabric electromagnetic shielding measurement performed by different instruments and approaches is performed. New apparatus designated for evaluation of electromagnetic shielding efficiency of planar materials is proposed and tested. A relationship between electrical conductivity and electromagnetic shielding is also examined. The results show that designed fabrics and clothes satisfy the requirements for both sufficient level of electromagnetic shielding and positive mechanical, thermophysiological and usable properties.

Key words: electromagnetic shielding efficiency, electric properties, hybrid fabrics, metal fibers

АННОТАЦИЯ

В настоящее время каждый из нас подвергается воздействию электромагнитного облучения дома, во многих случаях и на рабочем месте. Нет сомнений, что электромагнитное поле имеет патогенное влияние на человека. Этот факт послужил импульсом для данной работы. Диссертационная работа посвящена разработке текстильных полотен с повышенной стойкостью к электромагнитным излучениям и изделий из них. Внимание прежде всего уделяется разработке и исследованию текстильных структур «волокно – пряжа – текстильное полотно» с точки зрения их электрических свойств и стойкости к электромагнитному smogu. Кроме того исследуются избранные характеристики комфортности и потребительские свойства предложенных текстильных структур. В работе изучаются количество проволяющей компоненты, её расположение, и другие параметры, влияющие на защитные свойства текстильных полотен от электромагнитных излучений. Проведено сравнение результатов измерений эффективности электромагнитного экранирования, которые были получены с использованием различных методов и измерительных приборов. Разработано и протестировано собственное устройство для измерения эффективности электромагнитного экранирования текстильных полотен, а также исследована зависимость между электропроводностью и экранированием электромагнитного излучения. Результаты работы показывают, что разработанные текстильные полотна и изделия из них соответствуют требованиям по защите от воздействия электромагнитного поля, в то же время обладают достаточными механическими, термофизиологическими и потребительскими свойствами.

Ключевые слова: эффективность электромагнитного экранирования, электрические свойства, гибридные текстильные полотна, металлические волокна

Obsah

1	Úvod	1
2	Předmět a cíle disertační práce	2
3	Přehled současného stavu problematiky	4
4	Použité metody	6
5	Studované materiály	8
6	Přehled dosažených výsledků	14
6.1	Hodnocení elektrické vodivosti textilních útvarů	14
6.2	Textilie se zvýšenou schopností odstínit elektromagnetické pole	16
6.3	Experimentální ověření nového zařízení pro měření elektromagnetické stínící účinnosti textilních vzorků	21
6.4	Porovnání různých měřících metod používaných pro hodnocení stínící účinnosti	22
6.5	Možnosti predikce elektromagnetického stínění	23
6.6	Prototypy oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu	24
7	Zhodnocení výsledků a nových poznatků	25
8	Použitá literatura	28
9	Práce autora se vztahem ke studované problematice	33
9.1	Publikace v odborných časopisech	33
9.2	Kapitola v odborné knize	33
9.3	Příspěvek ve sborníku mezinárodní konference	34
9.4	Příspěvek ve sborníku domácí konference	36
9.5	Užitný vzor	36
	Curriculum Vitae	37
	Stručná charakteristika dosavadní odborné a vědecké činnosti	38
	Zápis o vykonání státní doktorské zkoušky	40
	Vyjádření školitele doktoranda	41
	Oponentské posudky disertační práce	42

1 Úvod

Současná doba charakterizovaná bouřlivým rozvojem elektroniky, zejména v oblasti mikroprocesorové a komunikační techniky, s sebou přináší současně s vítanými možnostmi použití těchto zařízení i negativní vlivy, a to především nevídaný nárůst umělých zdrojů elektromagnetického pole. V konečném důsledku je každý z nás vystaven expozici elektromagnetického pole jak doma, tak i v zaměstnání, a to stejnosměrným elektrickým a magnetickým polem, střídavým nízkofrekvenčním elektrickým a magnetickým polem a vysokofrekvenčním polem. Zdrojem elektromagnetického záření je výroba a přenos elektrické energie, používání domácích elektrických přístrojů, telekomunikace, rozhlasové a televizní vysílání apod. Elektromagnetickým rušením můžeme označit jakýkoli elektromagnetický jev, který může zhoršit provoz přístroje, zařízení nebo systému anebo nepříznivě ovlivnit živou či neživou hmotu. Negativní biologické účinky uměle vytvářených elektromagnetických polí jsou celosvětově označovány jako „elektrosmog“. Je nesporné, že tato pole mají účinek na člověka, jako ostatně na každé vodivé těleso. Zdravotní účinek těchto polí a záření na lidský organismus je mimo jiné závislý na typu záření, jeho frekvenci, intenzitě (ta klesá se vzdáleností od zdroje) a době působení, tak i na vnímavosti konkrétního člověka (obecně jsou k těmto veličinám vnímavější děti, starší a nemocné osoby, existují jedinci se zvýšenou citlivostí vůči elektromagnetickým polím).

Elektromagnetické stínění je jedním z nejdůležitějších odrušovacích prostředků elektromagnetické kompatibility. Materiály používané pro tvorbu elektromagnetického stínění jsou charakteristické zejména vysokou elektrickou vodivostí a vysokou permeabilitou, proto největší efektivity dosahují kryty založené na použití kovů. Jedním z rozhodujících parametrů pro zlepšení odolnosti vůči elektromagnetickému smogu, snížení tendence k hromadění elektrostatického náboje a konstrukci inteligentních textilií obsahující vodivé dráhy je elektrická vodivost. Elektricky vodivé textilie se často používají ve speciálních oděvních a technických aplikacích, kde je účelem nahradit klasické kovy resp. jiné materiály pomocí flexibilních (textilních) struktur.

Škodlivé účinky záření na pracovištích s vysokou intenzitou, či dlouhou dobou expozice (pracovníci rozvodu velmi vysokého napětí, montéři vedení, operátoři počítačů aj.) je možno omezit přímou ochranou pracovníka (osobními ochrannými pracovními prostředky), závěsy, zástěnami apod. Za tímto účelem je vhodné použití plošných textilií se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému záření, které splňují i požadavky kladené na textilie určené pro oděvní účely, popř. požadavky na zachování cirkulace vzduchu na pracovišti.

Z uvedeného je zřejmá zvýšená poptávka po vývoji nových oděvních a speciálních technických textilií s unikátními vlastnostmi požadovanými pro jejich aplikace popsané výše. Cílem této disertační práce je přispět k rozvoji současného stavu problematiky v oblasti konstrukce textilií odolných vůči elektromagnetickému smogu určených zejména pro oděvní účely.

2 Předmět a cíle disertační práce

Předmětem disertační práce je prostudování vybraných textilních struktur „vlákno – příze – textilie“ z hlediska především elektrického chování a odolnosti vůči elektrickému smogu. Cílem práce je vytvoření plošných textilií se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému záření při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví. Jako studovaný soubor vzorků byly zvoleny plošné textilie (tkané, pletené), tvořené tzv. hybridními přízemi obsahujícími kromě klasických polymerních textilních vláken také velmi jemná staplová vlákna kovová.

Vlastní práce je rozdělena do sedmi kapitol. Ve třetí kapitole je uveden stručný přehled prací zabývajících se danou problematikou. Čtvrtá kapitola pojednává o teorii stínění elektromagnetického pole vč. metodiky hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti a možnostech predikce této veličiny. Pátá kapitola se věnuje elektrickým vlastnostem materiálů, popisuje různé přístupy tvorby elektricky vodivých textilií, jejich hodnocení z hlediska elektrické vodivosti a možnosti predikce této veličiny. Následující kapitola se podrobně věnuje experimentálnímu vývoji a hodnocení struktur odolných vůči elektromagnetickému smogu. Tato experimentální část práce je rozdělena do několika celků.

První oblast experimentální části disertační práce je věnována studiu elektrické vodivosti a vybraných mechanických vlastností lineárních textilních útvarů – vláken, přízí. Pro hodnocení elektrických vlastností délkových textilních útvarů bylo vyvinuto zařízení, pomocí něhož bylo možno sledovat závislost elektrického odporu na upínací délce útvaru. Byla navržena metodika měření, která odstraňuje nevýhody současného stavu techniky a eliminuje problém kontaktních odporů při experimentálním hodnocení elektrického odporu délkových textilních útvarů. Byl studován vliv vodivé komponenty (vodivého vlákna) na elektrické vlastnosti lineárních útvarů a vyhodnocen byl perkolační práh vodivé složky.

Elektrickými vlastnostmi vytvořených plošných textilních útvarů, hodnocenými prostřednictvím měření normovaných parametrů povrchové a objemové rezistivity, se zabývá další oblast experimentální části práce. Bylo realizováno měření účinnosti elektromagnetického stínění charakterizující odolnost textilie vůči elektromagnetickému smogu. Experimentálně byl studován vliv obsahu vodivé komponenty na elektrické vlastnosti plošných textilních útvarů a vliv obsahu vodivé komponenty na odolnost textilie vůči elektromagnetickému smogu. Byly stanoveny perkolační prahy vodivého vlákna. Na základě výsledků z regresních modelů byl optimalizován obsah vodivé komponenty v plošné textilii pro získání postačující elektrické vodivosti, resp. postačující odolnosti vůči elektromagnetickému smogu pro konkrétní aplikace. Byly studovány také další vybrané vlastnosti (např. mechanické, užitné, komfortní, odolnost v údržbě), u nichž byla předpokládána změna se zvýšením obsahu vodivé komponenty v textilii.

Třetí oblast experimentální části práce popisuje ověření vhodnosti použití v práci nově navrženého a zkonstruovaného zařízení pro hodnocení stínící účinnosti plošných materiálů.

V rámci čtvrté dílčí kapitoly praktické části práce byly experimentálně prostudovány různé přístupy a metodiky hodnocení textilií z hlediska účinnosti elektromagnetického stínění používané v současné době ve světě a bylo provedeno jejich porovnání.

Průzkum závislosti účinnosti elektromagnetického stínění na elektrické vodivosti textilií popisuje pátá oblast experimentální části práce, a to zejména kvůli možnosti stanovení odolnosti textilie vůči elektromagnetickému smogu přímo ze znalosti elektrických vlastností, které jsou snadno měřitelné. Ze získaných experimentálních dat byly vytvořeny regresní predikční modely. Byly ověřovány také publikované numerické modely určené k výpočtu efektivit stínění na základě znalosti elektrických vlastností kompozitních materiálů.

V rámci čtvrtého celku práce byly prostudovány různé přístupy a metodiky hodnocení textilií z hlediska účinnosti elektromagnetického stínění a bylo provedeno jejich porovnání.

Poslední podkapitola experimentální části práce je věnována přípravě prototypů oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu. V rámci této části práce je provedeno také shrnutí hodnocení připravených prototypů z hlediska jejich stínící účinnosti a komfortu nošení.

Závěrem je provedeno zhodnocení výsledků práce a doporučení pro další činnost v uvedené oblasti.

Dílčí cíle disertační práce je možné rozdělit do následujících okruhů:

- návrh, výroba a ověření zařízení pro měření elektrického odporu lineárních útvarů v závislosti na upínací délce,
- vytvoření metodiky měření povrchového odporu délkových textilních útvarů s eliminací kontaktních odporů,
- průzkum závislosti elektrického odporu na upínací délce různých textilních útvarů,
- příprava dostatečně vodivých přízí pro konstrukci textilií odolných vůči elektromagnetickému smogu a jejich hodnocení
- studium elektrické vodivosti a účinnosti elektromagnetického stínění plošných textilních útvarů vyrobených z připravených přízí v závislosti na různých faktorech, vč. konstrukce mechanistických modelů a predikčních rovnic,
- hodnocení navržených plošných textilií z hlediska dalších vlastností (např. mechanické, užité, komfortní, odolnost v údržbě),
- experimentální ověření vhodnosti použití nově navrženého přístupu měření elektromagnetického stínění,
- experimentální porovnání výsledků hodnocení stínící účinnosti provedené pomocí různých měřících metodik,
- průzkum a validace platnosti modelů predikujících odolnost textilie vůči pronikání elektromagnetického záření na základě znalosti elektrických vlastností textilní struktury,
- příprava prototypů oděvů se zvýšeným komfortem odolných vůči elektromagnetickému smogu.

3 Přehled současného stavu problematiky

Nejvhodnější materiály určené pro stínění elektromagnetického pole vykazují vysokou elektrickou vodivost a vysokou magnetickou permeabilitu, a proto největší efektivity dosahují kryty založené na použití kovů [39–43, 45, 46]. Snahou moderního materiálového inženýrství je však kovy nahradit polymerními materiály, a to zejména kvůli jejich nízké hmotnosti, mechanickým vlastnostem a ceně.

Většina syntetických vláken používaných v textilním průmyslu jsou elektrické izolanty s měrným odporem (rezistivitou) řádově 10^{12} – 10^{14} $\Omega\cdot\text{m}$ [62, 64–68]. To je nevyhovující pro potřeby zajištění odvodu statického náboje a pro elektromagnetické stínění v oblastech, kde je nutná eliminace elektromagnetického smogu [63]. Např. rezistivita pro antistatické materiály se pohybuje v rozmezí 10^2 – 10^9 $\Omega\cdot\text{m}$ (odpovídá povrchové rezistivitě cca 10^5 – 10^{12} Ω); zatímco pro materiály, určené ke stínění elektromagnetického pole je nutná rezistivita nižší než 10 $\Omega\cdot\text{m}$ (odpovídá požadavku na povrchovou rezistivitu nižší než 10^4 Ω). Elektricky vodivé textilie mohou být vyrobeny použitím elektricky vodivého základního elementu – vlákna [69, 70]. Použitím vláken kovových, uhlíkových, polymerních plněných vodivými aditivami, bikomponentních či vláken z vodivých polymerů se zabývá celá řada prací [1–12]. Další možností výroby elektricky vodivých textilií je jejich pokovování a povrstvování vodivými polymery, či vodivými částicemi. Jak je uvedeno v práci COTTETA [13], pro tvorbu textilií se zvýšenou vodivostí, resp. odolností vůči elektromagnetickému smogu určených pro oděvní aplikace je nutno dbát určitých omezení. Tyto požadavky se týkají mechanických vlastností a s tím spojených vlastností strukturních, tepelných charakteristik, omaku atd.

Jak shrnuje ve své práci CLINGERMAN [14], elektrická vodivost vícesložkových materiálů je závislá především na objemové frakci vodivé komponenty. Při nízkém obsahu vodivé složky se vodivost kompozitu pohybuje velice blízko vodivosti čisté polymerní matrice. Po překročení určité hodnoty koncentrace (perkolační prahu) dochází náhle ke zvýšení vodivosti o několik řádů. Perkolační práh odpovídá koncentraci, kdy se již částice chovají podobně jako spojitá vodivá struktura. Kromě koncentrace částic mají podstatný vliv na elektrickou vodivost celého útvaru fyzikální vlastnosti obou složek, zahrnující strukturní vlastnosti, povrchové a elektrické vlastnosti vodivé komponenty. Numerické modely elektrické vodivosti vícesložkových materiálů lze rozdělit do čtyř hlavních skupin. Jsou to modely statistické (např. KIRKPATRICK [15], BUECHE [16]), termodynamické (MAMUNYA [17, 18]), geometrické (MALLIARIS [19]) a strukturně orientované modely (např. práce NIELSENA [20]).

Elektricky vodivé polymery přitahují v posledních 20 letech velkou pozornost díky tomu, že současně vynikají jak fyzikálními a chemickými vlastnostmi organických polymerů, tak elektrickými vlastnostmi kovů. Z tohoto důvodu jsou kovové materiály čteně nahrazovány elektricky vodivými polymery v řadě aplikací, zejména pak v elektrickém a elektronickém průmyslu [21, 22]. Jedním z nejpoužívanějších přístupů výroby elektricky vodivých textilií z obtížně zpracovatelných vodivých polymerů je tvora submikronově silných vrstev

vodivých polymerů na existující textilní substrát. V současné době je možno nalézt velké množství odborných článků pojednávajících o úpravě textilií zejména vodivým polymerem polyanilinem a polypyrrolem [9, 23, 24]. Účinnost stínění takto upravených textilií se se pohybuje v oblasti cca 20 db pro 1.5 GHz. Uhlíková vlákna představují další skupinu elektricky vodivých vláken potenciálně vhodných pro konstrukci stínících bariér díky příznivé elektrické vodivosti, chemické odolnosti a nízké hustotě. Jejich nevýhodou je však velmi vysoký modul pružnosti v porovnání s vlákny klasickými. Použití uhlíkových nanotrubic či začlenění vodivého plniva (uhlíková čern) představuje další přístupy jak získat vodivou textilní strukturu [25, 26]. Pro dosažení perkolačního prahu je však třeba včlenit dostatečné množství vodivých částic (někdy až 40 obj. %), což způsobuje značné snížení mechanických vlastností. Je nutno připomenout, že textilie vytvořené výše zmíněnými přístupy jsou určeny spíše pro technické použití než pro oděvní účely, a to zejména díky nepříznivým mechanickým a užitým vlastnostem.

Velmi uspokojujících výsledků stínící účinnosti bylo dosaženo při začlenění kovových či pokovených vláken a přízí do plošných textilií. Použití stříbrem povrstvených vláken obchodního označení X-static pro přípravu elektromagneticky stínících textilií popisuje ve své práci např. OZEK A KOL. [27]. Keprová tkanina tvořená 100 % příze obsahující pouze vlákno X-static dosahuje při frekvenci 1.5 GHz stínící účinnosti cca 60 dB. Zjištěno také bylo, že zakrytí (které závisí na jemnosti příze a dostavě tkaniny) má významný vliv na výslednou stínící účinnost.

Práce autorů DURAN A KOL. [28] představuje využití jádrových přízí pro konstrukci vodivých textilií vhodných pro stínění elektromagnetického smogu. Jako jádro bylo použito stříbrné hedvábí tloušťky cca 40 μm , pro opředení byla použita bavlněná vlákna. Tkanina připravená z jádrových přízí dosahovala při frekvenci 1.5 GHz cca 30 dB. Bylo zjištěno, že stínící schopnost lze zlepšit použitím vyšší dostavy osnovy a útku. Obdobné jádrové příze využívají pro konstrukci elektromagneticky stínících textilií autoři ORTLEK A KOL. [29]. V tomto případě však jádro příze tvořeno nerezovým ocelovým drátem tloušťky 20 μm . Tkaniny a pleteniny vyrobené z přízí získaných skaním bavlněné příze a měděného drátu průměru 0.05 a 0.1 mm jsou představeny v práci [30], přičemž průměrná hodnota stínící účinnosti se pohybuje kolem 10 db pro frekvenci 1.5 GHz. Pozorována byla vyšší stínící účinnost vzorku při použití měděného drátu s nižším průměrem a více vrstev materiálu.

Stoprocentní odstínění elektromagnetického pole ve svém článku popisují autoři SHYR a SHIE [5]. Pro docílení vysoké stínící schopnosti tkanin využili příze jemnosti 500 tex tvořené 100 % nekonečných nerezových ocelových vláken průměru 12 μm . Průměry kovových vláken ($d = 0.08 - 0.15 \text{ mm}$) a jemnosti přízí použitých v předchozích studiích [31–33] jsou však příliš vysoké, aby byly textilie z nich vytvořené dostatečně flexibilní pro oděvní použití.

Účinnost elektromagnetického stínění souvisí zejména s tloušťkou materiálu (přepážky), její elektrickou vodivostí, permitivitou a permeabilitou, dále pak parametry zdroje a parametry obklopujícího prostředí jak je uvedeno v práci HEMMINGA [34]. Numerické modely stanovení účinnosti elektromagnetického stínění textilních materiálů lze rozdělit do dvou oblastí. Jedná se o modely založené buď na struktuře plošné textilie (analýza zeslabení účinnosti stínící přepážky způsobená otvory v oblasti vazných bodů, viz práce PERUMALRAJE [35]), nebo na elektrických vlastnostech plošné textilie, především objemové rezistivitě (viz práce např. [33, 36–38]).

4 Použité metody

K měření elektrického odporu byl použit přístroj High Resistance Meter 4339B Hewlett Packard resp. digitální multimeter Agilent 34401A. Délkové textilní útvary (vlákna, příze) byly při měření upínány do elektrodového systému přípravku vyvinutého v rámci této disertační práce (obr. 4.1). Přípravek se skládá z nosné elektricky nevodivé podložky a dvou elektrod ve tvaru svorek. Jedna z elektrod je pevná, druhá je posuvná na stupnici od 10 do 300 mm s krokem 50 mm. Měřený materiál se upne do elektrodového systému pomocí kovových svorek (materiál svorek je volen tak, aby elektrický odpor přechodových kontaktů byl zanedbatelný vůči elektrickému odporu měřeného materiálu) a měří se elektrický odpor mezi elektrodami. Pomocí postupné změny upínací délky vzorku (10–300 mm) se proměří závislost elektrického odporu na délce lineárního textilního útvaru. Při každé upínací délce se standardně proměřuje alespoň 10 vzorků z důvodu větší variability přízí.

Pro měření povrchového a objemového odporu textilních materiálů a folií byla použita měřicí soustava obsahující koncentrický elektrodový systém odpovídající normě ČSN EN 1149-1, EN 100015, ČSN EN 61340-5-1 a měřicí přístroj. Pro hodnocení elektrických vlastností plošných textilií byly zvoleny dva parametry, a to povrchová a objemová rezistivita. Tyto parametry je možno stanovit ze znalosti hodnot povrchového a objemového odporu, příslušných rozměrů měřících elektrod, případně tloušťky vzorku.

Měření elektrického odporu bylo provedeno při klimatických podmínkách $t=(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$, $\varphi=(40\pm 2)\%$, což je v souladu s normou ČSN 80 0059. Testovací napětí $U=10\text{ V}$ bylo použito pro hodnoty elektrického odporu do $10^5\ \Omega$ a $U=100\text{ V}$ pro vyšší odpory (ČSN EN 61340-5-2).

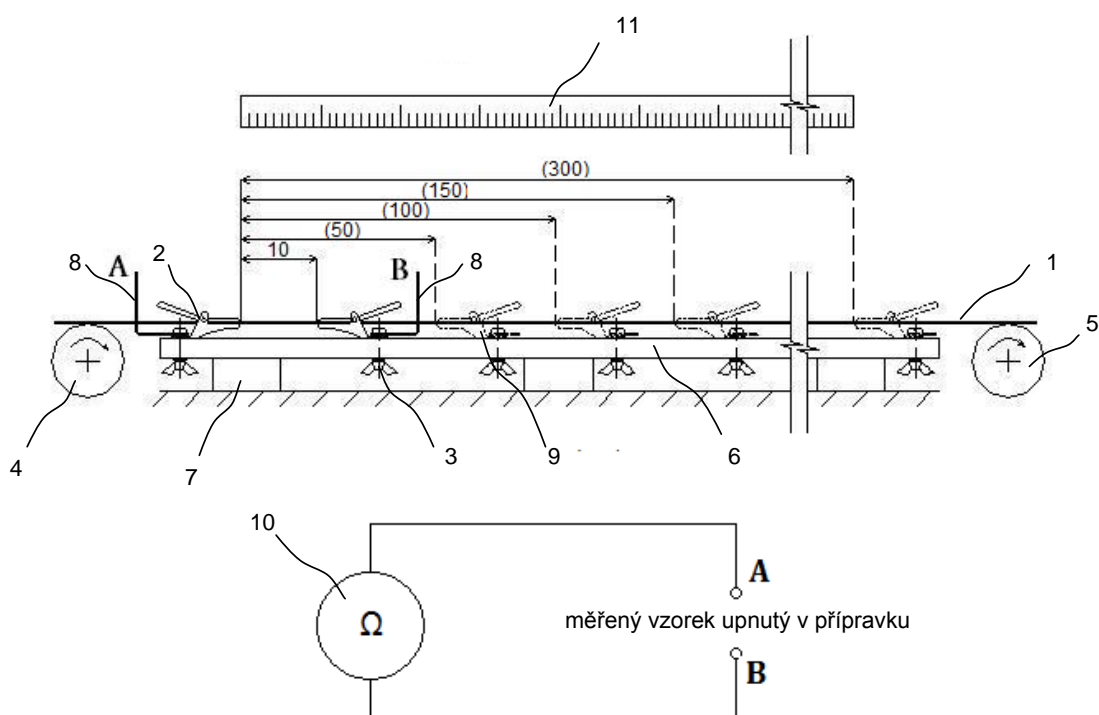
Účinnost elektromagnetického stínění plošných textilií byla hodnocena zejména dle normy ASTM 4935-99, která je určena pro hodnocení efektivity stínění plošných materiálů. Tato norma pracuje s předpokladem dopadu rovinné vlny na stínící přepážku v blízké zóně elektromagnetického pole pro frekvenci 30 MHz až 1.5 GHz. Měřicí přípravek sestával z držáku vzorku koaxiálního tvaru (výrobce Electro-Metrics, Inc., model EM-2107A), jehož vstup a výstup byl připojen k obvodovému analyzátoru. Pro generování a přijímání elektromagnetického signálu byl použit obvodový analyzátor Rhode & Schwarz ZNC3. Pro kalibraci měřicí soustavy se využívá referenční vzorek měřeného materiálu ve tvaru mezikruží. Měřený vzorek má tvar kruhu. Referenční a měřený vzorek musí být stejného materiálu a tloušťky [47, 50–52].

Zařízení vhodné pro rychlé hodnocení efektivity stínění textilních vzorků eliminující náročnou přípravu vzorků před měřením bylo vyvinuto v rámci disertační práce ve spolupráci s Fakultou mechatroniky, informatiky a mezioborových studií TUL. Zařízení se skládá z polouzavřeného vlnovodu a generátoru elektromagnetického záření. Vlnovod je uvnitř opatřen analyzátozem dopadajícího elektromagnetického pole. Textilie se při měření umísťuje na vstup vlnovodu a je orientována kolmo k dopadající vlně. Konec vlnovodu je opatřen pěnou nasycenou uhlíkem pro zajištění absorpce prošlé elektromagnetické vlny

na konci vlnovodu a znemožnění zpětných odrazů k analyzátoru. Velkou výhodou použití tohoto principu měření je vysoké odstínění od okolního rušení. Mezi nevýhody patří omezení použití vlnovodu s danými rozměry pro určité úzké frekvenční pásmo. Měření probíhalo při dvou frekvencích, a to 1.8 GHz (frekvence vysílání mobilních telefonů) a 2.4 GHz (frekvence mikrovln, popř. wifi vysílačů). Princip měření spočívá v měření dvou hodnot výkonové hustoty EM pole uvnitř vlnovodu, a to bez připevněné textilie a po překrytí vstupu vlnovodu textilií. Ze znalosti těchto dvou hodnot je možno vypočítat účinnost elektromagnetického stínění (SE) textilie.

Pro porovnání odlišných metod používaných pro hodnocení odolnosti textilií vůči elektromagnetickému smogu [48–50] byla účinnost elektromagnetického stínění dále hodnocena také pomocí modifikovaného zařízení určeného měření vzorků omezených rozměrů vycházející z ASTM D4935, metody stíněného prostoru dle EN 61000-5-7 a metody bezodrazové komory dle EN 50147-1.

V rámci disertační práce byly hodnoceny vybrané geometrické a mechanické vlastnosti vláken, přízí a plošných textilií a vybrané užité vlastnosti plošných textilií související s komfortem a opotřebením pomocí standardizovaných metod.



Obrázek 4.1: Schematický náčrt přípravku pro měření elektrického odporu délkových textilií: 1) měřený materiál, 2) elektrody ve tvaru svorek, do kterých je při měření upnut délkový textilní útvar, 3) upínání elektrod k nosné podložce skládající se ze šroubu, podložek a křídlové matice, 4) přívádění měřeného materiálu, 5) navíjení měřeného materiálu, 6) nosná podložka tvořená elektricky nevodivým materiálem, 7) speciální podstavec zabraňující posuv přípravku po podložce, 8) vodiče spojující místo kontaktu elektrod s měřeným materiálem a měřicí přístroj, 9) další možné upnutí druhé elektrody - změna délky měřeného úseku, 10) ohmmetr, 11) měřítko umístěné na nosné podložce.

5 Studované materiály

Byly studovány čtyři skupiny délkových útvarů. Jedná se o příze elektricky nevodivé, příze antistatické, příze hybridní a kovový drát. Jednotlivé lineární útvary byly zařazeny do skupin s ohledem na velikost jejich elektrické vodivosti. Příze elektricky nevodivé a kovový drát byly do studie zařazeny za účelem možnosti porovnání elektrické vodivosti.

Jako představitelé skupiny nevodivých přízí byly zvoleny příze materiálového složení 100% CO a 100% PES. Mezi zástupce skupiny přízí antistatických patří příze obchodního označení Beltron a Resistat obsahující ve své struktuře kromě klasických nevodivých vláken (PES) také bikomponentní vlákna se zvýšenou vodivostí. Použitá bikomponentní vlákna jsou dvojího typu. Příze Beltron obsahuje část vláken, kde je vodivá uhlíková vrstva umístěna uvnitř vlákna, viz obr. 5.1(a). Vodivá uhlíková vrstva tvoří plášť nevodivému jádru u části vláken příze Resistat, viz obr. 5.1(b).

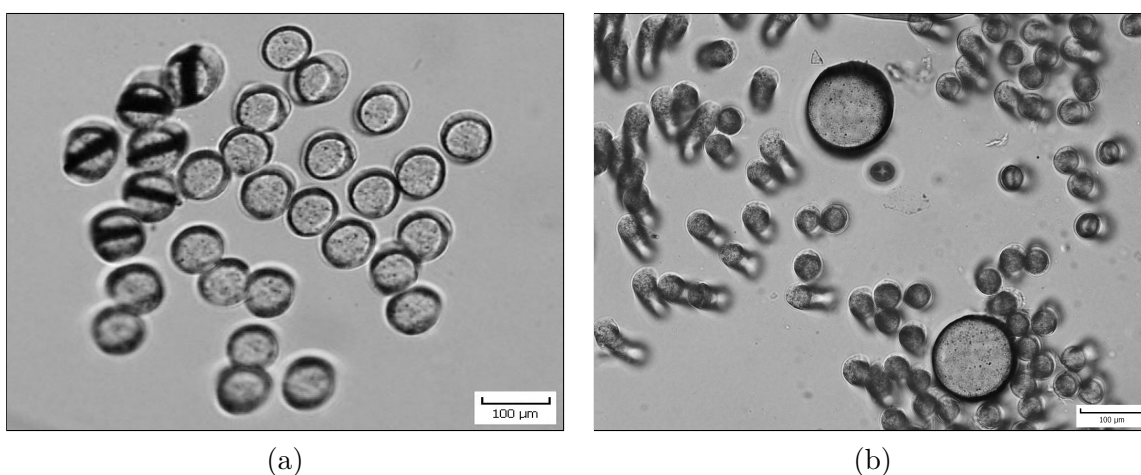
Směšováním klasických polypropylenových vláken (PP TREVON 2.2 dtex/50 mm) s vlákny kovovými (BEKINOX VS 08/050/2000 HCR, tloušťka cca 9 μm , jemnost cca 4 dtex, délka vlákna 30 - 50 mm) bylo docíleno zvýšení elektrické vodivosti tzv. hybridních přízí (obr. 5.2) při zachování ostatních vlastností kladených na příze používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví (nízká jemnost, příznivé mechanické vlastnosti, viz tabulka 5.1). Nerezová ocel byla zvolena vzhledem ke své dostatečně vysoké elektrické vodivosti, uspokojivé životnosti, flexibilitě a zejména kvůli odolnosti vůči korozi v prostředí běžného typu (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny atd.). Odolnost vůči korozi představuje důležitý požadavek na použitý materiál zejména díky plánované údržbě oděvů vyrobených z hybridních přízí praním. Nerezová ocelová vlákna obchodního označení Bekinox vyrábí belgická společnost Bekaert. Mezi hlavní komponenty této slitiny patří: Fe 68 %, Cr 18 %, Ni 12 %, Mo 2 %. Hybridní příze byly navrženy a vyrobeny ve spolupráci se společností Sintex, a.s. Bylo využito bavlnářského technologického postupu výroby přízí zahrnující přípravu k předení, mykání, protahování, předpřádání a dopřádání. Pramen se staplovým kovovým vláknem byl do výrobního procesu začleněn ve fázi protahování. Hybridní příze s různým obsahem vodivé komponenty byly vytvořeny ve dvou odlišných jemnostech. Vzorčky označené H1 až H20 představují příze jemnosti 25 tex a obsahem vodivého vlákna v rozmezí 1 % - 20 %. Vzorčky označené H20-50 až H60-50 zastupují hybridní příze jemnosti 50 tex a obsahu kovového vlákna od 20 % do 60 %. Do studie elektrické vodivosti byla zařazena také vlákna, která tvoří základní komponentu hybridních přízí, tj. vlákno polypropylenové a vlákno Bekinox. Hybridní příze a z nich vytvořené plošné textilie tvoří stěžejní část předložené práce. Základní specifikace všech délkových útvarů je uvedena v tabulce 5.2.

Tabulka 5.1: Vlastnosti vláken použitých pro konstrukci hybridních přízí.

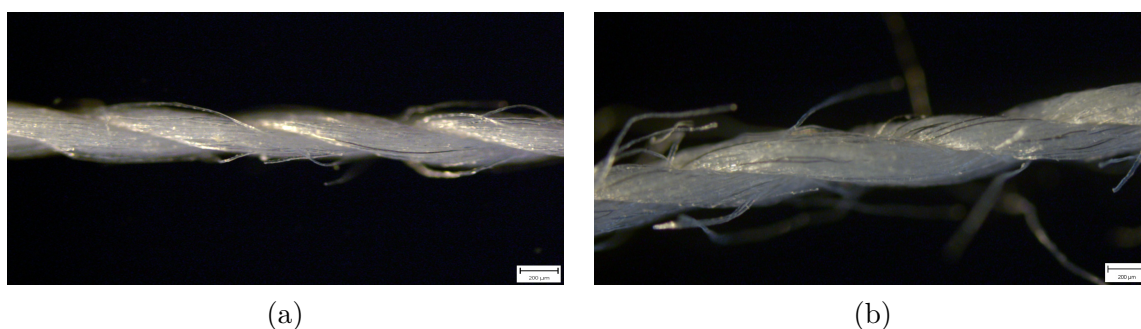
Vlákno	Jemnost [dtex]	Délka [mm]	Poměrná pevnost [cN/tex]	Prodloužení [%]	Modul pružnosti [cN/dtex]
Bekinox	3.85	40	14.35	1.29	111.56
PP	2.20	50	34.83	57.57	24.95

Tabulka 5.2: Parametry studovaných délkových útvarů.

Označení	Materiálové složení	Jemnost [tex]
PES	100% PL hedvábí	16
CO	100% CO příze	19
Drát	100% ocelový drát ME	14
Beltron	86 dtex f24 PESH + 24 dtex f6 Beltron B31	11
Resistat	81 dtex f35 PESH + 25 dtex f1 Resistat F9601	11
Bekinox vlákno	100% SS	0.4
PP vlákno	100% PP	0.22
H1	99 % PP/1 % SS	25
H3	97 % PP/3 % SS	25
H5	95 % PP/5 % SS	25
H10	90 % PP/10 % SS	25
H15	85 % PP/15 % SS	25
H20	80 % PP/20 % SS	25
H20-50	80 % PP/20 % SS	50
H40-50	60 % PP/40 % SS	50
H60-50	40 % PP/60 % SS	50



Obrázek 5.1: Mikroskopické pohledy na příčné řezy příze: (a) Beltron , (b) Resistat.



Obrázek 5.2: Mikroskopické snímky hybridní příze obsahující: (a) 1 %, (b) 20 % vodivé komponenty.

Přízí se zvýšenou elektrickou vodivostí bylo využito za účelem získání plošných textilií zabráňujících průchodu elektromagnetického záření. Ve spolupráci se společností Sintex a.s. byla navržena a vyrobena široká paleta textilií (tkanin, pletenin) tvořených přízemi obsahujícími ve své struktuře kromě konvenčního polypropylenového vlákna velmi tenká kovová staplová vlákna. Navržené textilie se lišily jak obsahem vodivé komponenty v použité přízi, tak různým umístěním tzv. hybridní příze v textilii, různou jemností použité příze, strukturou textilie a typem vazby. Základní parametry studovaných textilií jsou uvedeny v tabulce 5.3.

První skupinu vzorků představují tkaniny keprové vazby tvořené 100% hybridní přízí. Pro přípravu vzorků skupiny 1 byla použita příze jemnosti 50 tex obsahující 1 - 75 % nerezového ocelového vlákna. Dostava osnovy a útku byla u všech vzorků totožná - dostava útku $19.\text{cm}^{-1}$, dostava osnovy $20.\text{cm}^{-1}$. Jednotlivé vzorky v této skupině se od sebe lišily výší obsahu vodivé komponenty ve struktuře textilie (1% - 75%), viz obr. 5.3(a,b).

Druhá skupina vzorků je tvořena tkaninami keprové vazby, ve kterých je hybridní příze umístěna v osnově a útku v různých roztečích a vytváří tak tzv. vodivou mřížku. Pro přípravu vzorků skupiny 2 byla použita hybridní příze jemnosti 50 tex obsahující 5 % nerezového ocelového vlákna. Jednotlivé vzorky této skupiny se od sebe odlišovaly velikostí tzv. vodivé mřížky (3x3, 4x4, 5x5 mm), viz obr. 5.3(c,d). Jako nevodivá matrice byla u této skupiny vzorků použita 100% bavlněná příze jemnosti 50 tex. Dostava osnovy a útku byla u všech vzorků totožná - dostava útku $19.\text{cm}^{-1}$, dostava osnovy $20.\text{cm}^{-1}$.

Tkané vzorky keprové vazby obsahující tzv. vodivou mřížku o konstantní velikosti zastupují skupinu vzorků č. 3. Jednotlivé vzorky této skupiny se od sebe liší výší obsahu vodivé komponenty v přízi tvořící mřížku (1% - 20%), viz obr. 5.3(e,f). Jako nevodivá matrice je i u této skupiny vzorků použita 100% bavlněná příze. Obě použité příze mají jemnost 50 tex. Dostava osnovy a útku byla u všech vzorků totožná - dostava útku $19.\text{cm}^{-1}$, dostava osnovy $20.\text{cm}^{-1}$.

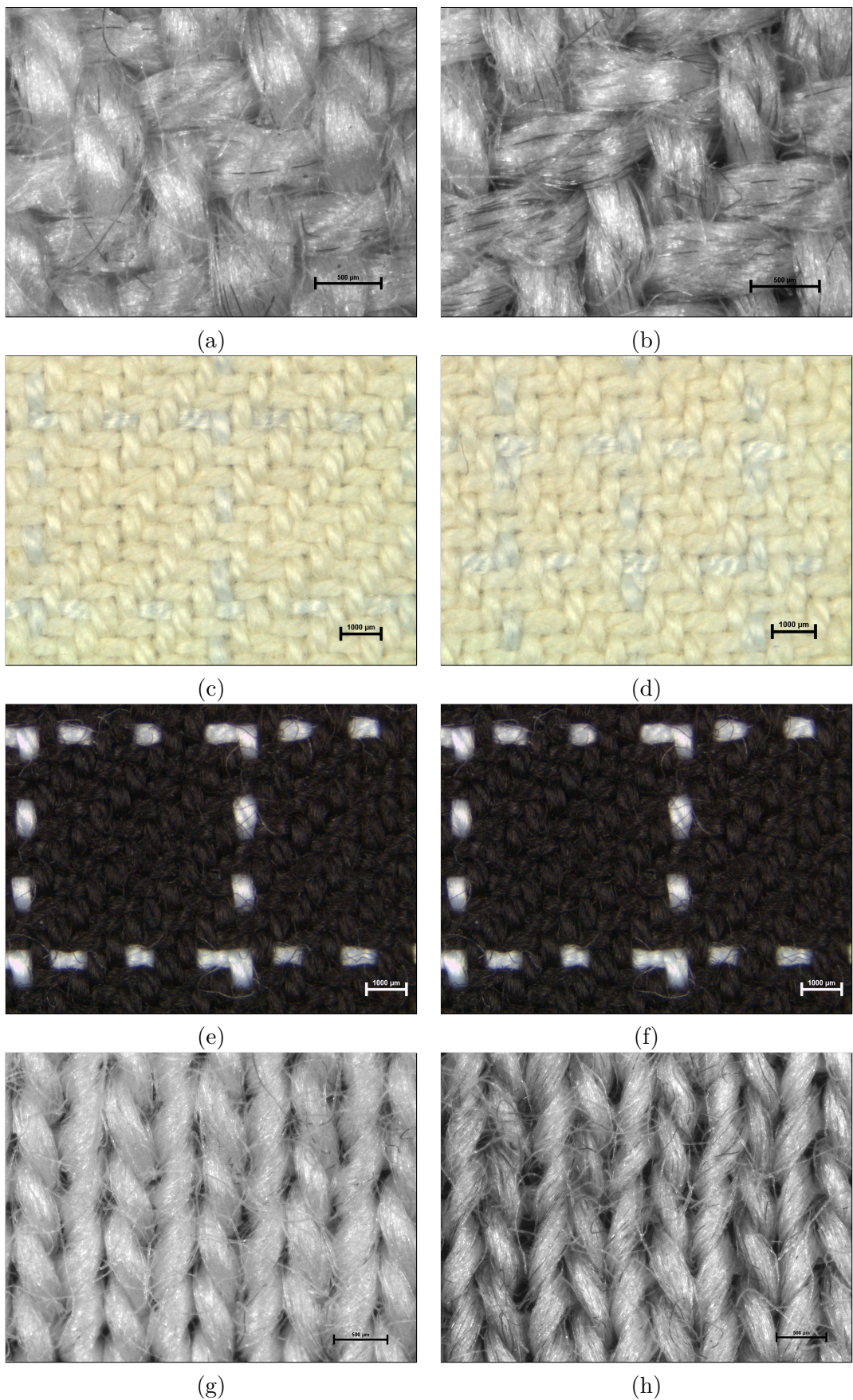
Čtvrtou skupinu vzorků tvoří vzorky hladké zátažné jednolící pleteniny vytvořené ze 100% hybridní příze. Jednotlivé vzorky v této skupině se liší výší obsahu vodivé komponenty v přízi (1% - 20%). Byla použita příze jemnosti 20 tex. Hustota řádků a sloupků byla u všech vzorků skupiny 4 totožná - hustota sloupků $12.\text{cm}^{-1}$, hustota řádků $16.\text{cm}^{-1}$. Mikroskopické snímky studovaných textilií jsou uvedeny na obr. 5.3(g,h).

Pátou skupinu vzorků zastupují pleteniny odlišné vazby tvořené 100% hybridní příze s obsahem vodivé komponenty (nerezového ocelového vlákna) 10 %. Jedná se o vazbu zátažnou jednolící hladkou, zátažnou jednolící výplňkovou (označena jako výplněk), zátažnou jednolící s chytovými kličkami (vzorek označený jako pique), zátažnou interlokovou pleteninu s podloženými kličkami (vzorek označený jako double face) a interlokovou pleteninu hladkou (označena jako interlok). Pro přípravu veškerých pletených vzorků byla použita příze jemnosti 25 tex. Mikroskopické snímky vzorků skupiny 5 jsou k nalezení na obr. 5.4.

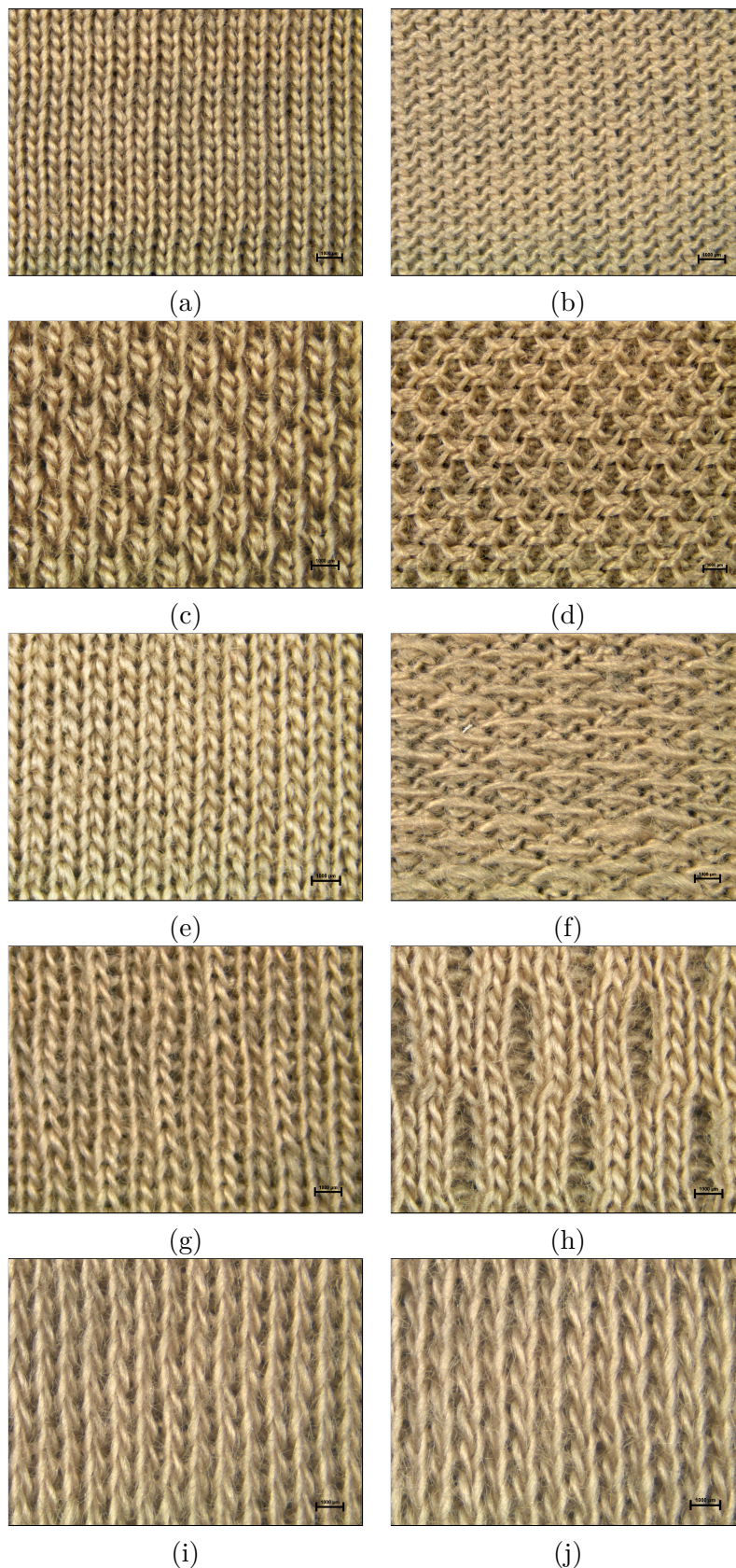
Tabulka 5.3: Parametry studovaných textilií.

Vzorek	Složení	Vazba	Umístění hybridní příze	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Tloušťka vzorku [mm]
Skupina 1	99% PP/1% SS*	Kepr 2/2	100%	233.50	0.78
	97% PP/3% SS			225.10	0.75
	95% PP/5% SS			209.02	0.77
	90% PP/10% SS			221.02	0.75
	85% PP/15% SS			217.66	0.73
	80% PP/20% SS			208.78	0.71
	60% PP/40% SS			206.46	0.70
	40% PP/60% SS			182.98	0.63
	25% PP/75% SS			159.40	0.57
Skupina 2	95% PP/5% SS+100% CO	Kepr 2/2	5x5 mm**	220.00	0.66
	95% PP/5% SS+100% CO		4x4 mm**	220.00	0.67
	95% PP/5% SS+100% CO		3x3 mm**	220.00	0.65
Skupina 3	99% PP/1% SS+100% CO	Kepr 2/2	5x5 mm**	221.98	0.83
	97% PP/3% SS+100% CO			216.22	0.83
	95% PP/5% SS+100% CO			225.34	0.83
	90% PP/10% SS+100% CO			221.26	0.83
	85% PP/15% SS+100% CO			222.70	0.83
	80% PP/20% SS+100% CO			222.94	0.83
Skupina 4	99% PP/1% SS	Jednolící pletenina	100%	157.67	0.67
	97% PP/3% SS			154.31	0.66
	99% PP/5% SS			151.91	0.64
	90% PP/10% SS			153.35	0.64
	85% PP/15% SS			149.99	0.65
	80% PP/20% SS			156.23	0.64
Skupina 5	90% PP/10% SS	Jednol. hl.		149.00	0.53
		Pique		186.00	0.86
		Výplněk	100%	168.00	0.68
		Doubleface		239.00	1.00
		Interlock		199.00	0.95

Poznámka: * SS - označení pro nerezové ocelové vlákno, ** rozteč tzv. hybridní příze v osnově a útku.



Obrázek 5.3: Mikroskopické snímky studovaných textilií: (a,b) skupina 1, obsah vodivé komponenty 5 %, resp. 20 %, (c,d) skupina 2, rozteč tzv. vodivé mřížky 5 mm, resp. 3 mm, (e,f) skupina 3 obsahující tzv. vodivou mřížku s 1 %, resp. 10 % kovu, (g,h) skupina 4 obsahující 1 %, resp. 20 % vodivé komponenty.



Obrázek 5.4: Mikroskopické snímky textilií skupiny 5: (a,b) zátažná jednolící pletenina hladká, (c,d) zátažná jednolící s chytovými klíčkami - pique, (e,f) zátažná jednolící výplňková - výplňek, (g,h) zátažná interloková pletenina s podloženými klíčkami - double face, (i,j) interloková pletenina hladká - interlok.

6 Přehled dosažených výsledků

6.1 Hodnocení elektrické vodivosti textilních útvarů

Cílem této části práce bylo prozkoumat zejména elektrické chování délkových textilních útvarů s ohledem na jejich budoucí využití pro přípravu plošných textilií a výrobků odolných průchodu elektrického pole, a to proto, že dostatečně vysoká elektrická vodivost je jedním ze stěžejních požadavků pro tvorbu stínících přepážek. Cílem tedy bylo vyhledat základní komponentu textilie - vlákna, která budou splňovat požadavek jak z hlediska vodivosti, tak z hlediska dalších vlastností (geometrické, mechanické, zpracovatelské, užité atp.).

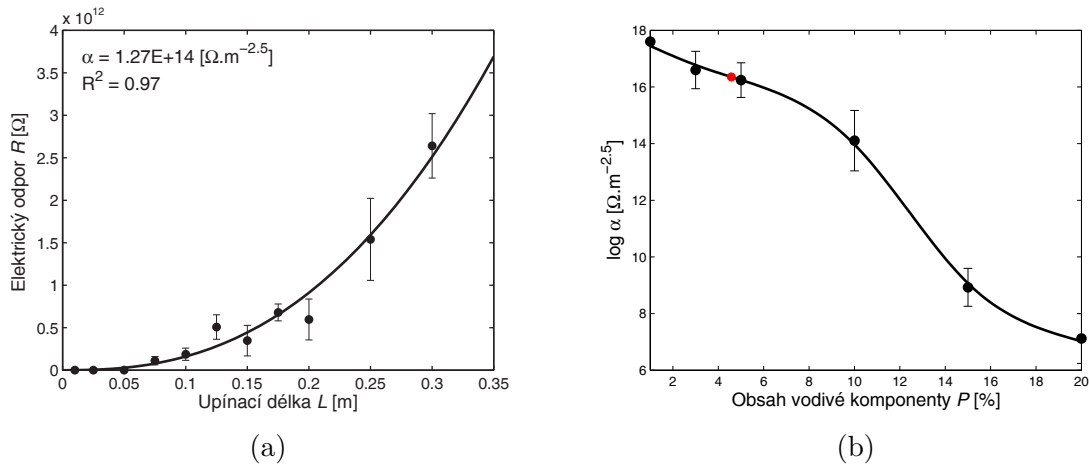
Byly prostudovány čtyři skupiny délkových útvarů - příze nevodivé (100% CO, 100% PES), antistatické, hybridní a kovový drát. Z provedených šetření lze shrnout: příze nevodivé a příze, které obsahují vodivou komponentu spojitě po celé své délce (studované antistatické příze) vykazují lineární závislost elektrického odporu na upínací délce, což je v souladu s teoretickými poznatky o závislosti elektrického odporu na vlastnostech vodiče. Z hlediska relativně vysoké hmotnostní rezistivity, resp. nízké elektrické vodivosti byly příze nevodivé a antistatické shledány jako nevhodné pro konstrukci bariérových textilií chránících proti elektromagnetickému smogu. Velikost elektrického odporu kovového drátu ($T = 14$ tex) byla velmi dobrá, díky svému vysokému průměru a s tím spojeným nepříznivým mechanickým vlastnostem je však kovový drát pro další textilní zpracování nevhodný.

Použití kovových vláken s velmi nízkým průměrem ($d < 10 \mu\text{m}$) konečné délky bylo shledáno jako perspektivní. Z hlediska materiálu byla zvolena nerezová ocel, a to zejména s ohledem na svou korozivzdornost. Odolnost vůči korozi představuje důležitý požadavek na použitý materiál díky plánované údržbě oděvů vyrobených z hybridních přízí praním. Byla navržena a vyrobena sada směsových přízí obsahujících různý obsah kovového vlákna ve struktuře příze, za účelem získání přízí s různou výší elektrické vodivosti. Jako nevodivá komponenta bylo použito staplové polypropylenové vlákno.

Sada hybridních přízí byla studována jak z hlediska elektrického chování, tak z hlediska vybraných mechanických vlastností. Bylo zjištěno a rozsáhlými experimenty potvrzeno, že v případě hybridních přízí obsahujících ve své struktuře velmi jemná kovová vlákna konečné délky je elektrický odpor R nelineární konvexně rostoucí funkcí upínací délky příze L (viz obr. 6.1(a)), což je v rozporu s chováním kovů a některých kompozitních materiálů. Byl navržen jednoduchý mechanistický model založený na předpokladu přímé úměrnosti změny elektrického odporu na efektivní délce příze. Tento model má tvar

$$R(L) = \frac{\alpha}{n+1} L^{n+1}. \quad (6.1)$$

kde α je součinitel úměrnosti (součinitel specifické rezistivity) a n je faktor spojený s útlumem elektrické vodivosti.



Obrázek 6.1: Závislost (a) elektrického odporu na upínací délce pro hybridní přízi jemnosti 25 tex označené H10 - obsahující 10 % vodivé komponenty, (b) logaritmu součinitele specifické rezistivity na obsahu vodivé komponenty P . Inflexní bod je vyznačen červenou barvou.

Součinitel specifické rezistivity α stanovený na základě navrženého vztahu je možno využít pro porovnání přízí s odlišným obsahem vodivé komponenty a pro predikci perkolačního prahu, přičemž právě perkolační práh je hlavním faktorem určujícím vodivost daného hybridního materiálu. Jedná se o kritický obsah vodivé komponenty, při kterém se daný materiál začne chovat jako vodič, což umožňuje optimalizaci množství poměrně finančně nákladných kovových vláken pro získání dostatečně vodivé příze vhodné pro konkrétní účel použití. V průběhu řešení práce bylo potvrzeno, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty P v přízi se zvyšuje její elektrická vodivost. Byl popsán perkolační práh obsahu vodivé komponenty, který se pohybuje okolo 5 % nerezového ocelového vlákna v přízi jemnosti 25 tex, viz obr. 6.1(b).

Studiem hybridních přízí jemnosti 50 tex bylo potvrzeno, že elektrický odpor je R je nelineární konvexně rostoucí funkcí upínací délky příze L a dále, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty v přízi klesá součinitel specifické rezistivity α , resp. zvyšuje se elektrická vodivost příze. Bylo zjištěno, že čím vyšší je obsah nerezového ocelového vlákna v přízi, tím více se faktor n blíží k hodnotě 1, tzn. závislost elektrického odporu na upínací délce získá lineární trend. Bylo zjištěno dále, že se zvyšujícím se zákrutem příze vzrůstá elektrická vodivost. Růst elektrické vodivosti je také možno pozorovat se zvýšením jemnosti příze.

Z hlediska provedeného mechanického hodnocení hybridních přízí lze shrnout, že obsah kovu má vliv na vybrané mechanické vlastnosti. Zvýšením obsahu kovového nerezového ocelového vlákna se snižuje poměrná pevnost a tažnost příze, zatímco počáteční modul v tahu a dynamický modul stanovený na základě rychlosti šíření zvukového impulsu v přízi se vzrůstajícím obsahem kovového vlákna v přízi stoupá.

Lze shrnout, že se podařilo docílit zvýšení elektrické vodivosti hybridních přízí při zachování ostatních vlastností kladných na příze používané v textilním průmyslu (nízká jemnost, příznivé mechanické, zpracovatelské a užitné vlastnosti). Na základě provedených šetření jak elektrických, tak mechanických vlastností byly tedy hybridní příze obsahující velmi jemná kovová vlákna shledány jako perspektivní pro konstrukci plošných textilií se zvýšenou vodivostí a předpokládanou odolností vůči elektromagnetickému smogu.

Dílní výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [80, 99, 107, 111].

6.2 Textilie se zvýšenou schopností odstínit elektromagnetické pole

Cílem této části práce bylo navrhnout, vytvořit a následně z různých hledisek prostudovat plošné textilie vytvořené za účelem ochrany lidského těla před účinky elektromagnetického pole. Ve spolupráci se společností Sintex a.s. byla vyrobena široká paleta textilií (tkanin, pletenin) tvořených přízemi obsahujícími ve své struktuře kromě konvenčního polypropylenového vlákna velmi jemná staplová nerezová ocelová vlákna, čímž bylo docíleno zvýšení elektrické vodivosti textilií při zachování ostatních vlastností kladených na materiály používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví. Jednotlivé textilie se lišily jednak výší obsahu vodivé komponenty v přízi, tak různým umístěním tzv. hybridní příze v textilii, jemností použité příze, strukturou (pletěnina, tkanina) a typem vazby. Veškeré vyvinuté plošné textilie byly testovány z hlediska elektrických vlastností a účinnosti elektromagnetického stínění. Jelikož byly textilie určeny pro oděvní účely, byl dále studován vliv údržby (praní) na stínící účinnost a hodnoceny vybrané charakteristiky související s komfortem nošení a opotřebením.

Hodnocení elektrické vodivosti

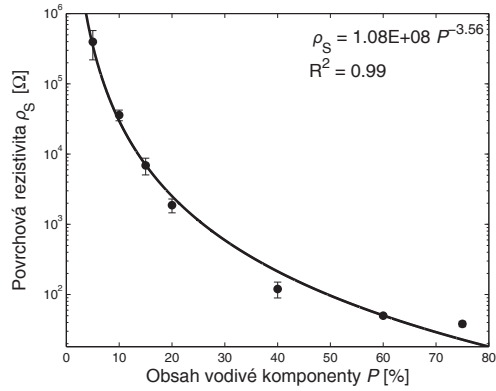
Za účelem studia výše elektrické vodivosti byl textilie byly hodnoceny z hlediska jejich povrchové a objemové rezistivity. Byl studován vliv vodivé komponenty spolu s perkolačními prahy a vliv umístění tzv. hybridní příze v textilii na výsledné elektrické vlastnosti. Na základě provedených experimentů se ukázalo, že se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty (nerezového ocelového vlákna) ve vzorku klesá jak povrchová, tak objemová rezistivita, resp. zvyšuje se elektrická vodivost, přičemž zvýšení obsahu kovového vlákna z 1 % na 10 % zapříčiní pokles rezistivity o 3 řády. Při dalším zvýšení koncentrace vodivé komponenty na 75 % poklesne rezistivita o 6, resp. 4 řády pro povrchovou resp. objemovou rezistivitu. Perkolační práh, který charakterizuje kritický obsah vodivé komponenty, při kterém se chování materiálu začne blížit elektrickému vodiči, byl u tkaných vzorků tvořených zcela hybridními přízemi (skupina vzorků 1) pozorován v oblasti 3 - 5 %. Při zvyšování koncentrace vodivé komponenty nad 60 % již nedocházelo k výraznému poklesu rezistivity. Závislost objemové i povrchové rezistivity na obsahu vodivé komponenty nad perkolačním prahem je možno aproximovat pomocí mocninné funkce v souladu se vztahy uvedenými v práci CLINGERMANNA [14]

$$\rho_V = \rho_{CV} P^E \quad (6.2)$$

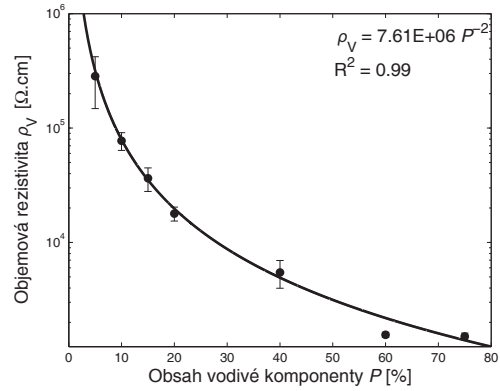
$$\rho_S = \rho_{CS} P^E \quad (6.3)$$

kde ρ_{CV} , resp. ρ_{CS} je objemová rezistivita, resp. povrchová rezistivita pro $P = 1$ % vodivé komponenty v přízi, P je obsah nerezového ocelového vlákna a parametr E je závislý na struktuře vodivé komponenty (viz obr. 6.2). Navržený vztah je možno použít pro odhad výše elektrické vodivosti textilie při daném obsahu vodivé komponenty.

Obdobné chování elektrické vodivosti v závislosti na obsahu vodivé komponenty bylo pozorováno také u pletených vzorků (skupiny 4). Pleteniny však v porovnání s tkaninami dosahují nižší vodivosti, což je způsobeno použitím jemnějších přízí, nižší plošnou hmotností pletenin a celkově nižším obsahem vodivé komponenty na jednotku plochy i objemu pletených vzorků.

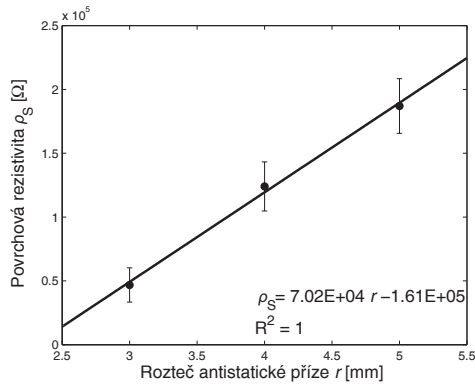


(a)

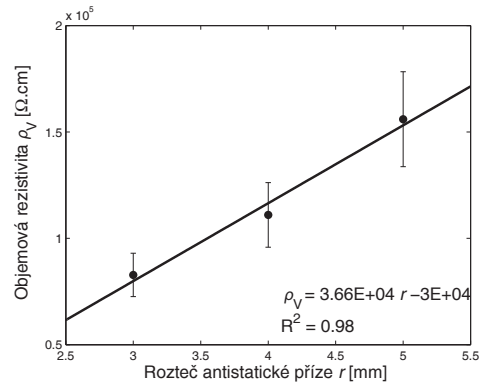


(b)

Obrázek 6.2: Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi v oblasti nad perkolačním prahem pro skupinu vzorků č. 1 proložená mocninou funkcí



(a)



(b)

Obrázek 6.3: Závislost (a) plošné rezistivity, (b) objemové rezistivity na rozteči hybridní příze tvořící tzv. vodivou mřížku ve skupině vzorků č. 2.

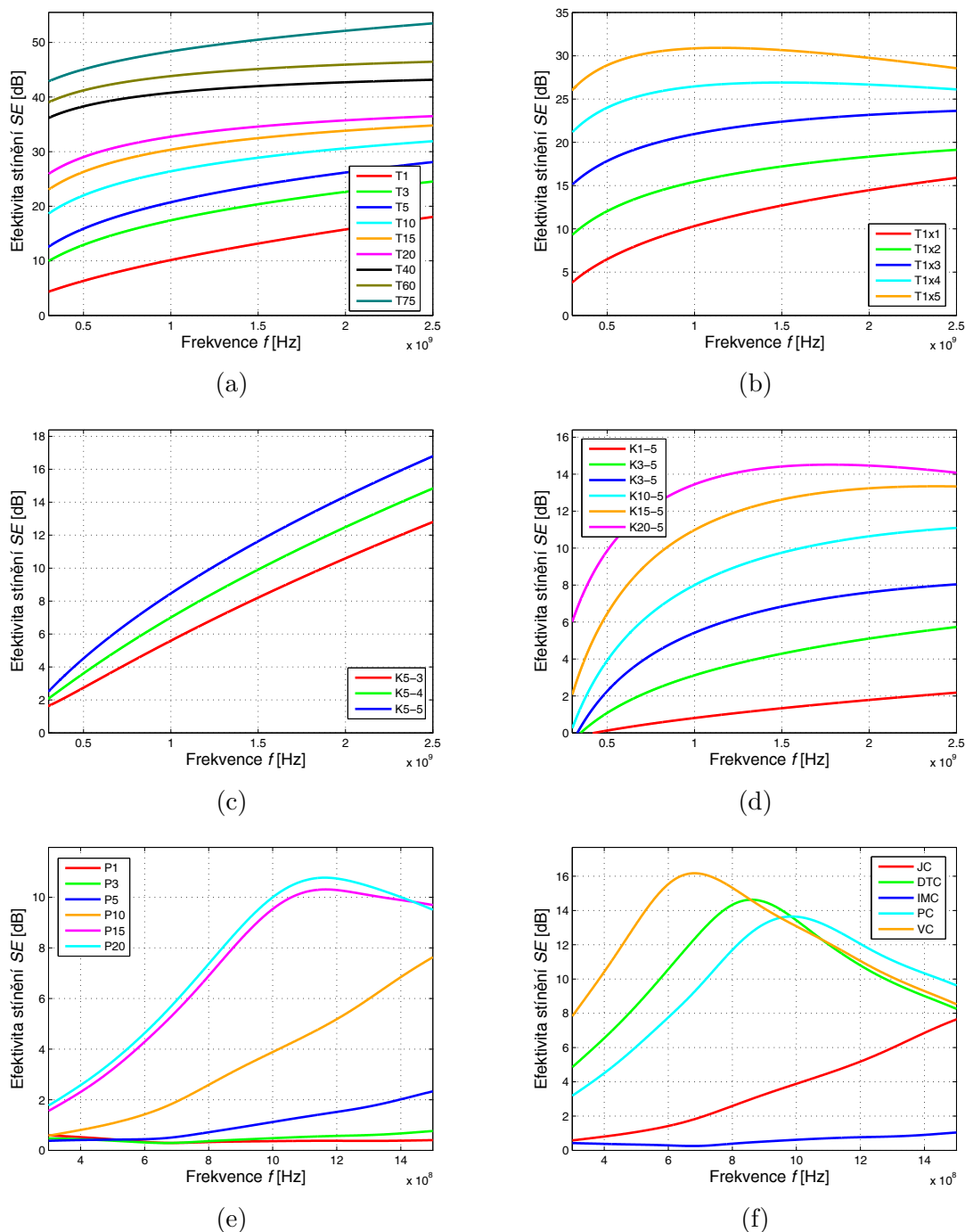
Uspokojivých výsledků výše elektrické vodivosti bylo dosaženo při použití hybridní příze pouze jako tzv. vodivé mřížky ve tkanině. Matrici v tomto případě tvoří nevodivá bavlněná příze. I zde je možno pozorovat pokles elektrické rezistivity se zvyšujícím se obsahem vodivé komponenty v přízi tvořící mřížku (skupina vzorků 3). I v tomto případě je možno závislost aproximovat pomocí mocninné funkce. Výsledky ukázaly, že se zvyšující se roztečí hybridní příze v osnově a útku při zachování konstantního obsahu nerezového ocelového vlákna v přízi (skupina vzorků 2) se elektrická vodivost tkaniny snižuje. Závislost je možno aproximovat pomocí lineární funkce, viz obr. 6.3.

Hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti

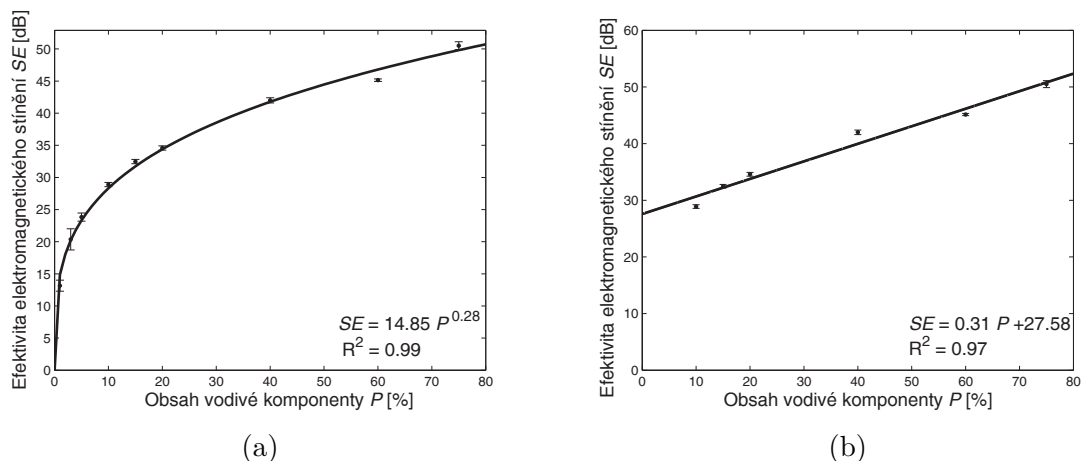
U veškerých vyvinutých textilií byla hodnocena také elektromagnetická stínící účinnost (SE), a to pomocí přerušného koaxiálního vedení dle americké normy ASTM D4935. Dle této metodiky lze hodnotit efektivitu stínění na frekvenčním pásmu od 30 MHz do 1.5 GHz. Byla studována frekvenční závislost stínící účinnosti, vliv obsahu vodivé komponenty, vliv počtu vrstev, vliv velikosti vodivé mřížky a vliv struktury na celkovou stínící účinnost.

Bylo zjištěno, že závislost stínící účinnosti na frekvenci tkaných vzorků lze aproximovat pomocí zobecněné logaritmické funkce převzaté z literatury. Tato funkce byla následně

využita pro predikci stínící účinnosti mimo měřené frekvenční rozmezí. Z prostudovaných frekvenčních závislostí stínící účinnosti je zřejmé, že efektivita stínění je funkcí rostoucí a vzrůstá s rostoucím obsahem vodivé složky ve vzorku, přičemž vzorek s nejvyšším obsahem nerezového ocelového vlákna (75 %) dosahuje nejvyšší stínící účinnosti v celém frekvenčním pásmu (více jak 50 dB pro frekvenci vyšší jak 1.5 GHz), viz obr. 6.4(a). Byl potvrzen předpoklad, že nejvyšší stínící účinnosti dosahují vzorky skupiny 1, tedy vzorky, které jsou tvořeny 100 % hybridní příze. Již při použití 3 % vodivé komponenty ve vzorku dosahuje textile stínící účinnosti nad 20 dB pro frekvenci 1.5 GHz a vyšší, což překračuje požadavky na textile odolné vůči elektromagnetickému záření pro obecné použití.



Obrázek 6.4: Frekvenční závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků (a) skupiny č. 1, (b) vícevrstevných, (c) skupiny č. 2, (d) skupiny č. 3, (e) skupiny č. 4, (f) skupiny č. 5.



Obrázek 6.5: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti vzorků na obsahu vodivé komponenty pro (a) veškeré vzorky skupiny č. 1, (b) vzorky skupiny č. 1 s obsahem vodivé komponenty nad perkolačním prahem P_0 .

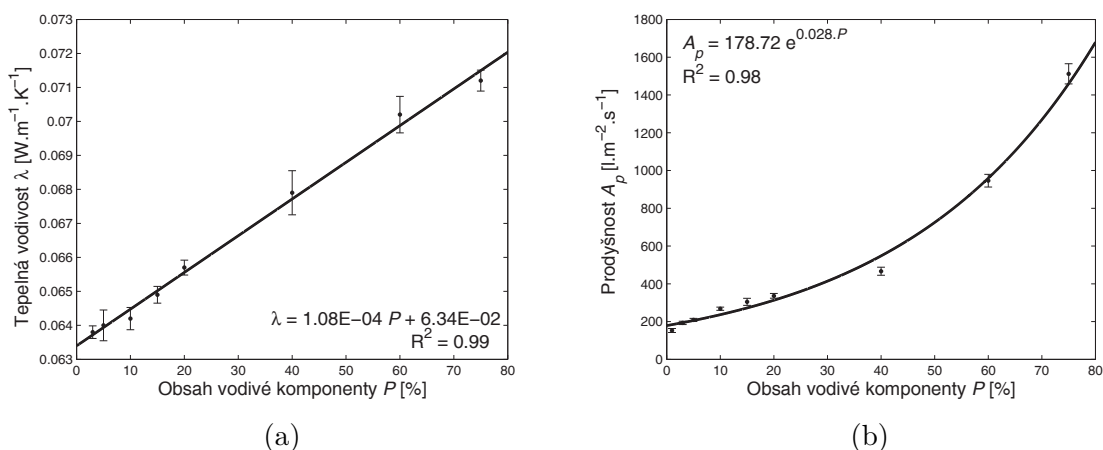
Uspokojivé stínící účinnosti bylo dosaženo použitím pouze tzv. vodivé mřížky v textilií, což výrazně snižuje výrobní náklady výrobku. Při vytvoření vodivé mřížky hybridní přízi s obsahem vodivé komponenty 15 % v nevodivé matrici dosahuje tkanina stínící účinnosti překračující 12 dB pro frekvence rovné a vyšší než 1.5 GHz (obr. 6.4(c)).

Výrazně nižší bariérní schopnost vůči elektromagnetickému záření byla pozorována u pletených vzorků v porovnání se vzorky tkanými. Pro dosažení stínící účinnosti kolem 10 dB pro frekvenční pásmo 1 - 1.5 GHz je nutno použít pleteninu obsahující min. 15 % vodivé komponenty (obr. 6.4(e)). Tento jev je v souladu s porovnání elektrických vlastností vyvinutých tkanin a pletenin a je zapříčiněn použitím jemnější příze a nižší plošné hmotnosti pleteného vzorku v porovnání s tkaným. Modifikací struktury pleteniny, tedy vazby, lze dosáhnout vyšší stínící účinnosti textilního materiálu (obr. 6.4(d)).

Jak bylo zmíněno výše, obsah vodivé komponenty ve vzorku má výrazný vliv na výslednou stínící schopnost textilní struktury. Již při zvýšení obsahu vodivé komponenty na 1 % dosahuje tkanina (skupina vzorků 1) SE 17 dB při frekvenci 1.5 GHz. Závislost SE na obsahu vodivé komponenty je možno aproximovat mocninnou funkcí (obr. 6.5(a)). Perkolační práh se pohybuje v oblasti 3 - 5 %, což je v souladu s hodnocením elektrické vodivosti. Bylo zjištěno, že závislost stínící účinnosti na koncentraci kovového vlákna (P) v oblasti nad perkolačním prahem lze aproximovat lineární funkcí, (obr. 6.5(b)). Totožné chování (lineární závislost SE na P v oblasti nad perkolačním prahem) bylo pozorováno u vzorků skupiny 3, tedy vzorků obsahujících různě vodivou mřížku ve své struktuře.

Získané regresní modely je možno využít pro predikci a následnou optimalizaci obsahu vodivé komponenty za účelem získání výrobku s dostatečnou stínící účinností. Optimalizace obsahu vodivé složky v přízi/ plošné textilií je nutná nejen kvůli finanční nákladnosti použitého materiálu, ale také s ohledem na opotřebení strojního zařízení při zpracování materiálu obsahující příměs kovového vlákna.

Žádoucí výše elektromagnetické stínící účinnosti je odvislá zejména od účelu použití výrobku. Rozlišovat je nutno výrobky pro profesionální využití, kde se předpokládá vyšší výkonová hustota zdroje elektromagnetického záření a delší čas expozice. Na výrobky pro tento typ využití jsou kladeny vyšší nároky, průměrná ochrana předpokládá stínící účinnost výrobku 30 - 40 dB [53] (odpovídající útlumu elektromagnetické vlny o 99.9 - 99.99



Obrázek 6.6: Závislost (a) tepelné vodivosti λ , (b) prodyšnosti A_p na obsahu nerezového ocelového vlákna ve vzorku.

%). Požadovaná stínící účinnost na oděvy pro obecné použití (oděvy pro každodenní nošení) splňující průměrný stupeň ochrany se pohybuje v oblasti 7 až 10 dB [53, 71] (tj. útlum elektromagnetické vlny o 80 - 90 %).

Bylo zjištěno, že zvýšením počtu vrstev dochází ke zvýšení stínící účinnosti tzv. sendviče, a to lineárně. Stejný efekt má snížení rozteče hybridních přízí tvořících tzv. vodivou mřížku v nevodivé matrici, tzn. snížením rozteče vodivé příze v osnově a útku dochází k vyšší koncentraci vodivé komponenty objemu i ploše textilie, což způsobuje vzrůst stínící schopnosti vzorku.

Vliv údržby na schopnost vzorků odstínit elektromagnetické pole

Z provedených experimentů lze shrnout, že praní má vliv jak na elektrickou vodivost, tak na stínící efektivitu vzorků, což bylo potvrzeno jak pro vzorky pletené, tak tkané. U vzorků tkaných obsahujících 15 % vodivé komponenty došlo k poklesu stínící účinnosti po aplikaci 20 pracích cyklů o cca 3 dB oproti referenčnímu vzorku, který dosahoval průměrné SE 30 dB pro frekvenční pásmo 600 MHz - 1.5 GHz. U pletenin (studován vzorek obsahující 15 % kovového vlákna) byl pozorován velmi nízký vliv praní na výslednou stínící schopnost. Pro některé frekvence dokonce nebyl prokázán. Žmolkovitost po praní se projevila zejména u pletených vzorků, u tkaných vzorků nejsou ani po 20 pracích cyklech žmolky patrné.

Vliv vybraných charakteristik souvisejících s komfortem a opotřebením

Z hlediska vybraných charakteristik souvisejících s komfortem nošení a opotřebením lze sumarizovat pro tkané vzorky následující. Tepelná vodivost a tepelná jímavost vzorků vzrůstá se zvyšující se koncentrací vodivého vlákna ve struktuře textilie (viz obr. 6.7(a)), a to díky úzké souvislosti mezi tepelnou a elektrickou vodivostí. Byla pozorována zvyšující se paropropustnost (doprovázená poklesem výparného odporu) a prodyšnost při vzrůstu obsahu vodivé komponenty ve struktuře textilie (viz obr. 6.7(b)), což bylo zapříčiněno nižším zakrytím textilií obsahujících vyšší obsah kovového vlákna. Zvýšením obsahu nerezového ocelového vlákna došlo ke snížení tuhosti, resp. ohybového momentu, čímž byla způsobena vyšší mačkovatost a došlo ke zvýšení splývavosti vzorku. Odolnost v oděru se zvýšením obsahu velmi jemných kovových vláken snižuje, avšak cca do 20 % vodivé komponenty je odolnost v oděru vzorku určeného pro oděvní účely uspokojivá.

Dílčí výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [75, 77, 79, 83, 101, 102, 109, 114].

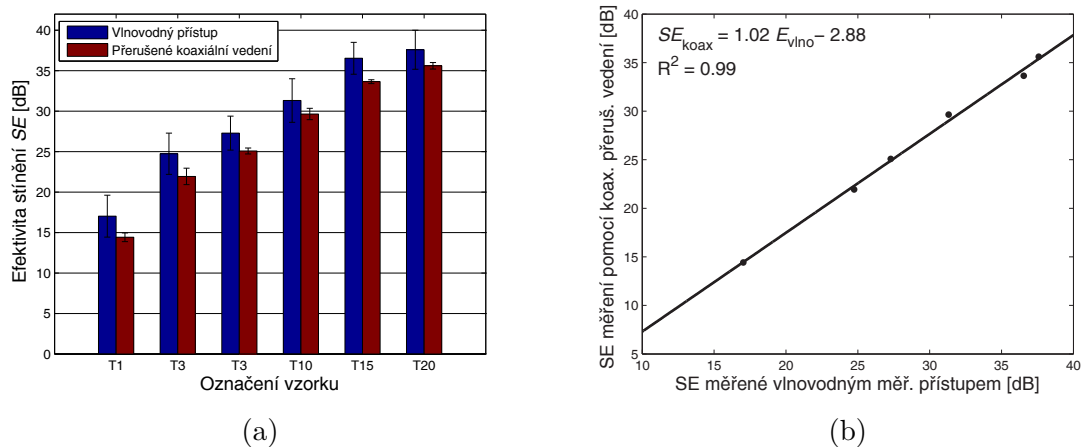
6.3 Experimentální ověření nového zařízení pro měření elektromagnetické stínící účinnosti textilních vzorků

Za účelem možnosti hodnocení stínící účinnosti vzorků omezených rozměrů bez nutnosti časově náročné přípravy vzorků pro měření byla v průběhu řešení disertační práce vyvinuta měřicí metodika nazvaná Metoda stíněného vlnovodu, přičemž se jedná o modifikovanou metodu stíněné schránky. V rámci této části disertační práce byla pomocí komparativní studie ověřena způsobilost tohoto nově vyvinutého zařízení. Experimentálně získané výsledky měření sady šesti textilních vzorků pomocí nově navržené vlnovodné metody byly porovnány s totožným měřením realizovaným pomocí metody přerušného koaxiálního vedení dle ASTM D4935-99 za využití dvouvýběrového t -testu.

Test shody středních hodnot ukázal, že střední hodnoty všech měřených vzorků získané oběma měřicími metodami jsou v dobré shodě na hladině významnosti $\alpha = 0.05$. Předpoklad shody rozptylů byl zamítnut, variabilita dat je vyšší v případě měření navrženým vlnovodným přístupem při porovnání obou metod. Z provedené průzkumové analýzy lze pozorovat, že střední hodnoty získané pomocí vlnovodného měřicího přístupu jsou u všech vzorků vyšší než hodnoty získané s využitím ASTM D4935-99, rozdíl činí cca 3 dB. Tento fakt vhodně ilustruje obr. 6.7(a), na kterém jsou zobrazeny střední hodnoty a 95% intervaly spolehlivosti efektivit stínění měřené pomocí navržené a porovnávací metody a empirický Q-Q graf průměrných hodnot stínící účinnosti (obr. 6.7(b)) pro oba výběry.

Podařilo se prokázat shodu měření nově navrženého vlnovodného měřicího zařízení se zařízením normovaným (v současnosti ve světě nejpoužívanějším), a to na šesti textilních vzorcích s využitím statistické analýzy naměřených dat. Výhody nové metodiky lze spatřit v rychlosti měření, možnosti měření vzorků malých rozměrů, nenáročnou přípravě vzorků a nízkých pořizovacích nákladech na přístrojové vybavení. Jedinou nevýhodou představuje skutečnost, že pro měření velmi úzkého frekvenčního pásma je třeba pro měření využít vlnovodu specifických rozměrů.

Dílní výsledky práce byly publikovány ve sbornících mezinárodních konferencí [96, 97].



Obrázek 6.7: (a) Porovnání středních hodnot účinnosti elektromagnetického stínění měřených oběma metodami (navržená a porovnávací) spolu s 95% intervaly spolehlivosti, (b) empirický graf Q-Q.

6.4 Porovnání různých měřících metod používaných pro hodnocení stínící účinnosti

Účinnost elektromagnetického stínění textilních vzorků byla proměřena různými metodami na odlišných pracovištích za účelem prozkoumání vlivu použité metody. Experimentálně bylo ověřeno, že porovnávat hodnoty efektivity elektromagnetického stínění naměřené pomocí různých přístrojů je nesnadné, dokonce i v případě použití totožných metod, což může být způsobeno použitím odlišných měřících aparatur.

Nejvyšší rozdíly byly pozorovány při porovnávání přístupu koaxiálního a stíněného prostoru spolu s měřením realizovaným bezodrazovou komorou, a to zejména kvůli rozdílnému šíření generované elektromagnetické vlny.

Bylo zjištěno, že v případě využití přerušného koaxiálního vedení nemá vliv orientace vzorku ve vedení na výslednou velikost stínící účinnosti, a to ani u pletenin s nesymetrickou strukturou.

Pro měření odolnosti textilních vzorků vůči elektromagnetickému smogu se zdá být jako nejvhodnější použití normované metodiky využívající přerušné koaxiální vedení s využitím komerčně vyráběné měřící hlavice. Aplikace metody stíněného prostoru, resp. bezodrazové komory se neosvědčila zejména kvůli problémům s nutností použití odlišných typů antén pro různá frekvenční pásma, různou geometrií komor a zkušebních oken a komplikacím, které způsobuje vliv orientace vzorku ve zkušebním okně u materiálů nesymetrické struktury.

Z nabytých zkušeností a prostudovaných diskusí autorů článků publikovaných v literatuře vyplývá, že v současném stavu vědeckého vývoje neexistuje jednotná měřící metoda, která by definovala hodnocení parametru stínící účinnosti plošných materiálů, resp. textilií. Výsledky stínící účinnosti získané použitím v současné době známých metod závisí nejen na vlastnostech stínícího materiálu, ale také na rozměrech testovaného vzorku, geometrii testovacího přípravku či parametrech zdroje elektromagnetického záření. Je zřejmé, že není vždy snadné brát v úvahu veškeré uvedené doplňkové faktory. V současnosti není k dispozici jednotná metoda, která by umožňovala porovnávání výsledků efektivity elektromagnetického stínění získaných na základě principiálně odlišných metod (např. porovnání EN 61000-5-7 s ASTM D4935). Je také možno pozorovat poptávku po obecně platných normách ošetřujících hodnocení odolnosti vůči elektromagnetickému záření plošných materiálů nekovového charakteru.

Z uvedeného vyplývá, že pro zkoumání parametrů nově vyvinutých, či modifikovaných materiálů textilního charakteru pro stínící účely, popř. komparativní studie s dalšími materiály by měla být vždy použita stejná měřící metoda, vč. totožné geometrie. Dále je možno uvést, že pro prezentaci výzkumných úspěchů na poli materiálů se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu je vždy nutno specifikovat použitou měřící metodu vč. geometrie a detailů jednotlivých součástí měřící soustavy. Pouze tak je možno předejít případným nedorozuměním při porovnávání výsledků (rozdíl materiálů, vliv úpravy atd.).

Dílní výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [78, 98, 100].

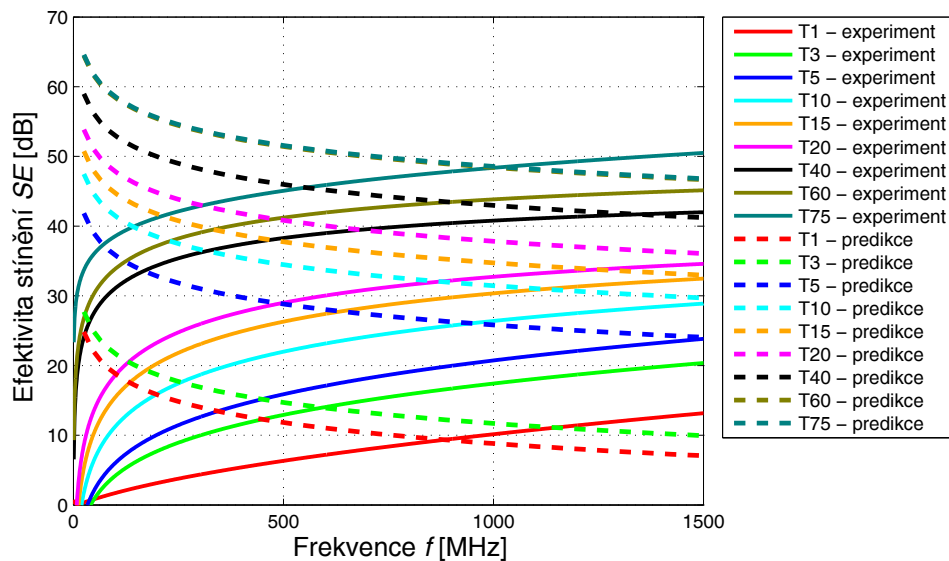
6.5 Možnosti predikce elektromagnetického stínění

V rámci této části práce byl zkoumán vztah mezi elektrickými vlastnostmi a efektivitou elektromagnetického stínění s cílem predikovat velikost účinnosti elektromagnetického stínění na základě znalosti elektrické vodivosti materiálu, a to proto, že přímé měření účinnosti elektromagnetického stínění vyžaduje využití speciálních zařízení a dle dosavadních zkušeností jsou výsledky výrazně ovlivněny použitou měřicí metodou.

Byl prozkoumán vztah mezi povrchovou, resp. objemovou rezistivitou vzorků charakterizující elektrickou vodivost materiálu a měřenou účinností elektromagnetického stínění. Rozsáhlými experimenty byla potvrzena vysoká korelace mezi objemovou rezistivitou a účinností elektromagnetického stínění vzorků tkaných obsahujících koncentraci nerezového ocelového vlákna nad perkolačním prahem. Využitím navržených vztahů je možno predikovat účinnost elektromagnetického stínění na základě znalosti elektrické vodivosti materiálu.

Byla ověřena také využitelnost již publikovaných numerických vztahů určených původně pro predikci stínící účinnosti pevných kompozitních materiálů [35–37, 44, 54–61]. Byla zjištěna dobrá shoda naměřených hodnot s daty vypočtenými pomocí vybraných modelů a potvrzen předpoklad, že výpočet na základě znalosti elektrických vlastností je vhodné použít při vyšších frekvencích, kdy převládá elektrická složka elektromagnetického pole, viz obr. 6.8. Dále bylo zjištěno, že predikční vztah je omezen pro textilní struktury vykazující dostatečně vysokou vodivost (obsah vodivé komponenty nad perkolačním prahem). Rozdíly mezi predikcí a experimentálně zjištěnou výší elektromagnetické stínící účinnosti vzorků jsou zřejmě způsobeny tím, že numerický model je určený pro materiály s kompaktní strukturou. Tento předpoklad však není u textilních struktur splněn.

Dílní výsledky práce byly publikovány v odborných časopisech a ve sbornících mezinárodních konferencích [79, 84, 113].



Obrázek 6.8: Frekvenční závislost efektivity stínění elektromagnetického pole skupiny vzorků č. 1 - porovnání predikovaných hodnot s hodnotami experimentálně zjištěnými.

6.6 Prototypy oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu

V této podkapitole disertační práce je popsána tvorba a testování prototypů oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu. Cílem bylo vytvořit oděvy (první oděvní vrstva) pro každodenní nošení či sport při zachování uspokojivého komfortu nošení, přičemž požadavek na stínící efektivitu se pro oděvy pro obecné použití při předpokladu nižší výkonové hustoty zdroje elektromagnetického záření pohybuje v oblasti 6 - 9 dB.

Na základě rozsáhlé charakterizace již vytvořených vzorků textilií odolných vůči elektromagnetickému smogu (pletené a tkané vzorky s různým obsahem a umístěním vodivé komponenty) bylo vytipováno optimální materiálové složení, vhodná struktura textilie a vyhovující stříhové řešení pro tvorbu konkrétního konečného produktu. S ohledem na mechanické vlastnosti (ohybová tuhost, pružnost) byly z hlediska struktury zvoleny pro tvorbu oděvního výrobku pleteniny (jemnost příze 25 tex). Z hlediska optimálního materiálového složení byl zvolen typ příze obsahující 3 a 10 % nerezového ocelového vlákna Bekinox ve směsi s vláknem nevodivým. Jako doplňkové nevodivé bylo zvoleno vlákno kruhové polypropylenové a za účelem zvýšení komfortu nošení bylo použito také funkční polyesterové vlákno obchodního označení Coolmax. Z hlediska konstrukčního řešení byly vytvořeny tři typy trik - jednoduché, s vyšší ochranou hrudní části (zdvojení pleteniny) a s velmi vysokou ochranou srdce (mezi zdvojenou pleteninou je vložena tkanina obsahující 1 % vodivé komponenty). Veškeré části vytvořených oděvů byly hodnoceny z hlediska odolnosti vůči elektromagnetickému smogu. Dále byly oděvy hodnoceny dle subjektivního komfortu nošení.

Bylo zjištěno, že prototyp oděvu obsahující 10 % nerezového ocelového vlákna dosahuje efektivity stínění elektromagnetického pole (SE) cca 9 dB při frekvenci 1.5 GHz, zatímco prototyp oděvu s koncentrací vodivé komponenty pouze 3 % dosahuje SE cca 1 dB. Zdvojením materiálu obsahujícího 1 % nerezového ocelového vlákna a 99 % vlákna Coolmax v hrudní části (vrstvy pleteniny jsou proti sobě pootočený o 90°) bylo docíleno zvýšení stínící účinnosti při $f = 1.5$ GHz na cca dvojnásobek. Nejvyšší stínící účinnosti bylo dosaženo u výrobku, kde byla navíc mezi dvě vrstvy pleteniny umístěna tkanina se zvýšenou vodivostí. V tomto místě bylo dosaženo stínící účinnosti kolem 19 dB pro $f = 1.5$ GHz.

Vytvořené prototypy oděvů odolných vůči elektromagnetickému smogu byly testovány z hlediska subjektivního pocitu při nošení. Cílem šetření bylo zjistit, jak se probandí cítí v předložených trikách obsahujících jak různý obsah kovového vlákna, tak různý typ nevodivé komponenty. Z provedeného šetření lze shrnout, že celkově nejlépe dopadl vzorek obsahující nižší podíl kovového vlákna ve směsi s funkčním vláknem Coolmax, avšak mezi hodnoceními obou studovaných oděvů nebylo možno pozorovat statisticky významné rozdíly. Pro zvýšení ochrany proti elektromagnetickému smogu a přitom při zachování komfortu nošení je možno využít prototypy oděvů, které mají v určitých místech zvýšenou účinnost bránit průniku elektromagnetického záření. V místech, kde je textilie zdvojena (oblast hrudníku) je sice snížena jak prodyšnost, tak propustnost pro vodní páry, ale vzhledem k tomu, že je snížena propustnost pouze místní, výrazně neovlivňuje celkovou úroveň komfortu oděvu.

7 Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Cílem disertační práce bylo vytvořit plošné textilie a následně z těchto textilií oděvy vyznačující se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému záření při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním, popř. oděvním průmyslu. Záměrem bylo odstínit elektromagnetického pole ve frekvenční oblasti zhruba od 700 MHz do 2.5 GHz. Toto frekvenční pásmo zahrnuje jak komunikační systémy včetně navigačních jednotek GPS a mobilních telefonů (GSM 900, GSM 1800), tak např. frekvenci radiolokátorů, či mikrovlnných trub (2.45 GHz). Obsahem práce bylo prostudování vybraných textilních struktur „vlákno-příze-textilie“ z hlediska především elektrického chování a odolnosti vůči elektromagnetickému smogu.

V průběhu řešení práce se podařilo zkonstruovat přípravek a vytvořit původní metodiku pro hodnocení elektrického odporu délkových textilních útvarů v závislosti na upínací délce. Zařízení včetně metodiky měření elektrického odporu lineárních textilních útvarů s eliminací kontaktního odporu je (od 27.5.2013) chráněno užitným vzorem. V oblasti elektrických vlastností délkových textilních útvarů byly studovány jak příze klasické (téměř nevodivé), tak příze antistatické používané v textilním průmyslu za účelem eliminace problémů způsobovaných statickou elektřinou a vodivý drát, a to s cílem porovnat výši elektrické vodivosti těchto odlišných materiálů. Z hlediska zjištěné relativně nízké vodivosti byly příze nevodivé a antistatické označeny jako nevhodné pro budoucí konstrukci bariérových textilií chránících proti elektromagnetickému smogu. Kovový drát sice vykazoval velmi uspokojivou vodivost, avšak díky vysokému průměru a s tím spojeným nepříznivým mechanickým vlastnostem (zejména vysoké ohybové tuhosti) byl pro další textilní zpracování nevhodný. Použití kovových vláken konečné délky vyznačujících se velmi nízkým průměrem ($d < 10 \mu\text{m}$) bylo shledáno jako perspektivní, a to s ohledem na vysokou elektrickou vodivost a díky nízkému průměru uspokojivé mechanické vlastnosti.

Na základě předchozího průzkumu dostupných vláken vhodných pro textilní využití byly navrženy a vytvořeny příze obsahující ve své struktuře velmi jemná nerezová ocelová vlákna v různé koncentraci. Nerezová ocel byla zvolena vzhledem ke své dostatečně vysoké elektrické vodivosti, uspokojivé životnosti, flexibilitě a především kvůli odolnosti vůči korozi v prostředí běžného typu. Odolnost vůči korozi představuje důležitý požadavek na použitý materiál zejména z důvodu plánované údržby konečných produktů praním. Tyto hybridní příze byly studovány hlavně z hlediska jejich elektrických vlastností. Rozsáhlé experimenty prokázaly silně nelineární závislost elektrického odporu na upínací délce přízí obsahujících ve své struktuře velmi jemná staplová kovová vlákna. Za účelem možnosti výpočtu součinitele specifické rezistivity byl představen jednoduchý mechanistický model. Součinitel specifické rezistivity je možno použít pro hodnocení přízí s odlišným obsahem vodivé komponenty a průzkum perkolačního prahu. To umožňuje optimalizaci množství poměrně finančně nákladných kovových vláken pro získání dostatečně vodivé příze. Podařilo se docílit zvýšení elektrické vodivosti přízí při zachování ostatních vlastností kladených

na příze používané v textilním průmyslu. Na základě provedených šetření jak elektrických, tak vybraných mechanických vlastností byly hybridní příze shledány jako vhodné pro další zpracování klasickými textilními technikami s cílem vytvořit plošné textilie s dostatečnou elektrickou vodivostí a předpokládanou odolností vůči elektromagnetickému smogu.

Pomocí připravených hybridních přízí byla v rámci řešení disertační práce navržena a vytvořena rozsáhlá sada textilií (tkanin, pletenin) s různým podílem a různým umístěním vodivé komponenty. Uskutečněno bylo hodnocení textilií jak z hlediska elektrické vodivosti, tak z hlediska účinnosti elektromagnetického stínění. Studován byl vliv vodivé komponenty na obě charakteristiky, vliv počtu vrstev, vliv velikosti rozteče hybridní příze v osnově a útku, vliv struktury a studovány byly také perkolační prahy vodivé komponenty. Podařilo se nalézt struktury, které vykazují určitý stupeň ochrany před účinky elektromagnetického pole (stínící účinnost od 1 až do 50 dB při frekvenci 1.5 GHz [53, 71]) při zachování základních vlastností kladených na textilie používané v textilním průmyslu, popř. v oděvnictví. V tabulce 7.1 je znázorněno porovnání stínící účinnosti hybridních textilií vyvinutých v práci (označeny tučně) s materiály běžně používanými v textilním průmyslu (jako zástupce zvolena 100 % bavlněná tkanina) a materiály používanými k odstínění elektromagnetického pole (substrát upravený vodivým polymerem, uhlíková a pokovená tkanina, hliníková folie). Tyto materiály vykazují uspokojivě vysokou stínící účinnost, nejsou však vhodné pro oděvní účely. Textilie upravené vodivým polymerem není možno prát (praním ztrácí stínící schopnost), uhlíkové tkaniny dosahují příliš vysoké ohybové a smykové tuhosti, pokovené tkaniny a kovové folie není vhodné pro oděvní účely použít díky nepříznivým termofyziologickým vlastnostem.

Bylo prokázáno, že elektromagnetická stínící schopnost vyvinutých vzorků hybridních textilií se aplikací pracích cyklů výrazně nemění a jako nevodivou komponentu (matrici) je možno použít téměř jakékoliv vlákno zpracovatelné textilními technikami - od klasických až po vysoce funkční vlákna. Byly představeny predikční vztahy, pomocí kterých lze optimalizovat množství vodivé komponenty ve vzorku pro splnění požadavku na výši elektromagnetické stínící účinnosti a konkrétního účelu použití výrobku.

Bylo představeno nové, v průběhu řešení práce vyvinuté a otestované zařízení určené pro hodnocení stínící účinnosti plošných materiálů. Výsledky získané komparativní studií porovnávající naměřená data stínící účinnosti sady vzorků nově navrženou metodikou s normovanou metodikou ukazují, že navržený měřicí přístup na bázi vlnovodu překonává nedostatky stávajících zařízení pro měření elektromagnetické stínící účinnosti textilních vzorků a je vhodný pro rychlé hodnocení elektromagnetické odolnosti zejména nově připravených vzorků omezených rozměrů získaných laboratorními technikami.

Experimentálně bylo ověřeno, že porovnávat hodnoty efektivity elektromagnetického stínění naměřené pomocí odlišných přístrojů a metodických přístupů je nesnadné. Nejvyšší rozdíly byly pozorovány při porovnání přístupů založených na fyzikálně odlišném principu šíření elektromagnetické vlny. Pro měření odolnosti textilních vzorků vůči elektromagnetickému smogu se zdá být jako nejvhodnější použití normované metodiky využívající přerušené koaxiální vedení s použitím komerčně vyráběné měřicí hlavičky.

Na základě prozkoumání vztahu mezi elektrickými vlastnostmi, které jsou snadno měřitelné a efektivitou elektromagnetického stínění se podařilo nalézt korelaci mezi elektrickou rezistivitou a účinností elektromagnetického stínění. Byly prozkoumány a využity vztahy publikované v odborných časopisech umožňující výpočet efektivity stínění elektromagne-

Tabulka 7.1: Stínící účinnost vodivých plošných materiálů měřená dle ASTM 4935 při frekvenci 1.5 GHz (materiály vyvinuté v rámci disertační práce jsou zvýrazněny tučným písmem).

Materiál	SE [dB]
100 % bavlněná tkanina	0
Hybridní pletenina složení 80 % PP/20 % SS	10
PP tkanina obsahující mřížku 5x5 mm složení 80 % PP/20 % SS	14
PES tkanina povrstvená vodivým polymerem (PPY)	20
Hybridní textilie 25 % PP /75 % SS	50
100 % uhlíková tkanina (190 g.m ⁻²)	57
Tkanina pokovená mědí	67
100 % hliníková folie (30 g.m ⁻²)	80

tického pole kompozitních materiálů. Oba uvedené typy modelů jsou snadno využitelné pro predikci stínící účinnosti plošných textilních struktur. Osvědčila se implementace teoretických vztahů pro výpočet stínící účinnosti na základě znalosti objemové rezistivity.

Na závěr práce bylo využito nabytých poznatků získaných v průběhu řešení práce a vytvořena sada konečných oděvních produktů odolných vůči elektromagnetickému smogu. Experimentálně bylo ověřeno, že oděvy vykazují určitý stupeň odolnosti vůči elektromagnetickému smogu (10 - 18 dB pro frekvenci 1.5 GHz), který lze řídit množstvím vodivé komponenty, strukturou textilu a konstrukčním řešením oděvu pro získání výrobku pro konkrétní účel použití. Bylo potvrzeno, že se komfortní vlastnosti vyvinutých oděvů výrazně neliší od klasických materiálů a struktur používaných v oděvním průmyslu.

Je zřejmé, že vyvinuté a v práci charakterizované textilní struktury a následně oděvy byly vytvářeny s cílem získání určité bariérní schopnosti materiálu vůči elektromagnetickému záření. Základním požadavkem pro splnění tohoto cíle je relativně vysoká elektrická vodivost materiálu v porovnání s požadavkem např. pro materiály používané jako antistatické. Vyvinuté materiály tedy mohou být použity nejen za účelem odstínění elektromagnetického pole, ale také pro tvorbu oděvů antistatických, oděvů určených do čistých prostor, či v dalších textilních odvětvích (inteligentní textilie), kde je vyžadován určitý stupeň elektrické vodivosti.

Jako doporučení pro budoucí práci lze uvést vhodnost průzkumu dalších parametrů, u kterých se předpokládá, že budou mít významný vliv elektromagnetické stínění vyvinutých hybridních textilních struktur jako je např. jemnost příze, dostava tkanin či hustota řádků a sloupků pletenin, dále vliv vazby a další. Tvorba numerických vztahů vhodných pro výpočet stínící účinnosti textilií zohledňujících nejen elektrickou vodivost, ale také geometrické charakteristiky textilních struktur se zdá být také doposud ne zcela prozkoumaná. V neposlední řadě je možno výzkum v oblasti tvorby bariérních elektromagneticky stínících textilií vhodných pro oděvní účely směřovat také do dalších principiálně odlišných přístupů výroby jako je např. využití vodivých polymerů, pokovování a dalších.

8 Použitá literatura

- [1] KNITTEL, D. and SCHOLLMAYER, E. Electrically High-Conductive Textiles. *Synthetic Metals*, **159**(14), 2009, pp. 1433–1437.
- [2] XUE, P. et al. Electrically Conductive Yarns Based on PVA/Carbon Nanotubes. *Composite Structures*, **78**(2), 2007, pp. 217–277.
- [3] TZENG, S. S. and CHANG, F. EMI Shielding Effectiveness of Metal-Coated Carbon Fiber-Reinforced ABS Composites. *Material Science and Engineering: A*, **302**(2), 2001, pp. 258–267.
- [4] JANA, P., MALLICK, A., and DE, S. Electromagnetic Interference Shielding by Carbon Fibre-Filled Polychloroprene Rubber Composite. *Composites*, **22**(6), 1991, pp. 451–455.
- [5] SHYR, T. and SHIE, J. Electromagnetic Shielding Mechanism Using Soft Magnetic Stainless Steel Fiber Enabled Polyeter Textiles. *Journal of Magnetic Materials*, **324**(23), 2012, pp. 4127–4132.
- [6] CHUNG, D. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials. *Carbon*, **39**(2), 2001, pp. 279–285.
- [7] JALALI, M. et al. Electromagnetic Shielding of Polymer-Matrix Composites with Metallic Nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, **42**(6), 2011, pp. 1420–1426.
- [8] DENG, H. et al. Effect of Thermal Annealing on the Electrical Conductivity of High-Strength Bicomponent Polymer Tapes Containing Carbon Nanoparticles. *Synthetic Metals*, **160**(5-6), 2010, pp. 337–344.
- [9] YILDIZ, Z., USTA, I., and GUNGOR, A. Electrical Properties and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Polyester Yarns with Polypyrrole Deposition. *Textile Research Journal*, **82**(20), 2012, pp. 2137–2148.
- [10] RAMACHANDRAN, T. and VIGNESWARAN, C. Design and Development of Copper Core Conductive Fabrics for Smart Textiles. *Journal of Industrial Textiles*, **39**(1), 2009, pp. 81–93.
- [11] MOLINA, J. et al. Stability of Conducting Polyester/Polypyrrole Fabrics in Different pH Solutions. *Polymer Degradation Stability*, **95**(1), 2010, pp. 2574–2583.
- [12] ROH, J. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multifunctional Metal Composite Fabrics. *Textile Research Journal*, **78**(9), 2008, pp. 825–835.
- [13] COTTET, D. et al. Electrical Characterization of Textile Transmission Lines. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, **26**(2), 2003, pp. 182–190.
- [14] CLINGERMAN, M. et al. Evaluation of Electrical Conductivity Models for Conductive Polymer Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **83**(6), 2002, pp. 1341–1356.

- [15] KIRKPATRICK, S. Percolation and Conduction. *Reviews of Modern Physics*, **45**(4), 1973, pp. 574–588.
- [16] BUCHE, F. Electrical Resistivity of Conducting Particles in an Insulating Matrix. *J. Appl. Phys.* **43**(11), 1972, pp. 4837–4838.
- [17] MAMUNYA, E., DAVIDENKO, V., and LEBEDEV, E. Percolation Conductivity of Polymer Composites Filled With Dispersed Conductive Filler. *Polymer Composites*, **16**(4), 1995, pp. 319–324.
- [18] MAMUNYA, E., DAVIDENKO, V., and LEBEDEV, E. Effect of Polymer-Filler Interface Interactions on Percolation Conductivity of Thermoplastics Filled with Carbon Black. *Composite Interfaces*, **4**(4), 1997, pp. 169–176.
- [19] MALLIARIS, A. and TURNER, D. Influence of Particle Size on the Electrical Resistivity of Compacted Mixtures of Polymeric and Metallic Powders. *J. Appl. Phys.* **42**(2), 1971, pp. 416–421.
- [20] NIELSEN, L. Thermal Conductivity of Particulate-Filled Polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, **17**(12), 1973, pp. 3819–3820.
- [21] ROH, H., CHILD, A., and KIMBRELL, W. Toward Real Applications of Conductive Polymers. *Synth. Met.* **71**(1), 1995, pp. 2139–2142.
- [22] ANGELOPOULOS, M. Conducting Polymers in Microelectronics. *IBM J. Res. Dev.* **45**(1), 2001, pp. 57–75.
- [23] YILDIZ, Z., USTA, I., and GUNGOR, A. Investigation of the Electrical Properties and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Polypyrrole Coated Cotton Yarns. *FIBERS&TEXTILES in Eastern Europe*, **21**(2), 2013, pp. 32–37.
- [24] ENGIN, F. and USTA, I. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Polyester Fabric with Polyaniline Deposition. *Textile Research Journal*, **0**(0), 2014, pp. 1–10.
- [25] THOMASSIN, J. et al. Polymer/carbon Based Composites as Electromagnetic Interference Shielding Materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **74**(7), 2013, pp. 211–232.
- [26] BONALDI, R., SIORES, E., and SHAH, T. Characterization of Electromagnetic Shielding Fabrics Obtained from Carbon Nanotube Composite Coatings. *Synthetic Metals*, **187**(1), 2014, pp. 1–8.
- [27] OZEK, H., AGIRGAN, O., and KELES, M. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Woven Fabrics with Silver Coated Nylon Yarns. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [28] DURAN, D. and KADOGLU, H. Shielding Characteristics of Conductive Woven Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [29] ORTLEK, H., ALPYILDIZ, T., and KILIC, G. Determination of Electromagnetic Shielding Performance of Hybrid Yarn Knitted Fabric with Anechoic Chamber Method. *Textile Research Journal*, **83**(1), 2013, pp. 90–99.
- [30] PALAMUCTU, S. et al. Electrically Conductive Textile Surfaces and their Electromagnetic Shielding Efficiency Measurement. *TEKSTIL ve KONFEKSIYON*, **3**(1), 2010, pp. 199–207.

- [31] CHENG, K. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of the Twill Copper Woven Fabrics. *J. Reinf. Plast.* **25**(7), 2006, pp. 699–709.
- [32] CHENG, K. et al. Electrical and Impact Properties of The Hybrid Knitted Inlaid Fabric Reinforced Polypropylene Composites. *Composites Part A*, **33**(1), 2002, pp. 1219–1226.
- [33] CHEN, H., LEE, K., and LIN, J. Electromagnetic and Electrostatic Shielding Properties of Co-weaving-knitting Fabric Reinforced Composites. *Composites Part A*, **35**(1), 2004, pp. 1249–1256.
- [34] HEMMING, L. *Architectural Electromagnetic Shielding: A Design and Specification Guide*. Wiley-IEEE Press, 2000.
- [35] PERUMALRAJ, R. et al. Electromagnetic Shielding Effectiveness of Copper Core-Woven Fabrics. *Journal of the Textile Institute*, **100**(6), 2009, pp. 512–524.
- [36] SIMON, R. EMI Shielding Through Conductive Plastics. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, **17**(1), 1981, pp. 1–10.
- [37] WHITE, D. *A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility*. Don White Consultants, 1971.
- [38] COLANERI, N. and SHACKLETTE, L. EMI Shielding Measurements of Conductive Polymer Blends. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **41**(1), 1992, pp. 291–297.
- [39] HAŇKA, L. *Teorie elektromagnetického pole*. SNTL/ALFA, 1982.
- [40] DUQUESNE, S., MAGNIEZ, C., and CAMINO, G. *Multifunctional Barriers for Flexible Structure: Textile, Leather and Paper*. Springer, 2010.
- [41] PEKÁREK, L. *Neionizující elektromagnetická pole a záření*. [online]. cit. 1. 3. 2014. URL: <http://www.sysifos.cz/index.php?id=vypis&sec=1154526554>.
- [42] HAYT, W. *Engineering electromagnetics*. McGraw-Hill, 1967.
- [43] KAISER, K. *Electromagnetic Shielding*. CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [44] OTT, H. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley, 2009.
- [45] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility*. [online]. Ústav radiotechniky, Praha. cit. 18. 6. 2013. URL: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/>.
- [46] NOVÁK, J. *Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (I)*. [online]. Elektroinstalatér 5/2003. cit. 18. 6. 2013. URL: <http://www.tzb-info.cz/1801-elektromagnetic-ke-pole-a-zdravotni-rizika-i>.
- [47] KODALI, V. and SOCIETY, I. E. C. *Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, and Technologies*. IEEE Press, 1996.
- [48] KLEINE-OSTMANN, T., MÜNTER, K., and SCHRADER, T. A new shielding effectiveness measurement method based on a skin-effect transmission line coupler. *Advances in Radio Science*, **5**(1), 2007, pp. 37–42.
- [49] GEETHA, S. et al. EMI shielding: Methods and materials—A review. *Journal of Applied Polymer Science*, **112**(4), 2009, pp. 2073–2086.
- [50] WIECKOWSKI, T. and JANUKIEWICZ, J. Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles. *FIBERS&TEXTILES in Eastern Europe*, **14**(5), 2006, pp. 18–22.

- [51] VASQUEZ, H., ESPINOZE, L., and LOZANO, K. Simple Device for electromagnetic interference Shielding Effectiveness Measurement. *IEEE*, 2009, pp. 62–68.
- [52] HONG, Y. et al. Method and Apparatus to Measure Electromagnetic Interference Shielding Efficiency and its Shielding Characteristics in Broadband Frequency Ranges. *Review of Scientific Instruments*, **2**(74), 2003.
- [53] *Specified Requirements of Electromagnetic Shielding Textiles*. [online]. Committee for Conformity Assessment on Accreditation and Certification of Functional and Technical Textiles. cit. 18. 6. 2013. URL: <http://www.ftts.org.tw/images/fa003E.pdf>.
- [54] SHINAGAWA, S., KAMAGAI, Y., and URABE, K. Conductive Papers Containing Metallized Polyester Fibers for Electromagnetic Interference Shielding. *Journal of Porous Materials*, **6**(1), 1999, pp. 185–190.
- [55] EL-SALEH, M. and SUNDARARAJ, U. Electromagnetic Interference Shielding Mechanism of CNT/polymer Composites. *Carbon*, **47**(1), 2009, pp. 1738–1746.
- [56] WANG, X. and LIU, Z. Influence of Fabric Density on Shielding Effectiveness of Electromagnetic Shielding Fabric. *Przegląd Elektrotechniczny*, **88**(1), 2012, pp. 235–238.
- [57] KEITH, J. et al. Shielding Effectiveness Density Theory for Carbon Fiber/Nylon 6,6 Composites. *Polymer Composites*, **26**(1), 2005, pp. 671–678.
- [58] ZHANG, C. et al. Electromagnetic Interference Shielding Effect of Nanocomposites with Carbon Nanotube and Shape Memory Polymer. *Composite Science and Technology*, **67**(14), 2007, pp. 2973–2980.
- [59] LOPEZ, C. “Modeling of Textile Reinforced Composite Barriers Against Electromagnetic Radiation”. MA thesis. Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 2011.
- [60] HENN, A. and CRIBB, R. Modeling the Shielding Effectiveness of Metallized Fabrics. In: *Electromagnetic Compatibility, 1992. Symposium Record., IEEE 1992 International Symposium on.* 1992, pp. 283–286.
- [61] KEISER, B. *Principles of Electromagnetic Compatibility 3rd Edition*. ARTECH HOUSE Incorporated, 1987.
- [62] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Technická univerzita v Liberci, 2002.
- [63] VLČEK, J. *Základy elektrotechniky*. Ing. Jiří Vlček, 2006.
- [64] KOŠKOVÁ, B. *Struktura a vlastnosti vláken*. Vysoká škola strojní a textilní, 1989.
- [65] HARLIN, A. and FERENTS, M. *Intelligent Textiles and Clothing*. Woodhead Publishing, 2006.
- [66] MORTON, W. and HEARLE, J. *Physical Properties of Textile Fibres*. Woodhead Publishing, 2008.
- [67] NECKÁŘ, B. *Morfologie a strukturní mechanika obecných vlákenných útvarů*. Fakulta textilní Technická univerzita v Liberci, 1998.
- [68] MILITKÝ, J. and KŘEMENÁKOVÁ, D. Prediction of Fabric Thermal Conductivity. In: *Proceedings of 5th International Textile, Clothing & Design Conference*. Zagreb, Croatia, 2010.

- [69] NERUDA, M. and VOJTĚCH, L. Surface Conductance of Textile Materials Modeling. In: *Proceedings of Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics - KTTO 2010*. Ostrava, Czech Republic, 2010. ISBN: 978-80-248-2330-0.
- [70] TAO, X. and INSTITUTE, T. T. *Wearable Electronics and Photonics*. Woodhead Publishing Series in Textiles Series, 2005.
- [71] NON-IONIZING RADIATION PROTECTION ICNIRP, I. C. of. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, **74**(4), 1998, pp. 494–522.
- [72] MELOUN, M. and MILITKÝ, J. *Kompendium statistického zpracování dat*. Academia, 2002.
- [73] NECKÁŘ, B. Compression and Packing Density of Fibrous Assemblies. *Textile Research Journal*, **67**(2), 1997, pp. 123–130.
- [74] HORN, P. Some easy t statistics. *J. Amer. Statist. Assoc.* **78**(1), 1983, pp. 930–936.

9 Práce autora se vztahem ke studované problematice

9.1 Publikace v odborných časopisech

- [75] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding Properties of Woven Fabrics Made from High-Performance Fibers. *Textile Research Journal*, January 2014. [Article in press].
- [76] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Mohou textilie reálně pomoci při ochraně proti elektromagnetismu? *Vesmír*, **93**(5), 2014, pp. 308–309. ISSN: 1214-4029.
- [77] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Field Shielding Fabrics with Increased Comfort Properties. *Advanced Material Research*, **677**(1), 2013, pp. 161–168. ISSN: 1022-6680.
- [78] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Comparison of Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles. *Vlákna a textil*, **19**(3), 2012, pp. 50–56. ISSN: 1335-0617.
- [79] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Numerical and Experimental Study of the Shielding Effectiveness of Hybrid Fabrics. *Vlákna a textil*, **19**(1), 2012, pp. 21–27. ISSN: 1335-0617.
- [80] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. A Study of Electrical Conductivity of Hybrid Yarns Containing Metal Fibers. *Journal of Materials Science and Engineering B*, **2**(2), 2012, pp. 197–202. ISSN: 2161-6221.
- [81] ŠAFÁŘOVÁ, V., GRÉGR, J., and MARTÍNEK, M. Preparation of Functional PET Fabric/Polypyrrole Composite. *Sci. Pap. Univ. Pardubice, Ser. A*, **18**(1), 2012, pp. 117–131. ISSN: 1211-5541.
- [82] ŠAFÁŘOVÁ, V. and ZOBEL, S. Využití techniky plánovaného experimentu pro optimalizaci elektrické vodivosti netkaných textilií. *Informační bulletin České statistické společnosti*, **22**(2), 2011, pp. 184–191. ISSN: 1210-8022.
- [83] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding of Hybrid Weaves. *World Journal of Engineering*, **7**(3), 2011, pp. 981–982. ISSN: 1708-5284.
- [84] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Correlation between Electric Resistance and Electromagnetic Shielding of Hybrid Weaves. *IVUZ Technologia Textilnoj Promyšlenosti*, **336**(1), 2011, pp. 121–127. ISSN: 1021-3497.

9.2 Kapitola v odborné knize

- [85] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. “Methods for Evaluating and Predicting the Shielding Effectiveness of Hybrid Textiles”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.

- [86] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Electromagnetic Field Shielding Fabrics with Increased Comfort Properties”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.
- [87] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and MARŠÁLKOVÁ, M. “Modified Shielded Box Method for Testing Shielding Effectiveness of Textile Samples”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.
- [88] ŠAFÁŘOVÁ, V., TUNÁK, M., and MILITKÝ, J. “Prediction of Hybrid Woven Fabrics Shielding Effectiveness”. In: *Selected Properties of Functional Materials*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-28-2.
- [89] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. “Textilní struktury se zvýšenou elektrickou vodivostí”. In: *Vlákněné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [90] ŠAFÁŘOVÁ, V. “Teorie stínění elektromagnetického pole”. In: *Vlákněné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [91] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Textilní struktury odolné vůči elektromagnetickému smogu”. In: *Vlákněné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [92] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Predikce efektivity elektromagnetického stínění”. In: *Vlákněné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [93] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Vliv obsahu kovového vlákna na vybrané charakteristiky textilií souvisejících s komfortem a opotřebením”. In: *Vlákněné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [94] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and HAVELKA, A. “Oděvy odolné vůči elektromagnetickému smogu”. In: *Vlákněné struktury pro speciální aplikace*. OPS, 2013. ISBN: 978-80-87269-32-9.
- [95] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. “Electromagnetic Shielding of Hybrid Fabrics”. In: *Selected Topics of Textile and Material Science*. Publishing House of WBU, 2011. ISBN: 978-8-261-0062-1.

9.3 Příspěvek ve sborníku mezinárodní konference

- [96] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. Technical Textile Shields Against Electromagnetic Radiation: Materials and Methods. In: *Proceedings of The International Textile Congress 2013*. Istanbul, Turkey, 2013.
- [97] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and MARŠÁLKOVÁ, M. Usability of a Modified Shielded Box Method for Testing Shielding Effectiveness of Textile Samples. In: *Proceedings of 18th International Conference Applied Electronics 2013*. Pilsen, Czech Republic, 2013.
- [98] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. Methods for Evaluating and Predicting the Shielding Effectiveness of Hybrid Textiles. In: *AUTEX 2012, Proceedings of 12nd AUTEX World Textile Conference*. Zadar, Croatia, 2012. ISBN: 978-953-7105-47-1.

- [99] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Anomalous Electrical Resistance of Hybrid Yarns Containing Metal Fibers. In: *Proceedings of Fiber Society 2011 Spring Conference*. Hong Kong, 2011.
- [100] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Comparison of Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles. In: *STRUTEX 2011, Proceedings of 18th International Conference on Structure and Structural Mechanics of Textiles*. Liberec, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7372-786-4.
- [101] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Development of a Hybrid Electromagnetic Shielding Fabrics. In: *ICCM 11, Proceedings of 18th International Conference of Composite Materials*. Jeju Island, South Korea, 2011.
- [102] ŠAFÁŘOVÁ, V., MILITKÝ, J., and TRUHLÁŘ, M. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Hybrid Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [103] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding of Hybrid Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [104] MISHRA, R., ŠAFÁŘOVÁ, V., and MILITKÝ, J. EMI Shielding of Fabrics. In: *AUTEX 2011, Proceedings of 11th AUTEX World Textile Conference*. Mulhouse, France, 2011.
- [105] MISHRA, R., ŠAFÁŘOVÁ, V., and MILITKÝ, J. Electromagnetic Shielding of Hybrid Fabrics. In: *Proceedings of International Conference on Composite and Nano Engineering*. Shanghai, China, 2011.
- [106] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Functional PET Fabric/Polypyrrole Composite. In: *STRUTEX 2011, Proceedings of 18th International Conference on Structure and Structural Mechanics of Textiles*. Liberec, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7372-786-4.
- [107] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Hybrid Yarns with Enhanced Electric Conductivity. In: *Proceedings of 5th Aachen-Dresden International Textile Conference*. Aachen, Germany, 2011.
- [108] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Preparation and Characterization of Conducting PET Fabric/Polypyrrole Composite for EMI Shielding. In: *IDMS 2011, Book of Abstract of International Days of Material Science*. Pardubice, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7395-419-2.
- [109] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Technical Shields Against Electromagnetic Radiation - The Present State. In: *KTTO 2011, Proceedings of Workshop of the 11th International Conference Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics*. Ostrava, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-248-2506-9.
- [110] MILITKÝ, J. and ŠAFÁŘOVÁ, V. Prediction of Hybrid Fabrics Electromagnetic Shielding. In: *Proceedings of 3rd International Conference TEXCO' 2010*. Ružomberok, Slovakia, 2010. ISBN: 978-80-969-6107-8.
- [111] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Electrical Conductivity Measurement of Fibers and Yarns. In: *TESCI 2010, Proceedings of 7th International Conference Textile Science 2010*. Liberec, Czech Republic, 2010. ISBN: 978-80-7372-638-6.

- [112] ŠAFÁŘOVÁ, V. and ZOBEL, S. Effect of Various Parameters on Temperature Behavior of Nonwovens during Applying Electric Current. In: *Proceedings of 5th International Textile, Clothing & Design Conference*. Zagreb, Croatia, 2010.
- [113] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Correlation between Electric Resistance and Electromagnetic Shielding of Hybrid Weaves. In: *Proceedings of 4th Aachen-Dresden International Textile Conference*. Dresden, Germany, 2010. ISBN: 978-4-901381-32-1.
- [114] ŠAFÁŘOVÁ, V. and MILITKÝ, J. Characterization of Hybrid Fabrics Electromagnetic Shielding Efficiency. In: *STRUTEX 2010, Proceedings of 17th International Conference on Structure and Structural Mechanics of Textiles*. Liberec, Czech Republic, 2010. ISBN: 978-80-7372-664-5.

9.4 Příspěvek ve sborníku domácí konference

- [115] ŠAFÁŘOVÁ, V. and GRÉGR, J. Bariérové textilie chránící proti elektromagnetickému smogu. In: *Sborník konference Textilie v novém tisíciletí IX*. Liberec, Czech Republic, 2011. ISBN: 978-80-7372-732-9.

9.5 Užiténý vzor

- [116] ŠAFÁŘOVÁ, V., HES, L., and MILITKÝ, J. Zařízení k měření elektrického odporu délkových útvarů, zejména délkových textilních útvarů. Česká republika. Užiténý vzor CZ 25429 U1. 27.5.2013.

Curriculum Vitae

Osobní údaje	
Jméno a příjmení	Veronika Šafářová
Adresa	Oskara Nedbala 1178, Hradec Králové
E-mail	veronika.safarova@tul.cz
Narozena	17.3.1984 v Opočně
Stav	svobodná
Dosažené vzdělání	
Období	2008 - dosud
Název organizace	Technická univerzita v Liberci, FT
Studijní program	Doktorský - Textilní inženýrství
Obor	Textilní technika
Období	2004 - 2009
Název organizace	Technická univerzita v Liberci, FPHP
Studijní program	Bakalářský - DPS
Obor	Pedagogicko-psychologická způsobilost
Období	2003 - 2008
Název organizace	Technická univerzita v Liberci, FT
Studijní program	Magisterský - Textilní inženýrství
Obor	Netkané textilie
Období	1999 - 2003
Název organizace	SPŠT, Velké Poříčí
Studijní program	Maturitní
Obor	Oděvnictví se zaměřením na podnikání
Schopnosti a znalosti	
Mateřský jazyk	čeština
Jazykové znalosti	angličtina: úroveň B2, němčina: úroveň A1
Počítačové znalosti	aktivně: MS Office, MATLAB, Minitab, sázecí programové prostředí LATEX uživatelsky: Windows, grafické programy
Další schopnosti	psaní všemi deseti
Řidičský průkaz	aktivně skupina B
Zaměstnání	2011 - dosud, odborný asistent na FT TUL

Stručná charakteristika dosavadní odborné a vědecké činnosti

Doktorské studium	
Studium	Studium v prezenční formě doktorského studijního programu Textilní inženýrství, v oboru Textilní technika na Fakultě textilní Technické univerzity v Liberci.
Seznam zkoušek	Vybrané partie z řešení diferenciálních rovnic, 22.12.2008. Přenos tepla v porézních strukturách, 3.3.2009. Komfortní a ochranné vlastnosti speciálních oděvů, 6.4.2009. Struktura a vlastnosti textilních vláken, 26.6.2009.
SDZ	Státní doktorská zkouška vykonána dne 5.12.2012 s celkovým hodnocením prospěla .
Pedagog. činnost	
Výuka	předmět Metody stochastického a simulačního modelování, vedení cvičení, 2008 - 2010 předmět Numerická matematika, vedení cvičení, 2008 - 2009. předmět Řízení jakosti, vedení cvičení, 2010 - 2012. předmět Zpracování a analýza obrazu, vedení cvičení, 2012 - 2013. předmět Programování, vedení přednášek a cvičení, 2013 - doposud.
Vedení BP a DP	Kryvenková T., <i>Elektromechanické vlastnosti textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí</i> , DP, 2012. Petříková A., <i>Řešení problematiky odstínění elektromagnetického záření</i> , DP, 2012. Stará L., <i>Využití uhlíkových vláken v textilním průmyslu</i> , DP, 2013. Davidková B., <i>Modelování parametru účinnosti elektromagnetického stínění textilií se zvýšenou vodivostí</i> , DP, 2013. Malachová K., <i>Elektromechanická analýza délkového a kontaktního odporu elektricky vodivých textilních struktur</i> , BP, 2014.

Výzkumné projekty

Studentská grantová soutěž TUL

projekt „Vliv struktury příze a obsahu vodivých vláken na elektrickou vodivost textilií“, řešitelka, 2010.

projekt „Porovnání metod hodnocení elektromagnetického stínění textilními materiály“, řešitelka, 2011.

projekt „Vliv porozity na parametr účinnosti elektromagnetického stínění textilních struktur“, řešitelka, 2012.

TIP MPO

projekt „Textilie se zvýšeným komfortem odolné vůči elektromagnetickému záření“, členka hlavního řešitelského týmu, 2009 - 2013.

Centrum MŠMT

projekt „Centrum pro jakost a spolehlivost výroby“, členka spoluřešitelského týmu (pracoviště Fakulty textilní, TUL), 2010-2011.

Ostatní projekty

ESF projekt

projekt „3P-Praxe pro praxi“, členka hlavního řešitelského týmu, 2011 - 2013.

Zápis o vykonání státní doktorské zkoušky

FAKULTA TEXTILNÍ
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI

ZÁPIS O VYKONÁNÍ STÁTNÍ DOKTORSKÉ ZKOUŠKY (SDZ)

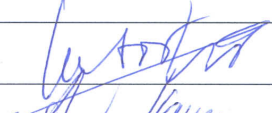
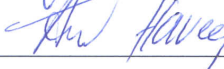


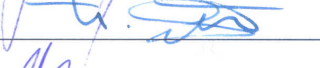


Jméno a příjmení doktoranda: Ing. Veronika Šafářová
Datum narození: 17. 3. 1984
Doktorský studijní program: Textilní inženýrství
Studijní obor: Textilní technika
Termín konání SDZ: 5. 12. 2012

prospěla

~~neprospěla~~

Komise pro SDZ:

Podpis

Předseda:	prof. Ing. Luboš Hes, DrSc., Dr.h.c.	
Místopředseda:	doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.	
Členové:	prof. Ing. Aleš Richter, CSc.	
	prof. Ing. Jaroslav Šesták, DrSc.	
	doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.	
	prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.	
	RNDr. Pavel Kavan, CSc.	

V Liberci dne 5. 12. 2012

O průběhu SDZ je veden protokol



Vyjádření školitele doktoranda

Stanovisko školitele k doktorské disertační práci:

Textilie se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu

Autorky: **Ing. Veroniky Šafářové**

Disertační práce je zaměřena na zevrubné zkoumání možností zvýšení odolnosti oděvních textilií chránících proti elektromagnetickému smogu při vysokých frekvencích. Doktorandka řešila řadu dílčích úloh zaměřených na **měření** (návrh speciální aparatury pro hodnocení účinnosti tlumení elektromagnetického záření, modifikace měření elektrického odporu přízí, porovnání systémů měření útlumu vysokofrekvenčního elektromagnetického záření), **návrh textilií se zvýšenou odolností proti elektromagnetickému smogu** (hodnocení podílu kovového vlákna Bekinox na elektrický odpor hybridních přízí, vliv konstrukce tkanin a pletenin na útlum vysokofrekvenčního elektromagnetického záření, hodnocení změn komfortu, omaku a údržby a změn dalších vlastností textilií v závislosti na obsahu kovových vláken) a **tvorbu mechanistických modelů** (nelineární závislost elektrické vodivosti přízí na délce, vliv konstrukce tkanin na tlumení elektromagnetického záření, atd.).

V každé z těchto oblastí postupovala doktorandka systematicky a kombinovala kvalitní experimentální přístup s pokročilým statistickým zpracováním výsledků a tvorbu mechanistických modelů. To je patrné i z toho, že většinu svých výsledků publikovala v zahraničních specializovaných časopisech většinou s „impact“ faktorem. Publikovala také několik kapitol ve dvou monografiích. Autorčiny stěžejní výsledky byly tedy již vlastně kladně posouzeny mezinárodní odbornou komunitou. To ukazuje na systematickou kvalitní práci doktorandky spojenou s řadou původních a publikovatelných výsledků.

Práce je psána dostatečně výstižně, s vynecháním známých detailů a popisu běžných postupů, ale s dostatečným objasněním zejména vlastních výsledků.

Část současného stavu je psána přehledově a obsahuje všechny potřebné detaily. Obsahuje dostatečný popis zejména původních přístupů a relevantní informace o stavu řešení v této oblasti. V experimentální práci je popsána základní charakterizace materiálů včetně přípravy hybridní příze obsahující přídavky kovového vlákna, hodnocení konstrukčních vlivů na elektromagnetické stínění textilií, charakterizace morfologie, elektrického odporu a řada dalších měření potřebných pro posouzení efektů souvisejících s tvorbou oděvních textilií chránících proti elektromagnetickému smogu. Tady lze ocenit především množství použitých měřicích metod a komplexnost hodnocení.

Jako celek je práce výjimečná jak systematickostí a komplexností tak i kvalitním hodnocením výsledků a zobecňováním.

Výsledky práce jsou velmi zajímavé a budou bezprostředně využitelné pro přípravu oděvních textilií chránících proti elektromagnetickému smogu.

Práce je celkově na vysoké úrovni co do kvality zpracování i vyhodnocení a **doporučuji ji** k obhajobě.

V Liberci 21/05/2014

Školitel: prof. Ing. Jiří Militký, CSc., EUR ING

Oponentské posudky disertační práce



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická
KATEDRA FYZIKY

pošta: Studentská 2, Liberec 46117 | Liberec
telefon: +(420) 485 353 419
URL: <http://www.fp.tul.cz/kfy>

Posudek disertační práce Ing. Veroniky Šafářové

Textilie se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu

Tématem disertační práce je výzkum, vývoj a příprava plošných textilií se zvýšenou odolností proti elektromagnetickému smogu. Práce začíná kvalitní obecnou, teoretickou částí. Logicky pokračuje celou škálou postupně navazujících experimentů. Vše potom vede k praktickým návrhům hybridních tkanin a pletenin s přidanými kovovými vlákny. Získané výsledky jsou originální. Novým a originálním přínosem práce je také návrh, použití, testování a kritické porovnání dvou měřících metod. Všechny dílčí cíle práce byly splněny, navazují logicky na sebe a směřují ke konkrétnímu výstupu. Celá práce je tak velmi kompaktní a směřuje k návrhu oděvního produktu, účinně stínícího proti elektromagnetickému smogu. Na základě této práce byly nakonec ušity oděvy - trika, která byla odzkoušena.

Práce je svojí volbou tématu aktuální. Použití oděvů, zajišťující stínění před elektromagnetickým zářením různých frekvencí, může snížit dlouhodobé účinky na lidský organizmus i zvýšit bezpečnost při výbojích, či jiných mimořádných událostech ve speciálních případech.

K řešení dílčích cílů byla použita řada metod - teoretický rozbor, sestavení experimentu, experimentální měření, vyhodnocení experimentu. Všechny tyto metody byly správně navrženy, byly spolu propojeny a navazovaly na sebe. Autorka práce tak měla soustavný přehled o všech fázích výzkumu a vývoje, až pro tvorbu finálních testovacích vzorků – trik. Metody byly vhodně aplikovány, takže poznatky, získané jednotlivými metodami, jsou přesvědčivé, správné a užitečné. Zvláštní pozornost zaslouží aktivní a správné užívání statistických metod zpracování velkého množství dat. V každé kapitole jsou provedeny rozbor výsledků měření, od měření fyzikálních veličin, až po určení komfortu textilií pro uživatele. Po rozbořech následují věrohodné interpretace výsledků. Souhrny jednotlivých kapitol u takto rozsáhlé práce zvyšují její přehlednost.

Úvod do studované problematiky je popsán logicky, věcně a dosti podrobně. Prezentované fyzikální zákonitosti a poznatky jsou sice známé, ale zde jsou prezentovány na vysoké odborné úrovni. Navíc jsou zcela v souladu s jejich použitím k dosažení cílů práce. V úvodní teoretické části jsou k těmto obecně známým zákonitostem velmi dobře a přesně přiřazeny také aktuální poznatky jiných pracovišť o stínění elektromagnetického záření. To vše dokazuje, že autorka je s danou tematikou velmi dobře seznámena.

Teoretický přínos práce spočívá v aktivním testování převzatých modelů vodivosti, efektivity stínění, v rozbořech a kritických hodnoceních používaných modelů, v rozboru příčin odchylek

experimentálních hodnot od teoreticky předpovězených hodnot. Jednoduchý model byl navržen a použit pro výpočet specifické rezistivity vláken. Dále je důležitý rozbor možnosti použití různých modelů vodivosti k predikci účinnosti stínění. Na závěr práce byla hledána korelace mezi naměřenou elektrickou vodivostí a účinností elektromagnetického stínění. Autorka vycházela z publikovaných vztahů, uvedených v úvodní teoretické části, a našla korelaci mezi těmito veličinami.

V experimentální části je cenná hlavně soustavnost a preciznost prováděných měření. Experimentálních výsledků je opravdu hodně, ale v práci nejsou žádné nadbytečné. Navíc se vyhodnocují, interpretují a používají v dalším stupni výzkumu. Pro experiment je důležitý nový způsob eliminace vlivu kontaktního odporu na měření vodivosti vláken, který je chráněn užitečným vzorem. Byl realizován také nový způsob měření stínící účinnosti. Jeho porovnání s metodikami, užívanými na jiných, i mezinárodních pracovištích, ukazovalo někdy stejné výsledky, jindy odchylky. I když jsou někdy tyto odchylky v řádu desítek procent, u toho poměrně špatně uchopitelného měření není tento nesoulad zase tak zásadní. Nesrovnalost mezi naměřenými hodnotami stínící účinnosti a výsledky podle převzatého modelu při nízkých frekvencích byla vysvětlena v kapitole 6.5.2.. Model nelze pro nízké frekvence aplikovat na připravené struktury.

Byla navržena a průmyslově vyrobena široká škála textilií, jak tkanin, tak i pletenin. Při výrobě vzorků byly sledovány i další souvislosti, které nejsou zajímavé z vědeckého hlediska, ale mají velký vliv na konečnou efektivitu výroby, jako je například vliv koncentrace kovových vláken na technologické požadavky. O komplexnosti práce svědčí i to, že byly sledovány vlivy na užité vlastnosti textilií, jako vliv praní, žehlení, ovlivnění tepelných a transportních vlastností a další. Vyrobena trika z vyvinutých materiálů a jejich odzkoušení probandy představují finální fázi celkového výzkumu.

Z práce je vidět, že autorka si studovanou problematiku plně osvojila, a že v tomto oboru aktivně a cílevědomě pracuje. Je také patrné, že autorka pracovala na tématu, které logicky zapadá do dlouhodobé činnosti jejího pracoviště. Jsou u ní vidět zkušenosti z práce na dané problematice. Autorka zároveň svojí prací aktivně přispěla k rozvoji tohoto oboru. O její erudovanosti svědčí i uvedený seznam řada jejích publikací, kde je autorem, nebo spoluautorem.

Předložená práce je po formální stránce velmi kvalitní. Je vhodně členěna do jednotlivých kapitol. Obsahuje velké množství obrázků, fotografií a grafů, které vhodně doplňují text. Všechny obrázky jsou přehledně a pečlivě provedeny a jsou velmi ilustrativní. Popisky obrázků jsou dostatečné a přesné, odkazy na obrázky jsou správně umístěny v textu. Rovnice jsou vysázeny přesně a pečlivě. Anotace je výstižná. Pravopisné chyby a překlepy se téměř nevyskytují. O pečlivosti autorky svědčí i korekce práce po jejím vytištění, kde na str.52 je nenápadná oprava jednotek dtex. Odborná terminologie je používána správně. Seznam literatury je obsáhlý, obsahuje všechny důležité publikace oboru, práce jsou citovány korektně, citace odpovídají normám. Velice názorná je příloha se vzorky navržených textilií. Výtky jsou nepodstatné a je jich málo - v tabulkách, např. 6.3. na straně 56 je zápis

exponenciální čísel ve tvaru 8.72E+12 trochu méně přehledný, na straně 103 je „měření materiál“ namísto „měřený materiál“.

Na doktorandku mám tyto dotazy:

Jak by se na výsledném efektu stínění projevilo použití nekonečně vodivých vláken v přízi?

Jak se budou měnit vlastnosti stínící textilie po několikanásobném vyprání?

Předložená disertační práce Ing. Veroniky Šafářové je velmi vysoké kvality. Autorka prokázala předpoklady k samostatné vědecké práci. Práce přispívá k rozvoji problematiky stínění elektromagnetického smogu užitím textilií.

Doporučuji přijetí předložená práce k obhajobě.



doc. RNDr. Miroslav Šulc, PhD.

v Liberci, dne 22.5.2014

Oponentský posudek k disertační práci

Autor disertační práce : Ing. Veronika ŠAFÁŘOVÁ
Obor doktorského studia : Textilní technika
Školící pracoviště : Katedra textilních materiálů
Školitel : prof. Ing. Jiří Militký, CSc.

Název disertační práce :

TEXTILIE SE ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ VŮČI ELEKTROMAGNETICKÉMU SMOGU

Tato disertační práce měla za cíl prostudovat a popsat chování textilních struktur na ose „vlákno-příze-textilie“ z hlediska jejich elektrického chování a odolnosti vůči elektromagnetickému smogu. Výstupem pak byly plošné textilie a konfekční výrobky se zvýšenou ochranou proti ELMG smogu při zachování vlastností standardních textilních materiálů. Konkrétní cíle a úkoly jsou přesně specifikovány v kapitole 2.

Disertační práce obsahuje teoretickou část v kapitolách 3-5, silnou praktickou část obsahující výsledky měření v kapitole 6, závěr a zhodnocení výsledků a nových poznatků v kapitole 7. Práce je velmi přehledně členěna a dá se v ní dobře orientovat.

V kapitole 3 je v přehledu popsán současný stav problematiky ELMG stínění. Autorka zde prokázala velmi širokou škálu teoretických vědomostí z uvedených studijních pramenů a podrobně popsala doposud známé možnosti tvorby plošných textilních útvarů používaných pro odstínění ELMG smogu.

V kapitole 4 jsou shrnuty základní charakteristiky ELMG záření a mechanismy ELMG stínění. Popsány jsou také známé metody pro hodnocení stínící účinnosti – vybrané z nich (metoda stíněného vlnovodu a metoda koaxiálního přenosového vedení) byly potom použity v experimentální části práce. V podkapitole 4.5 jsou citovány požadavky na stínící textilie, jejichž splnění bylo důležité pro vyvíjené textilie.

Vlastnosti elektrotechnických materiálů jsou obecně popsány v kapitole pět. Zvýšená pozornost je věnována textiliím se zvýšenou elektrickou vodivostí a jsou popsány možnosti, jak vyrábět vodivé textilie (vodivá vlákna, povrstvování textilií, potisk elektricky vodivými částicemi, prošívání vodivými nitěmi). Za velký přínos v rámci této práce považují sestavení zařízení pro měření elektrického odporu délkových textilií v závislosti na upínací délce a

vytvoření metodiky pro eliminaci kontaktního odporu – zapsáno jako užitečný vzor do rejstříku Úřadu průmyslového vlastnictví ! Dále se tato kapitola věnuje popisu elektrických vlastností plošných textilií a definuje povrchový odpor (resp.povrchovou rezistivitu), objemovou rezistivitu, perkolační práh a modely vodivosti nad tímto prahem. V závěru kapitoly je popsána elektrická vodivost přízí v závislosti na jemnosti resp. měrné hmotnosti a zaplnění příze. Elektrická vodivost plošných textilií je popsána jako soustava odporů a je definována v závislosti na počtu vazných bodů.

V experimentální části jsou nejprve popsány použité vzorky délkových textilních materiálů. Jako hraniční materiály byly studovány nevodivé materiály (bavlna, Polyester) a maximálně vodivé materiály (kovový drát). Podstata experimentu spočívala v návržení, výrobě a otestování hybridních přízí s obsahem kovového vlákna Bekinox v rozsahu 1%-60%. Byl sledován elektrický odpor jednotlivých vzorků, závislost elektrického odporu na upínací délce a vliv obsahu kovového vlákna na vybrané mechanické vlastnosti přízí. Za velmi zajímavý a přínosný považuji popis nelineární závislosti odporu hybridních přízí na jejich upínací délce (prezentováno na mezinárodních konferencích a publikováno v odborných časopisech). Naopak jako nevhodné pro ELMG stínění se na základě provedených měření projeví standardní antistatické materiály na bázi uhlíku.

Pro zkoumání plošných textilií bylo vyrobeno široké spektrum vzorků zahrnující tkaniny z hybridních přízí (1%-75% kovu), tkaniny kombinující vodivou mřížku a nevodivou půdu, zátažné pleteniny ve stejné jedolící vazbě s různým podílem kovu a zátažné pleteniny se stejným podílem kovu, ale v různé vazbě. Pro všechny vzorky byly proměřeny elektrické vlastnosti a následně efektivita ELMG stínění. Pro jednotlivé vzorky byl nalezen perkolační práh a závislost stínění na obsahu vodivého materiálu. Autorka hodnotila i vliv velikosti vodivé mřížky, vliv struktury pleteniny, vliv počtu cyklů údržby textilií, atd.

Výsledkem této velmi rozsáhlé a pečlivě provedené experimentální činnosti byl návrh konkrétních – ekonomicky optimálních - plošných textilií s dobrým komfortem a požadovanými stínícími vlastnostmi. Tento výstup je velmi zásadní pro výrobní praxi neboť cena vodivého materiálu je cca 50x vyšší než cena standardního materiálu (Polyester, bavlna) a každé ušetřené procento vodivého materiálu představuje konkurenční výhodu na trhu.

Za naprosto nové lze také označit sestavení vlastního zařízení – vlnovodu pro měření ELMG stínění pro frekvence 1,8 GHz a 2,45 GHz. Výsledky zkoušek měření na těchto vlnovodech byly ověřeny a potvrzeny také standardní normovanou metodou přerušného koaxiálního vedení. Věrohodnost výsledků potvrzuje také shoda měření, případně shoda popsaných závislostí vlastností textilií na obsahu hybridních přízí na pracovištích TUL

Liberec, ČVUT Praha a Marmara Univerzity v Turecku. Naopak tam, kde shody dosaženo nebylo, je navržena optimální metodika měření a způsob prezentace výsledků.

Za inovativní také považuji studium korelace mezi elektrickou vodivostí a účinností ELMG stínění. Z výsledků měření a navržených numerických modelů je patrná vysoká shoda zejména v oblasti nad perkolačním prahem. Do budoucna je tedy možné proměřovat pouze elektrické vlastnosti (jejichž měření je přesnější a jednodušší) a podle nich dopočítávat hodnoty stínění.

Závěrečným praktickým výstupem experimentální části byla pak výroba prototypů triček se zvýšeným fyziologickým komfortem odolných proti ELMG smogu. Fyziologický komfort byl ověřen také slepým testem na skupině probandů s pozitivním výsledkem.

K experimentální části mám následující drobné připomínky :

- *Strana 69 - Tabulka 6.12 špatně označené složení vzorku skupiny 1 – správně má být 25%PP / 75%SS (v dalších hodnotících tabulkách označeno správně);*
- *Strana 99 výraz odolné nedává smysl – zřejmě mělo být **odolnosti**;*
- *Strana 119..... správné označení vzorku B je 97% Coolmax / 3%Bekinox(SS) – dále v textu popsáno správně*

Tyto chyby lze označit za drobné překlepy a nemají žádný vliv na vysokou odbornou úroveň celé práce.

Disertační práci jako celek považuji za vysoce inovativní a přínosnou po teoretické i praktické stránce. Cíle stanovené v zadání disertační práce byly zcela splněny. Výstupy z disertační práce pozitivně ovlivní teoretickou oblast (oceňuji četné publikace v odborných knihách, časopisech a na mezinárodních konferencích) tak i výrobní a experimentální praxi (navržený průmyslový užitný vzor a sada textilních produktů). Autorka použila ve své práci standardní měřicí metody a také navrhla a použila metody nové (vlnovod pro měření ELMG stínění, vlastní numerické modely). K formální a jazykové úpravě práce nemám žádné připomínky.

Závěr :

Jednoznačně doporučuji disertační práci k obhajobě.

V Ústí nad Orlicí 24. května 2014



Ing. Jiří Procházka