

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Ing. Miroslava Maršálová

**Elektrické chování textilií s antistatickými vlastnostmi a
způsoby jejich hodnocení**

Electric Behavior of Textiles with Antistatic Properties
and Methods of Their Evaluation

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: **ELEKTRICKÉ CHOVÁNÍ TEXTILIÍ
S ANTISTATICKÝMI VLASTNOSTMI A
ZPŮSOBY JEJICH HODNOCENÍ**

Autor: **Ing. Miroslava Maršálková**

Obor doktorského studia: textilní materiálové inženýrství

Forma studia: kombinovaná

Školící pracoviště: KTM TU v Liberci

Školitel: Prof. Ing. Jiří Militký, CSc.

Školitel specialista:

Liberec 2008

1. Předmět a cíl práce

Práce se zabývá způsoby hodnocení elektrických vlastností textilií se zatkanými antistatickými vlákny.

Na souboru textilií s různou roztečí zatkaného antistatického vlákna, jak ve směru paralelním s osnovou, tak ve směru paralelním s útkem, byla provedena měření povrchové a objemové rezistivity (s rozsahem měřicího napětí $5 \div 500$ V). Měření byla provedena při odlišných vlhkostech okolního ovzduší, neboť vlhkost ovzduší má na výsledné elektrické vlastnosti textilií nezanedbatelný vliv. Během měření se projevila výrazná anizotropie elektrických vlastností testovaných textilií. Tato anizotropie byla prokázána i při měření povrchové rezistivity metodikou odlišnou od metodiky platné dle norem používaných pro hodnocení elektrických vlastností textilií v České republice. Měření délkové rezistivity jednotlivých přízí ověřilo, zda anizotropie není způsobena rozdílnou vodivostí antistatika v osnově a útku.

Standardní metoda měření a hodnocení elektrických vlastností antistatických textilií se ukázala jako nedostačující pro odhalení a popis anizotropie elektrických vlastností textilií. V rámci této práce byl navržen přípravek pro měření anizotropie elektrických vlastností textilií, jeho funkčnost byla ověřena a přípravek spolu s metodikou měření patentován.

Na základě praktických výsledků byly modelovány el. vlastnosti textilií s využitím programu Femlab[®]. Vytvořené matematické modely graficky zobrazují rozložení elektrického pole na textilii a jeho deformace vlivem zatkaného antistatického vlákna. Využitím obrazové analýzy Lucia G byly také měřeny geometrické parametry testovaných textilií. (tj. vystupující plocha antistatického vlákna na povrch textilie, maximální a minimální Feretův průměr této plochy).

Cíle disertační práce

- stanovení elektrického chování textilií s předpokládanými antistatickými vlastnostmi
- návrh a výroba prototypu zařízení pro měření anizotropie elektrických vlastností textilií
- ověření funkčnosti zařízení pro měření anizotropie elektrických vlastností textilií
- simulace elektrických vlastností antistatických textilií
- posouzení možnosti modelování elektrických vlastností testovaných antistatických textilií

2. Přehled současného stavu problematiky

Antistatické vlastnosti hodnotíme pomocí jejich: a) povrchové rezistivity textilie [Ω], b) objemové rezistivity textilie [$\Omega \cdot m$].

V běžné textilní praxi se k hodnocení „antistatických textilií“ používá měření povrchové rezistivity, k měření objemové rezistivity se přistupuje pouze ve sporných případech. Tato měření mohou být doplněna hodnotami: maximálního elektrického potenciálu [kV] a dobou vybíjení textilie z 1000 V na 5 V [s].

Tabulka VI: Hodnocení antistatických vlastností [46]:

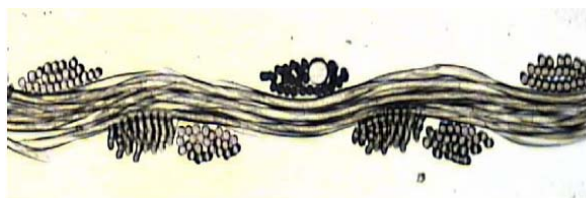
Antistatický stupeň	Povrchová rezistivita textilie [Ω]	Objemová rezistivita textilie [$\Omega \cdot m$]
výborný	$10^6 \div 10^7$	$10^6 \div 10^7$
velmi dobrý	$10^7 \div 10^8$	$10^7 \div 10^8$
dobrá	$10^8 \div 10^9$	$10^8 \div 10^9$
průměrný	$10^9 \div 10^{10}$	$10^9 \div 10^{10}$
sotva vyhovující	$10^{10} \div 10^{11}$	$10^{10} \div 10^{11}$
nehovující	$10^{11} \div 10^{13}$	$10^{11} \div 10^{13}$

3. Použité metody

V experimentu byly použity tkaniny se stejnou vazbou K 2/1, dostavou osnovy (485 nití / 10 cm) a útku (320 nití / 10 cm), pro trvalou antistatickou úpravu je použito stejné vodivé vlákno zn. Rezistat, které je zatkáno s variabilní roztečí, popis tohoto zatkáání je uveden i s označením vzorků v tabulce. Na obrázku 3.1 je pro představu o vzhledu tkaniny uveden příčný řez tkaninou s antistatickým vláknem.

Tabulka 3.1: Popis použitých vzorků textilií

Označení vzorku		Rozteč vodivých vláken v útku [mm]			
		5	10	13	bez
Rozteč vodivých vláken v osnově [mm]	5	1a	2a	3a	4a
	10	1b	2b	3b	4b
	15	1c	2c	3c	4c
	bez	1d	2d	3d	4d



a) řez osnovou



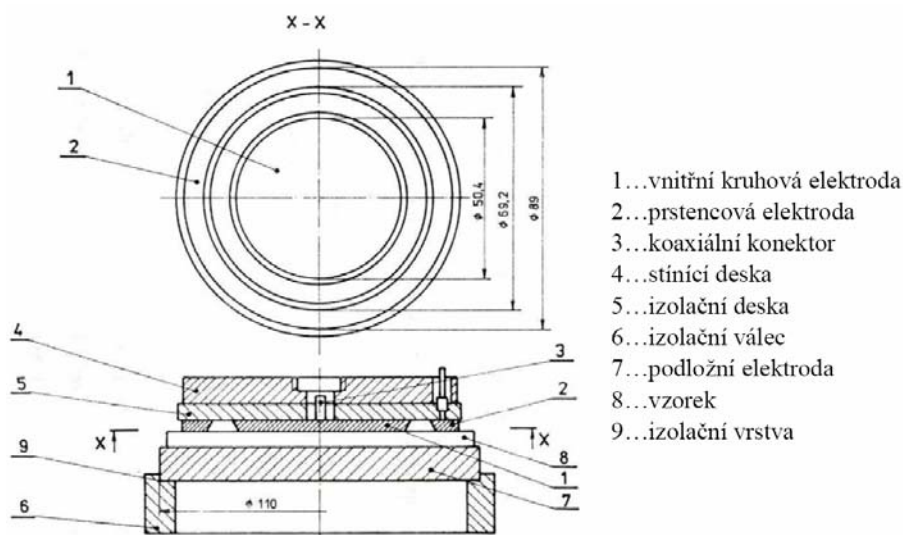
b) řez útkem

Obr. 3.1 Příčný řez textilií s antistatickými vlákny

(Obrázky řezů textilií byly pořízeny na obrazové analýze Lucia G.)

3.1. Měření rezistivity dle normy ČSN EN 61340 – 5

Popis měření: U tkanin byla měřena povrchová a objemová rezistivita na zařízení skládající se z přípravku (tří kruhových elektrod odpovídajících normě ČSN EN 1149-1, EN 100015, ČSN EN 61340-5-1 viz obr. 3.2) a měřícího přístroje High Resistance Meter 4339B Hewlett Packard.



Obr. 3.2 Tříelektrodový koncentrický systém pro měření povrchové a objemové rezistivity plošných textilií

U vzorků s nízkou rezistivitou nebylo vzhledem k proudové ochraně přístroje možné při napětí vyšším než 100 V rezistivitu naměřit (Ohmův zákon).

Z každého druhu vzorku (např. označení 1a) bylo pro měření připraveno 10 shodných vzorků. Každý z deseti vzorků byl proměřen při daném napětí (1 hodnota ~ průměrná hodnota

z 256 měření), tedy 1 hodnota v tabulce výsledků je vždy průměr z 2560 hodnot. Soubory obsahující jednotlivá data byly pomocí programu QC Expert testovány, zda se jedná o data normálního rozdělení, homogenní a nezávislá, všechna naměřená data těmto parametrům odpovídají.

3.2. Povrchová resistivita dle EN 100015 Part 1:1991

Toto měření bylo provedeno jako doplňkové, pro potvrzení rozdílného vlivu zatčení vodivého vlákna v osnově a v útku. Norma EN 100015 Part 1:1991 pro měření povrchové resistivity používá dvě elektrody o rozměrech kontaktní plochy jedné elektrody 5 x 65 mm, vzdálenost elektrod je 60 mm, elektrody jsou pevně umístěny v držáku. Pro měření byl použit měřicí přístroj Metriso 2000 (Wolfgang Warbier Germany), Vermacon-product code H1003, zatížení $2,5 \pm 0,5$ kg; chyba měření $\pm 5\%$.

Podmínky měření: vlhkost 26 %; teplota 23 °C; měřicí napětí 100 V

A – označuje elektrody umístěné na vzorku rovnoběžně s osnovou (tzn. měříme povrchovou resistivitu vláken zatkaných v útku).

B – označuje elektrody umístěné na vzorku rovnoběžně s útkem.

3.3. Resistivita jednotlivých vláken

Pomocí „jehlových“ elektrod bylo realizováno měření k ověření vodivosti vláken zatkaných v osnově a vláken zatkaných v útku, neboť měření prokázalo, že výsledná vodivost se při stejném zastoupení vláken výrazně liší (rozdíl je až o 10^8). Elektrody byly přiloženy přímo na jednotlivá vodivá vlákna v textilií ve vzdálenosti od 1 cm do 10 cm s krokem 1 cm.

Podmínky měření: vlhkost 60 %; teplota 25 °C; měřicí napětí 100 V

3.4. Měření parametrů na povrch textilie vystupujícího antistatika pomocí obrazové analýzy LUCIA G

Na obrazové analýze Lucia G byly měřeny parametry „vystupujících“ ploch antistatických vláken, které leží na povrchu antistické textilie. Naměřená data jsou porovnána s naměřenými rezistivitami.

Byly zvoleny tyto měřené parametry:

- plocha vodivého vlákna na povrchu textilie
- maximální Feretův průměr
- minimální Feretův průměr

Měření tzv. Feretových průměrů bylo zvoleno z důvodu získání hodnot délky a šířky, neboť měřených objektů bylo velké množství a neměly pravidelný tvar.

3.5. Modelování elektrických vlastností textilií ve Femlabu

Pro modelování elektrických vlastností v programu Femlab je nutné provést několik kroků:

1. snímání obrazu textilie pomocí obrazové analýzy Lucia G; následuje úprava nasnímaného obrazu (například v programu Photoshop)
2. převod obrazu z režimu RGB do režimu 0-1 (v programu Matlab)
3. modelování elektrických vlastností v programu Femlab

4. Přehled dosažených výsledků

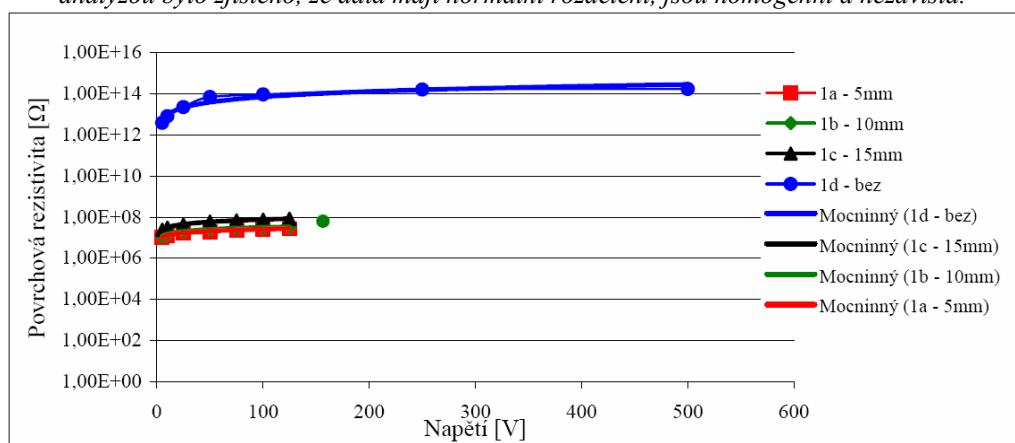
4.1. Výsledky měření dle normy ČSN EN 61340 – 5

Tabulka X: Výsledky měření povrchové rezistivity

U [V]	Povrchová rezistivita ρ_s [Ω] při daném napětí U [V] $\phi = 49\%$								
	5	10	25	50	75	100	125	250	500
1a	1,03E+07	1,28E+07	1,69E+07	1,99E+07	2,42E+07	2,64E+07	2,75E+07	---	---
1b	1,19E+07	1,49E+07	2,02E+07	2,60E+07	2,91E+07	3,16E+07	3,37E+07	---	---
1c	2,43E+07	3,14E+07	4,47E+07	6,05E+07	7,01E+07	7,49E+07	8,39E+07	---	---
1d	3,93E+12	8,27E+12	2,31E+13	7,13E+13	---	9,53E+13	---	1,63E+14	1,73E+14
2a	1,07E+07	1,30E+07	1,70E+07	2,18E+07	2,42E+07	2,57E+07	2,71E+07	---	---
2b	1,25E+07	1,50E+07	1,95E+07	2,50E+07	2,79E+07	2,92E+07	3,15E+07	---	---
2c	2,56E+07	3,40E+07	4,87E+07	6,49E+07	7,53E+07	8,28E+07	8,82E+07	---	---
2d	2,04E+12	5,45E+12	1,43E+13	5,22E+13	---	9,53E+13	---	1,72E+14	2,15E+14
3a	1,06E+07	1,31E+07	1,71E+07	2,14E+07	2,45E+07	2,61E+07	2,77E+07	---	---
3b	1,25E+07	1,52E+07	1,99E+07	2,50E+07	2,82E+07	2,96E+07	3,17E+07	---	---
3c	2,44E+07	3,10E+07	4,06E+07	5,20E+07	5,95E+07	6,36E+07	6,86E+07	---	---
3d	1,61E+12	4,31E+12	1,15E+13	3,06E+13	---	1,29E+14	---	2,30E+14	2,69E+14
4a	1,07E+07	1,29E+07	1,73E+07	2,19E+07	2,43E+07	2,56E+07	2,71E+07	---	---
4b	1,27E+07	1,68E+07	2,41E+07	3,14E+07	3,76E+07	3,96E+07	4,26E+07	---	---
4c	2,71E+07	3,43E+07	4,37E+07	5,94E+07	6,40E+07	6,83E+07	7,35E+07	---	---
4d	9,14E+12	2,67E+13	6,62E+13	1,17E+13	---	1,49E+14	---	1,70E+14	1,71E+14

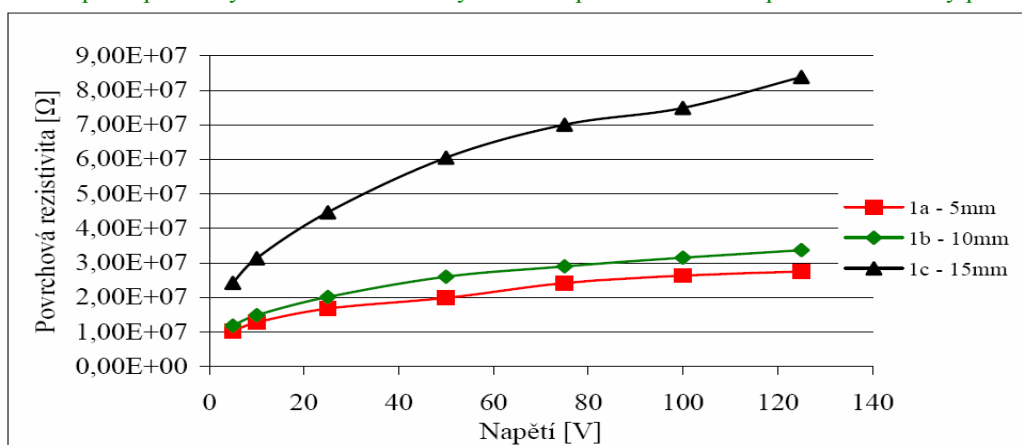
Poznámka 1: Vzhledem k rozsahu naměřených hodnot rezistivit je na ose y u grafů vykreslujících výsledky měření celé skupiny vzorků použito logaritmické měřítko. V detailním grafu je použito standardní měřítko.

Poznámka 2: Statistická analýza naměřených dat byla provedena pomocí software QC Expert, provedenou analýzou bylo zjištěno, že data mají normální rozdělení, jsou homogenní a nezávislá.



Obr. 4.1 Povrchová rezistivita v závislosti na napětí (vodivé vlákno v útku s roztečí 5 mm)

- měření při napětích vyšších než 100 V nebylo možné provést z důvodu proudové ochrany přístroje



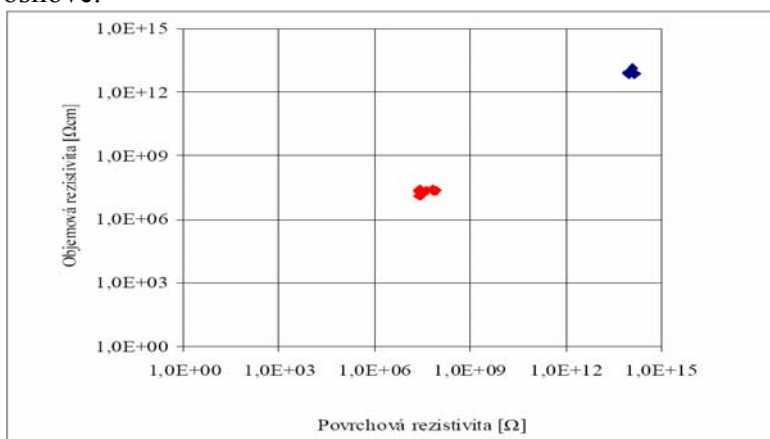
Obr. 4.2 Detail obrázku 4.1 - Povrchová rezistivita v závislosti na napětí (vodivé vlákno v útku s roztečí 5 mm)

Na obrázku 4.1 vidíme rozdíl mezi výslednou rezistivitou skupiny vzorků, které měly stejný obsah vodivého vlákna v útku (tedy s roztečí 5 mm). Vzorky 1a, 1b a 1c obsahují určité množství vodivého vlákna v osnově a mají výslednou rezistivitu srovnatelnou. Naopak vzorek

Id žádné vodivé vlákno v osnově neobsahuje a i když obsahuje v útku vodivé vlákno v největším množství (rozteč 5mm), je jeho výsledná rezistivita o 5 řádů vyšší.

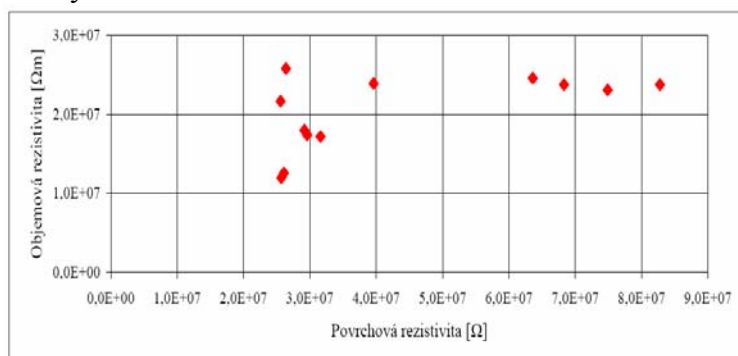
Grafy skupin vzorků 2, 3 a 4 jsou téměř identické (zásadní vliv na vodivost vzorků má zatčení antistatika v osnově), proto zde nejsou uvedeny. Obdobných výsledků bylo dosaženo i při měření objemové rezistivity, tyto výsledky také nejsou uvedeny v autoreferátu.

Porovnání hodnot povrchové a objemové rezistivity vidíme na obrázcích 4.3, 4.4 a 4.5. Na obrázku 4.3 vidíme dvě oddělené skupiny bodů barevně rozlišené. Modrá barva označuje rezistivity vzorků bez vodivého vlákna v osnově. Červená barva označuje vzorky mající vodivá vlákna v osnově.

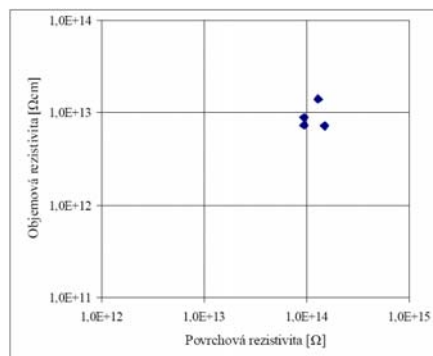


Obr. 4.3 Porovnání povrchové a objemové rezistivity (U=100V)

Z obrázku 4.12 je patrné, že ze statistického hlediska je významnější měření povrchové rezistivity, neboť toto měření vykazuje větší rozsah hodnot, je tedy „citlivější“ na změny množství vodivého vlákna v textilií.



Obr. 4.4 Porovnání povrchové a objemové rezistivity (U=100V) – detail grafu 4.11

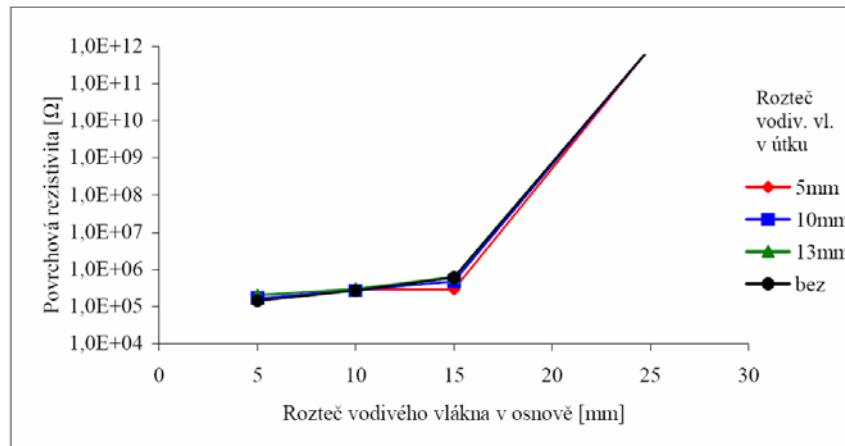


Obr. 4.5 Porovnání povrch. a objem. rezist. (U=100V) – detail grafu 4.11

4.2. Povrchová rezistivita dle EN 100015 Part 1:1991 – výsledky měř

Tabulka 4.2: Povrchová rezistivita dle normy EN 100015 Part 1: 19

orientace elektrod	A	B	A	B	A	B	A	B
vzorek	1a		1b		1c		1d	
průměr	>9,2E+11	1,54E+05	>9,2E+11	4,91E+05	>9,2E+11	2,92E+05	>9,2E+11	>9,2E+11
sm. odch.	---	1,44E+04	---	1,83E+05	---	4,13E+04	---	---
var.koef.	---	9,3	---	37,2	---	14,2	---	---
vzorek	2a		2b		2c		2d	
průměr	>9,2E+11	1,67E+05	>9,2E+11	2,73E+05	>9,2E+11	4,79E+05	>9,2E+11	>9,2E+11
sm. odch.	---	2,44E+04	---	5,14E+03	---	4,42E+04	---	---
var.koef.	---	14,6	---	1,9	---	9,2	---	---
vzorek	3a		3b		3c		3d	
průměr	>9,2E+11	2,02E+05	>9,2E+11	3,00E+05	>9,2E+11	6,22E+05	>9,2E+11	>9,2E+11
sm. odch.	---	2,91E+04	---	4,70E+04	---	1,39E+05	---	---
var.koef.	---	14,4	---	15,6	---	22,4	---	---
vzorek	4a		4b		4c		4d	
průměr	>9,2E+11	1,41E+05	>9,2E+11	2,68E+05	>9,2E+11	5,98E+05	>9,2E+11	>9,2E+11
sm. odch.	---	1,71E+04	---	3,91E+04	---	1,35E+05	---	---
var.koef.	---	12,1	---	14,6	---	22,5	---	---



Obr. 4.6 Závislost povrchové rezistivity na rozteči vodivého vlákna v osnově

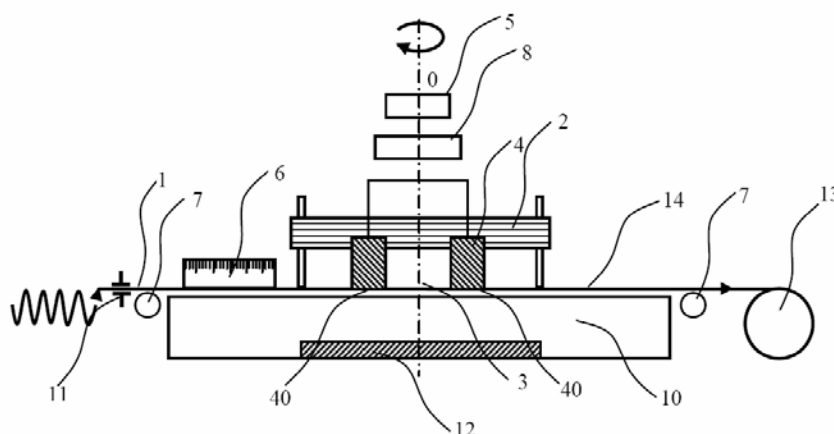
Z grafu na obrázku 4.6 vidíme, že pro „dobrou“ vodivost textilie s uhlíkovými vlákny (resp. nízkou rezistivitu) má větší význam zatknání vodivého vlákna v osnově, pokud antistatické vlákno v osnově není, elektrické vlastnosti textilie se podstatně zhoršují (o 6 a více řádů). Naopak vynechání vodivého vlákna v útku tak významné není.

4.3. Výsledky měření délkové rezistivity jednotlivých antistat. vláken

Výsledky měření ukazují, že délková rezistivita jednotlivých vláken jak v osnově, tak v útku je stejná, jak je patrné z naměřených hodnot a následně i z grafů (v autoreferátu nejsou uvedeny). Výsledné výběry měření délkové rezistivity byly otestovány pomocí software QC Expert na shodu rozptylů, průměrů a rozdělení, ve všech testovaných parametrech byla prokázána shoda.

4.4. Měření anizotropie rezistivity materiálů

Jak prokázala předcházející měření, mohou textilie se zatkanou (nebo jinak vloženou) vodivou strukturou vykazovat jistou anizotropii. Pro materiály s předpokládanou anizotropií rezistivity (nebo jiné elektrické vlastnosti) není vhodné měření pomocí kruhové elektrody uváděné platnou normou ČSN EN 61340-5-1. Na základě měření byl navrhnut a patentován níže uvedený přípravek pro měření anizotropie materiálu a metodika hodnocení naměřených hodnot.



- Legenda:** 1 ... materiál
 1a...textilie s vodivými vlákny
 a ... vodivé vlákno
 2 ... držák elektrod otočný o 90°
 3 ... měřicí štěrбина (rozměr měřicí štěrbin: 10 až 50 mm)
 4 ... měřicí elektrody
 5 ... PC
 6 ... stupnice posunu materiálu
 7 ... šířková rozpínka
 8 ... digitální multimetr
 9 ... stojánek na materiál
 10... izolační podložka
 11... zvedání elektrod a úhlové nastavení měřicí štěrbin
 12... elektroda pro měření objemové rezistivity
 13... návin proměřeného materiálu
 14... brzdíčka regulující napětí materiálu

Obr. 4.7 Přípravek pro měření anizotropie rezistivity materiálů

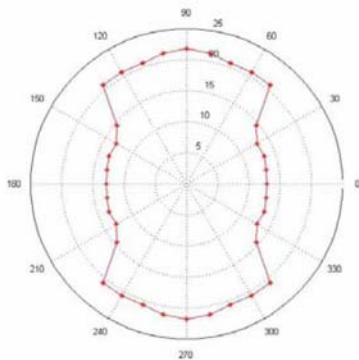
Anizotropie rezistence vláken byla měřena pro čtyři různé vzdálenosti elektrod ($l_1 = 1$ cm, $l_2 = 2$ cm, $l_3 = 4$ cm a $l_4 = 6$ cm). Ve všech vzdálenostech byly měřeny hodnoty v oblasti úhlů 0° až 90°.

0° ... elektrody nastaveny se směrem paralelním s osnovou

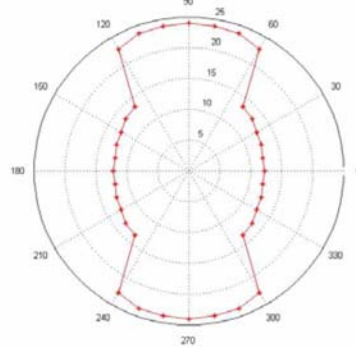
90° ... elektrody nastaveny se směrem paralelním s útkem

Podmínky měření: relativní vlhkost ovzduší $\varphi = 30 \div 35 \%$; teplota $t = 22 \div 24 \text{ }^\circ\text{C}$; měřící napětí 100 V.

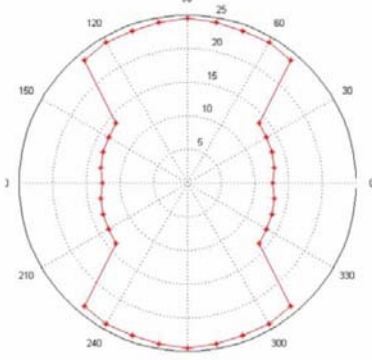
Také byla měřena elektrická rezistence textilních vzorků v úhlech od 0° do 360° , ale pouze se vzdáleností elektrod $l_4 = 6 \text{ cm}$. Tyto hodnoty byly porovnány s výsledky měření pro úhly $0^\circ \div 90^\circ$.



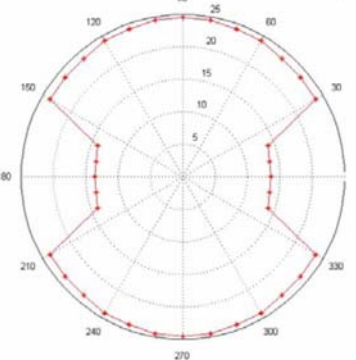
Obr. 4.8 Graf rezistence vzorku 1c pro 1 cm



Obr. 4.9 Graf rezistence vzorku 1c pro 2 cm

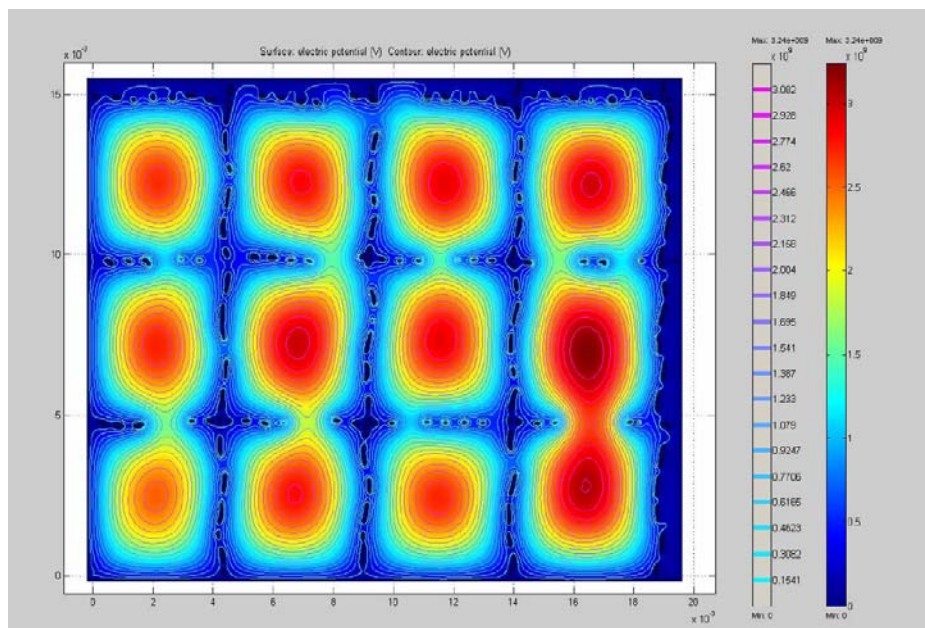


Obr. 4.10 Graf rezistence vzorku 1c pro 4 cm

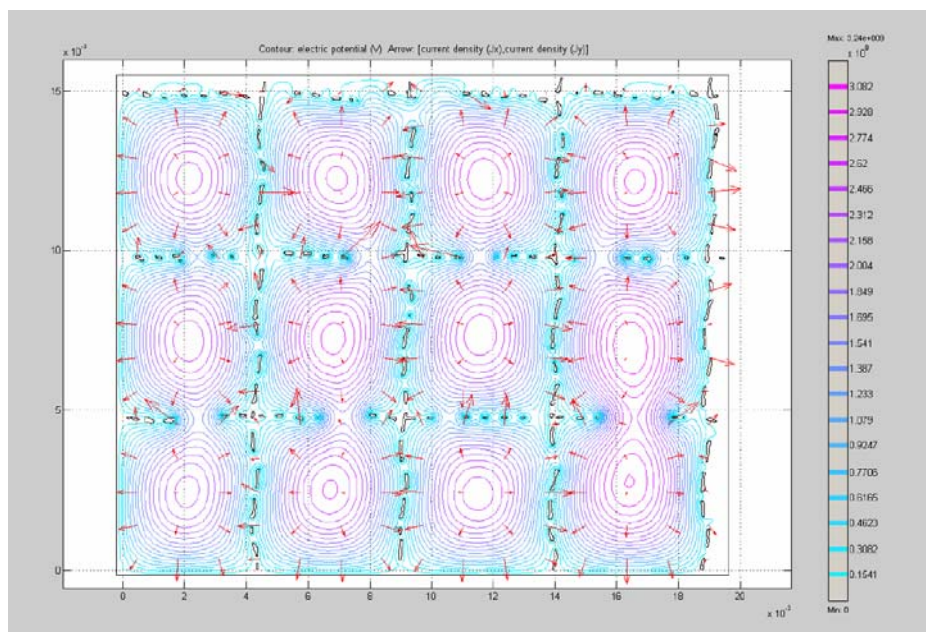


Obr. 4.11 Graf rezistence vzorku 1c pro 6 cm

4.5. Simulace elektrických vlastností textilií v programu Femlab[®]



Obr. 4.12 Rozložení elektrického potenciálu (elektrody „přiložené“ okolo vzorku, použité napětí $U=100 \text{ V}$)



Obr. 4.13 Model zobrazující linie stejného elektrického potenciálu a vektory velikosti a směru hustoty elektrického proudu

4.6. Modelování elektrických vlastností textilií

Byly ověřovány následující modely modelování elektrických vlastností vícesložkových materiálů:

- Geometrický (Nielsonův model)
- Statistický

Geometrický model:
$$\sigma_c = \sigma_{poly} \frac{1 + AB\phi_f}{1 - B\psi\phi_f}$$

$$B = \frac{\sigma_f / \sigma_{poly} - 1}{\sigma_f + A} \quad \text{pro polymery je } B=1; \quad \psi = 1 + \left(\frac{1 - \phi_m}{\phi_m^2} \right) \phi_f$$

Kde: ϕ_f je objemový podíl vodivých vláken, ϕ_m je objemový podíl textilie, σ_c je výsledná vodivost textilie, σ_f je vodivost použitých vodivých vláken, A je ztrátový podíl.

Statistický model:
$$\sigma = \sigma_0 (V - V_c)^s$$

Kde: σ je celková vodivost vzorku, σ_0 je vodivost vláken, V je objemový podíl výplně, V_c je objem percolační části, s je kritický koeficient v závislosti na dimenzi ($t_2 = 1,3$; $t_3 = 1,6$ - index značí dimenzi).

Model vodivosti pro materiály s vodivými vlákny:

$$\sigma_f^* = \frac{\sigma_f}{1 + \left(\frac{l^*}{l} \right) \sigma_f} \quad \sigma_c = \left[\frac{\sigma_f}{1 + \left(\frac{l^*}{l} \right) \sigma_f} \right] v_f + \sigma_m (1 - v_f)$$

Kde: v_f je objemový podíl vláken, σ_f je vodivost vlákna, l je délka vlákna (max. Feretův průměr), σ_m je vodivost matrice (textilie), L je délka matrice (testovaný rozměr textile), I^* je impedance (pokud je $\sigma_f^* = \sigma_f$ tak I^* je zanedbatelná), σ_f^* je efektivní vodivost vlákna.

Bohužel ani jeden z modelů není pro případ modelování elektrických vlastností textilií s antistatickými vlákny vhodný, neboť nepočítá se zaplněním textilie resp. pórovitostí (množství vzduchu v textilii, které tvoří pro tento případ přibližně 60%) a tedy zanedbávají poměrně významnou složku vodivosti textilie, tedy vodivost vzduchu, která není zanedbatelná. Výsledky ověřování zde nejsou uváděny, neboť jsou značně obsáhlé a nejsou v porovnání s měřením signifikantní, neodpovídají tedy skutečnosti. Byly zkoušeny i některé další možnosti výpočtů, bohužel se stejným výsledkem.

4.7. Výsledky měření „vystupujících“ povrchů pomocí obrazové analýzy

Na textiliích bylo také provedeno měření „vystupujících“ částí antistatika na povrchu textilie, bylo měřeno: plocha vystupujícího antistatika, maximální Feretův průměr (délka měřeného objektu) a minimální Feretův průměr (šířka měřeného objektu).

Tabulka 4.3: Porovnání zastoupení antistatika s naměřenými rezistivitami

% antistatika v objemu textilie	Vzorek	%ní zastoupení antistatika na povrchu tkaniny			Povrchová rezistivita [Ω]			Objemová rezistivita [Ωcm]		
0,72	1b=2a	0,458	0,535		$3,16 \cdot 10^7$	$2,57 \cdot 10^7$		$1,72 \cdot 10^7$	$1,20 \cdot 10^7$	
0,65	1c=3a	0,390	0,492		$7,49 \cdot 10^7$	$2,61 \cdot 10^7$		$2,31 \cdot 10^7$	$1,26 \cdot 10^7$	
0,5	1d=2b=4a	0,254	0,331	0,407	$9,53 \cdot 10^{13}$	$2,92 \cdot 10^7$	$2,56 \cdot 10^7$	$7,42 \cdot 10^{12}$	$1,80 \cdot 10^7$	$2,17 \cdot 10^7$
0,4	2c=3b	0,263	0,289		$8,28 \cdot 10^7$	$2,96 \cdot 10^7$		$2,38 \cdot 10^7$	$1,74 \cdot 10^7$	
0,24	2d=4b	0,127	0,204		$9,53 \cdot 10^{13}$	$3,96 \cdot 10^7$		$8,94 \cdot 10^{12}$	$2,39 \cdot 10^7$	
0,16	3d=4c	0,085	0,136		$1,29 \cdot 10^{14}$	$6,83 \cdot 10^7$		$8,94 \cdot 10^{12}$	$2,38 \cdot 10^7$	

- Modře jsou označeny vzorky s větším podílem antistatika v osnově

Pro oba druhy rezistivit byla také spočítána korelace rezistivit s plochou vystupujících vodivých částic na povrch textilie a s množstvím antistatika v textilii. Výsledek ukázal, že více koreluje (tedy jsou závislejší) s plochou antistatika vystupujícího na povrch textilie než s množstvím antistatika zatkaného v textilii a to i v případě objemové rezistivity, kde je tato závislost překvapivě výraznější, neboť zde mělo dojít i k „využití“ antistatika v objemu textilie.

5. Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Disertační práce se zabývá problematikou elektrických vlastností textilií s antistatickými vlákny a způsoby jejich hodnocení. Pro tuto práci byly vybrány antistatické textilie používané v tzv. speciálně čistých provozech. Tedy tam, kde jsou na používanou textilii kladeny zvýšené nároky i na její další vlastnosti, nejen na její kvalitní antistatické vlastnosti. Tyto požadavky, však výrazně omezují možnosti výběru materiálu vhodného pro výrobu a i další případné finální úpravy textilie.

Práce je zaměřena na měření povrchové a objemové rezistivity textilií. Zejména však na interpretaci naměřených výsledků, jejich rozbor a případné možnosti modelování elektrických vlastností textilie a jejího chování v elektrickém poli.

Povrchová a objemová rezistivita byla měřena v napěťové závislosti, v rozsahu zkušební napětí od 5 V do 500 V. Dále byla ověřena i závislost rezistivit textilií na vlhkosti ovzduší. Měření bylo prováděno se standardními kruhovými elektrodami. Během měření rezistivit se u zkoušených vzorků projevila značná anizotropie výsledných hodnot. Tato anizotropie byla ověřena pomocí měření rezistivity dvěma paralelními elektrodami, kladenými po směru osnovy a po směru útku. Anizotropie se projevila, neboť měření byla prováděna na souboru textilií, které měly shodné parametry v těchto bodech: materiálové složení, dostava, vazba tkaniny, jemnost použitých přízí, rozdíl byl pouze v rozteči zatkaní antistatika jak ve směru osnovy, tak ve směru útku. Zda anizotropie není způsobena rozdílnou vodivostí antistatika

použitého v osnově a útku bylo ověřeno pomocí délkové rezistivity jednotlivých nití, antistatikum vykazalo shodnou rezistivitu. Na základě těchto výsledků měření byl navržen, ověřen a spolu s metodikou měření patentován nový přípravek pro měření anizotropie elektrických vlastností materiálů. Porovnáme-li měření elektrických vlastností pomocí běžně používaných kruhových elektrod a pomocí přípravku na měření anizotropie elektrických vlastností můžeme říci, že:

- standardní metoda měření s kruhovými elektrodami je vhodná pro měření elektrických vlastností textilií (nebo jiných plošných materiálů, kompozitů apod.), u kterých předpokládáme izotropní elektrické vlastnosti, například běžné textilie nebo textilie s antistatickou úpravou v celé ploše
- nová metoda měření elektrických vlastností textilií (nebo jiných plošných materiálů, kompozitů apod.) pomocí přípravku s dvěma otočnými paralelními elektrodami je vhodná pro měření textilií obsahující vodivá vlákna

Z naměřených hodnot rezistivit (jak povrchové, tak objemové) je patrné, že vzorky, které neobsahovaly žádné vodivé vlákno v osnově (označení „d“) bez ohledu na množství vodivého vlákna v útku, měly výrazně vyšší hodnoty rezistivit (rozdíl 5 - 6 řádů). Tento výrazný rozdíl se projevoval u většiny provedených měření. Z toho vyplývá, že větší vliv (lepší využití) na výsledné elektrické vlastnosti tkaniny s vazbou K2/1 má vodivé vlákno ve směru osnovy. Z praktického hlediska poměru mezi mírou odvodu elektrostatického náboje a náklady na výrobu dané textilie lze dle výsledků doporučit, že dostačující množství antistatika, je antistatikum v osnově s roztečí 10 mm, jak prokázala měření. Další zvyšování množství antistatika pro tento typ textilie nemá význam, pouze zvyšuje náklady na výrobu textile. Jelikož antistatické vlákno zatkané ve směru útku nemá na odvod elektrostatického náboje významný vliv, lze doporučit snížení jeho množství pouze na minimum pro zachování vodivého spojení mezi jednotlivými antistatickými vlákny v osnově.

Při porovnání hodnot povrchové a objemové rezistivity, vykazovala povrchová rezistivita větší rozsah naměřených hodnot, je tedy citlivější na množství vodivého vlákna a tedy vhodnější pro měření, kdy je nutné sledovat vliv množství vodivého vlákna na výsledné elektrické vlastnosti textilie.

Dalším cílem této práce bylo ověřit funkčnost přípravku a metodiku měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů. Měření bylo provedeno na stejném souboru textilií. Výsledky měření anizotropie mohou být použity pro kompletní popis elektrických vlastností textilií a jedno z konkrétních využití může být polohování stříhových dílů při šití ochranných oděvů z antistatických textilií (při použití takových oděvů nesmí například docházet k hromadění náboje ve švech).

Anizotropní vlastnosti ovlivňuje:

- množství antistatika v jednotlivých směrech
- vazba tkaniny
- struktura příze

Struktura příze (počet zákrutů, jemnost a počet fibril) a tkaniny (použitá vazba) může velmi ovlivnit výslednou rezistivitu textilie (může dojít k „zaizolování“ antistatického vlákna). Struktura textilie ovlivňuje „vystupující“ plochy antistatika na povrch textilie, (důležitá je nejen plocha, ale i délka a vzdálenost mezi jednotlivými úseky), jak tyto geometrické parametry ovlivňují elektrické pole textilie ukazují simulace provedené v programu Femlab[®].

Další část této práce se zabývá simulováním chování textilií s antistatickými vlákny v elektrickém poli. Pro tuto problematiku byl použit program Femlab[®]. Nevýhodou modelování v tomto programu je, že neumožňuje zahrnout vliv ovzduší na vodivost textilie, neboť textilií lze v tomto prostředí modelovat pouze jako celistvý materiál bez pórů obsahujících vzduch, vlhkost a prachové částice. Výsledná rezistivita tkaniny spočítaná Femlabem se proto liší o několik řádů. Naopak nespornou výhodou je znázornění elektrického

pole dielektrika, přehledné zobrazení míst hromadění náboje či jeho tzv. „stékání“ do vodivých míst.

V práci byly také ověřovány různé způsoby modelování elektrických vlastností textilií běžně používané pro modelování elektrických vlastností kompozitů s podílem vodivých částic, bohužel ani jeden ověřovaný model není vyhovující pro modelování elektrických vlastností textilií s vodivými vlákny. Tyto textilie mají na rozdíl od kompozitních materiálů ve své struktuře značný podíl pórů (přibližně 60%) a tedy výsledné elektrické vlastnosti textilií jsou ovlivněny „vodivostí“ okolního prostředí (vzduch, prachové částice, vlhkost apod.).

Cíle disertační práce byly splněny.

6. Práce autora se vztahem ke studované problematice

- [1] Maršálková, M.: *Antistatické vlastnosti textilií*, Strutex 2001, Liberec (ISBN 80-7083-549-4)
- [2] Maršálková, M.: *Influence of structural configuration of conductive fibres on resultant electrical properties*, Strutex 2002, Liberec (ISBN 80-7083-668-7)
- [3] A. Richter, J. Odvárka, M. Maršálková, TU Liberec, *Přípravek a metoda měření anizotropie rezistivity materiálů*, PV 2003-2885, PS 3393CZ, 21.10.2003
- [4] Marsalkova M., Richter A., Odvárka J.: *New measurements method of anisotropy electrical properties of fabrics with carbon fibres*, 3. Indo-Czech Textile Research Conference, Liberec 2004 (ISBN 80-7083-842-6)
- [5] Gregr J., Marsalkova, M.: *Molecular modelling and prediction of fibres properties*, 3. Indo-Czech Textile Research Conference, June 14-16, Liberec 2004 (ISBN 80-7083-842-6)
- [6] Maršálková M., Richter A.: *Formulation of Electric Conductance Anisotropy on Surface of Fibres with the New Method of Complex Numbers and Rotating Vectors*, "Textile and clothing - education, research, production", Bulgaria 2004 (ISBN 954-438-406-5)
- [7] Maršálková M., Richter A., Odvárka J.: *Anisotropy of electrical properties of fabrics with carbon fibres*, AUTEX 2004, Roubaix -France (ISBN 2-9522440-0-6)
- [8] Maršálková M., Richter A.: *Method of measurement anisotropy of electrical materials properties*, ITC&DC Dubrovnik – Croatia 2004 (ISBN 953-7105-05-9)
- [9] Grégr, J., Maršálková, M.: *Molecular Modelling and Prediction of Fibres Properties*; 3rd Indo-Czech Textile Research Conference, June, Liberec 2004, Book of abstracts, (ISBN 80-7083-842-6)
- [10] Grégr J., Maršálková M., Slavík M.: *Computational Chemistry for Textile Material Engineering*, Strutex 2004 (ISBN 80-7083-891-4)
- [11] Grégr, J., Maršálková, M.: *Molecular Simulation and Prediction of Fibres; Properties, Textile and Clothing - Education, Research, Production*, Sofia 2004
- [12] Grégr J., Schejbalová H., Maršálková M.: *Modely struktury a vlastností polymerů, Modelování ve výuce chemie*, Sborník přednášek mezin. semináře, edit. K. Myška, Gaudeamus Hradec Králové 2005, (ISBN 80-7041-463-4)
- [13] Grégr, J. - Maršálková, M. - Slavík, M.: *Možnosti využití molekulárního modelování pro studium a predikce parametrů kompozitních materiálů*, mezinárodní konference Vyztužené plasty 2005, Karlovy Vary 25.-27.5.2005, DT Plzeň, sborník (ISSN 1214-6412)
- [14] Grégr J., Maršálková M., Slavík M.: *Prediction of electrical properties of polymers*, 4th Central European Conference 2005, Fibre-grade polymers, chemical fibres and special textiles, 7-9 September 2005, Liberec, Book of abstracts (ISBN 80-7083-967-8)
- [15] Grégr J., Maršálková M., Slavík M.: *Textile Material Engineering and Computational Chemistry*, 4th Central European Conference 2005, Fibre-grade polymers, chemical fibres and special textiles, 7-9 September 2005, Liberec, Book of abstracts (ISBN 80-7083-967-8)
- [16] Maršálková M., Richter A., Odvárka J. *New measurements method of anisotropy electrical properties of fabrics with carbon fibres*. 3. Indo-Czech Textile Research Conference, Liberec 2004 (ISBN 80-7083-842-6)
- [17] Maršálková M., Richter A., Odvárka J. *Anisotropy of electrical properties of fabrics with carbon fibers*. AUTEX 2004, Roubaix -France (ISBN 2-9522440-0-6)

- [18] Maršálková M., Richter A. *Method of measurement anisotropy of electrical materials properties*. ITC&DC Dubrovnik - Croatia 2004 (ISBN 953-7105-05-9)
- [19] Grégr J., Maršálková M., Slavík M.: *Prediction of fibre-grade polymers properties*, Strutex 2006, Technical University of Liberec (ISBN 80-7372-135-X)
- [20] Maršálková M., Mazal M., Militky J.: *Textile Fabric Electrical Conductivity Changes due to Simulated Wearing*, International fiber conference 2006, Seoul, Korea, (ISBN 89-953858-0-4)

7. Literatura

- [2] Haňka, L: *Teorie elektromagnetického pole* (SNTL – Praha 1982)
- [3] Meissner, B.: *Fyzika polymerů* SNTL PRAHA, 1982]
- [12] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: *Fyzika, Část 3: Elektřina a magnetismus*, Nakladatelství Vutium Brno a Prométheus Praha, 2003, ISBN 80-214-1868-0)
- [25] RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.: *Elektrická vodivost dvousložkových kompozitních materiálů v oblasti prahu perkolace* (Habilitační práce, Brno 2004) ISBN 80-214- 2617-9
- [36] Charles Kittel: *Úvod do fyziky pevných látek*, Academia, Praha, 1985
- [49] <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Software/ART1779-Simulujeme-v-programu-Femlab.html> 7.3. 08
- [53] Meloun, M. – Militký, J.: *Statistické zpracování experimentálních dat*, Praha, 2004
- [58] ČSN EN 61340-5-1: *Ochrana elektrostaticky citlivých součástek před elektrostatickými jevy – Všeobecné požadavky*
- [80] Clingerman M. L., King J. A., Schulz K. H., Meyers J. D.: *Evaluation of Electrical Conductivity Models for Conductive Polymer Composites*, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 83, 1341–1356 (2002), © 2002 John Wiley & Sons, Inc.; DOI 10.1002/app.10014
- [81] Jyh-Ming Ting, Kuo-Wei Chen: *Electrical conductivity of discontinuous filament-reinforced unidirectional composites*, *J. Mater. Res.*, Vol. 15, No. 4, Apr 2000, p. 940 - 943

8. Summary

This doctoral thesis deals with method evaluation of electric properties of textiles with inweave antistatic fibers.

There were measured surface resistivity and volume resistivity (range of testing voltage 5 ÷ 500 V) on set of fabrics with different distance of antistatic fibers in direction both parallel warp and parallel to weft. These measurements were carried out on condition with different air humidity, because air humidity is very important feature for final electric properties of fabrics. During the measurements of tested fabrics was proved a big anisotropy of electric properties. This various anisotropy was also examined by methods, which are different from standards using in the Czech Republic for evaluation of electric properties of fabrics.

The measurement of individual yarns lengths resistivity proved that the anisotropy is not caused by different antistatic fibers conductivity. Current standardized methods and evaluation of electric properties of antistatic fabrics are insufficient for identification and anisotropy description of fabric electric properties. Within the frame of this work there was designed a device for measurement of anisotropy of electric fabric properties. Its functionality was verified. The device together with measurement's method was patented.

Based on the practical results by means of Femlab[®] there were simulated electric properties of fabrics. Femlab[®] generates graphically position of electrical fields and their deformation influenced by inweaved antistatic fiber. Geometrical parameters of tested fabrics (i.e. stick out area antistatics fiber on fabrics surface, maximal and minimal Ferets diameters of this area) were measured with using of image analyses Lucia G. These parameters were applied in Femlab[®] calculation.

Vydala Textilní fakulta, Technické univerzity v Liberci
jako interní publikaci pod pořadovým číslem
DFT/16/2008 v počtu 20 výtisků