

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Elektrické propojovací struktury v chytrých textiliích a
jejich spolehlivost**

Plzeň 2015

Bc. Viktor Levora

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Viktor LEVORA**
Osobní číslo: **E13N0017P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Elektrické propojovací struktury v chytrých textiliích a jejich spolehlivost.**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou propojení elektronických obvodů v chytrých textiliích.
2. Charakterizujte základní technické parametry propojovacích struktur, které jsou rozhodující pro jejich provozní spolehlivost.
3. Navrhněte testovací vzorky vybraných propojovacích struktur.
4. Proveďte potřebná měření na vzorcích s cílem zjištění jejich provozní spolehlivosti.
5. Zhodnoďte výsledky měření s ohledem na jejich praktické využití v návrhu a výrobě chytrých oděvů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

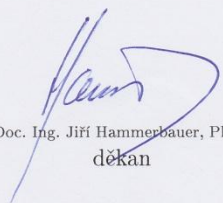
1. Soubor norem Elektrostatika ČSN EN 61340.

2. Elektronické informační zdroje,


klíčová slova: intelligent textile systems, wearable microsystems, flexible interconnections

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Šíma**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. V první části bylo cílem představit inteligentní textilie se zaměřením na elektrické propojovací struktury, zmapovat aktuálně používané technologie propojování prvků v inteligentních textiliích a stanovit parametry relevantní pro testování spolehlivosti. V druhé části práce je uvedeno samotné testování daných parametrů a stanovení hodnot, při kterých je možné testovaný prvek prohlásit za spolehlivý.

Klíčová slova

inteligentní textilie, e-textil, spolehlivost

Abstract

Thesis is divided into two main parts. In the first part there is introduction of intelligent textile with an aim to electrical conductors, mapping of currently used technologies and assessment of parameters which are relevant in reliability testing. In second part there is testing of said parameters and assessment of values which must be met to say, that the tested subject is reliable.

Key Words

intelligent textile, e-textile, reliability

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 11.5.2015

Bc. Viktor Levora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi v průběhu práce poskytli cenné profesionální rady a připomínky.

Obsah

Obsah.....	8
Úvod.....	10
Seznam symbolů a zkratk.....	11
1 Inteligentní textilie	12
1.1 Pasivní IT.....	12
1.2 Aktivní IT	13
1.3 Super inteligentní textilie.....	13
1.4 Materiály používané pro IT	14
2 Elektrické propojovací struktury	15
2.1 Vodiče.....	15
2.1.1 Vodivá příze	15
2.2 Konektory	17
3 Parametry propojovacích struktur	18
3.1.1 První skupina parametrů.....	19
3.1.2 Druhá skupina parametrů	20
4 Testovací vzorky	22
4.1 Vodivé příze	22
4.2 Vodivý tkaloun	23
4.3 Vodivá příze všitá do textilie.....	23
5 Testování parametrů.....	24
5.1 Vodivá příze	24
5.1.1 Výsledky měření	25
5.2 Vodivý tkaloun	27
5.2.1 Výsledky měření	28
5.3 Vodivá příze všitá do textilie.....	28

5.3.1	Měření elektrického odporu, výsledky měření.....	29
5.3.2	Měření proudového zatížení, výsledky měření	32
5.3.3	Měření proudového zatížení (teplotní závislost na proudu), výsledky měření ..	33
5.3.4	Proudové zatížení (náchylnost na chemické vlivy), výsledky měření	35
5.3.5	Mechanické namáhání, výsledky měření	37
6	Zhodnocení měření spolehlivosti	39
6.1	Vodivá příze	39
6.2	Vodivý tkaloun	40
6.3	Vodivá příze všitá do textilie.....	41
6.3.1	Měření elektrického odporu	41
6.3.2	Měření proudového zatížení.....	42
7	Závěr.....	45
	Použitá literatura	47

Úvod

Inteligentní textilie vznikly na základě vývoje vláken z důvodu nahrazení a vylepšení tradičních přírodních vláken novými syntetickými vlákny vyrobenými z ropy. Syntetická vlákna jsou cíleně vyvíjena podle specifických požadavků. Přidáním aditiva do polymerních řetězců syntetických vláken vznikají inteligentní textilie.

Elektrotechnika prošla stejně jako textilie velkým vývojem. V současné době je soustředěna pozornost na větší miniaturizaci elektronických součástek tak, aby mohly být vyvinuty ještě dokonalejší výrobky a následně i e-textilie.

Cílem práce je zmapování problematiky inteligentních textilií a elektrických propojovacích struktur a stanovení parametrů, které jsou klíčové pro zajištění spolehlivosti propojení. Poslední částí práce je testování těchto parametrů a stanovení hodnot u jednotlivých parametrů, které musí propojení splňovat, aby bylo možné říci, že je spolehlivé.

Parametry jsou zvoleny s ohledem na běžné inteligentní textilie i na textilie do extrémních podmínek. Konkrétně se jedná o kombinézy hasičských záchranných sborů.

Seznam symbolů a zkratk

IT - inteligentní textilie

SITF - smart interactive textile fabrics - super inteligentní textilie

EMP - elektromagnetický puls

PES - polyester

tex - jednotka označující jemnost příze

1 Inteligentní textilie

Inteligentní textilie (IT) jsou textilie, které reagují na okolní podněty a prostředí kolem nich. IT se objevují v celé řadě oborů včetně fyziky, chemie, biologie, elektrotechniky, farmacie, informatiky a mnoha dalších. Dále pak lze IT použít jako nosiče, protože se dají spojit jednoduše šitím, lehce se udržují a mají nízkou hmotnost. Díky tvárnosti textilií dochází k posunu od konvenčních textilií k funkčním až k inteligentním textiliím, které lze označit jako "smart" textilie.

To, že textilie plní v dnešní době různé funkce, je dnes již považováno za standard. Tyto funkce se realizují v co největší míře v jednom materiálu. Jedna tkanina je schopna přenášet a akumulovat teplo, nepropouštět vodu, propouštět vzduch a zároveň odvádět vlhkost pryč z povrchu těla, je nehořlavá, má antistatické i antibakteriální vlastnosti. Požaduje se vysoká pevnost při zachování komfortu. V rámci základních vlastností konkrétní tkaniny je využíváno např. pevnosti, pružnosti a dalších vlastností.

1.1 Pasivní IT

První generaci IT tvoří textilie, které pouze reagují na vnější podněty, ale ještě s těmito podněty nedokážou pracovat. Patří sem materiály, které fungují jako čidla nebo indikátory stavu okolí. Jako příklad jsou uváděna optická vlákna, která přenáší světelný signál a zároveň jsou citlivá na vyšší úrovně chemikálií, tlak, elektrický proud, magnetické pole apod.

Jednotlivé vlastnosti pak mohou pracovat jako celek v případě, že jsou všechna "čidla" napojena na centrální vyhodnocovací systém. Nejběžnějšími vlastnostmi jsou ochrana proti tepelným výkyvům, ventilace vzduchu a vodní páry.

1.2 Aktivní IT

Tento druh IT, označovaný jako druhá generace, již kromě čidel obsahuje i akumulátory. Díky tomu již mohou na změny prostředí IT reagovat. Tato reakce je buď přímá nebo zprostředkována centrální řídicí jednotkou, na kterou jsou pak napojeny další prvky (čidla).

Do této skupiny IT se řadí například textilie měnící barvu, textilie s tvarovou pamětí, textilie odolné proti vodě, nepropustné páru, generující teplo a inteligentní membrány.

Aktivní IT nyní v největší míře používají vojenské a záchranné složky.

Tyto látky jsou schopné reagovat na extrémní klimatické podmínky a dále pak identifikovat látky v okolí, jako například bakterie, plyny a další. V neposlední řadě jsou tyto látky schopné detekovat radiaci.

Ve velkém množství se aktivní IT používají i v oblasti technických textilií. Zde se pak označují jako inteligentní filtrační tkaniny, kde mohou tyto látky fungovat jako molekulární síta nebo odsolovače mořské vody. V lékařství se mohou používat pro dávkování léčiv nebo pro diagnostiku stavu uživatele.

1.3 Super inteligentní textilie

Super inteligentní textilie, SITF (smart interactive textile fabrics), neboli chytré interaktivní textilní látky, elektronické textilie nebo častěji e-textilie, toto jsou vše synonyma pro IT třetí generace.

IT třetí generace jsou schopny, tak jako druhá generace, vyhodnotit vnější podněty a reagovat na ně. Dalším krokem ve vývoji je i schopnost upravit své vlastnosti a funkci.

Super inteligentní nebo také silně inteligentní textilie vždy obsahují řídicí jednotku, která obsahuje rozeznávací a vyhodnocovací schopnosti vnějších podnětů a následně algoritmy, které určují, jak má látka na dané vnější podmínky reagovat.

IT třetí generace se skládají z pěti základních prvků. Jsou to: senzory, akční členy (aktuátory), kontrolní jednotky, paměťové jednotky a komunikace, resp. vodiče a propojovací struktury.

Super inteligentní textilie dělíme do tří generací podle doby vývoje:

1. generace

Již existující zařízení přidaná do textilie, která jsou propojena standardními vodiči nebo vodivými polymery. Takto byla do textilií přidána zařízení jako mikrofon, MP3 přehrávač, mobilní telefon nebo GPS.

2. generace

Elektrické funkce integrované do textilií. Zde nejsou hotové výrobky integrovány do textilie.

3. generace

Vlákna s integrovanou mikroelektronikou. Tato generace bude v budoucnu rozvíjena.

Nové druhy vláken, textilních materiálů a nové součástky dovoluují vytvářet nové inteligentní textilie specifické pro dané prostředí a druh využití. Vývoj již není orientován pouze na extrémní podmínky, jako jsou obleky kosmonautů nebo záchranných složek, ale i na komerční použití IT, jako je například IT pro běžce měřící srdeční tep, teplotu, atd.

1.4 Materiály používané pro IT

To, co obecně z látky dělá látku inteligentní, jsou aditiva. Jsou to látky, které upravují vlastnosti tkaniny tak, aby splňovala požadované vlastnosti. Aditiva jsou většinou částice kovů.

Druhou možností, jak upravit vlastnosti látky, jsou mikrokapsule. Zde mají aktivní látky svůj obal. Velikost mikrokapsule se pohybuje v řádech mikrometrů.



Obrázek 1 - Rozdíl mezi aditivem a mikrokapsulí (převzato z [6])

Samotná látka je složena z polymerních řetězců. Polymery záměrně nemají kruhový průřez za účelem zlepšení vlastností celé IT.

Mezi materiály označované jako inteligentní patří: piezoelektrické materiály, elektrostrikční materiály, elektoreologické materiály, magnetoreologické materiály, termoresponzivní materiály, pH citlivé materiály, UV citlivé materiály, chytré polymery, inteligentní gely, inteligentní katalyzátory a slitiny s tvarovou pamětí.

[1] [2] [6] [7]

2 Elektrické propojovací struktury

S elektrickými propojovacími strukturami se setkáváme v e-textiliích. Elektrickou propojovací strukturou rozumíme vodič, který je použit pro propojení jednotlivých prvků v IT, a také způsob nebo technologie provedení konektoru s vnější řídicí jednotkou (konektor). Možností provedení vodičů a konektorů nebo podobných propojení máme několik. Tyto způsoby propojení se pak liší svou spolehlivostí a dalšími parametry. Způsob propojení, který pro danou aplikaci vybereme, záleží na vlastnostech, které od látky očekáváme.

2.1 Vodiče






Jednoznačně nejdůležitější vlastností elektrického vodiče je jeho elektrická vodivost, tedy vlastnost vést volné částice, zpravidla elektrony, nesoucí elektrický náboj. Elektrický vodič lze definovat jako látku s elektrickým odporem řádově 10^{-6} až 10^{-8} Ωm . Další požadované vlastnosti jsou dobrá tepelná vodivost, mechanické a technologické vlastnosti.

Vodiče v případě inteligentních textilií musí kromě základních vlastností splňovat i další kritéria. Cílem je, aby se vlastnosti vodiče přiblížily obecným vlastnostem tradiční látky. Kompletní e-textilie by si měla zachovat vlastnosti jako ohebnost, roztažnost a omyvatelnost a zároveň si udržet dobré elektrické vlastnosti vodivých propojení.

2.1.1 Vodivá příze

Propojení je nejčastěji realizováno speciální vodivou přízí (obr. 2). Vodivá příze je čistě kovová, nebo kombinací kovu a textilie. Čistě kovová příze je vyráběna tažením za

tepla Taylorovým procesem a je pevnější. Příkladem kombinovaného vodiče jsou vodivá vlákna PANI. Toto vlákno je tvořeno polymerem lycry s přísádkem bavlny, který je pokryt polyanilinem a polypyrolinem a více se blíží vlastnostem tradiční látky. Použitelnost přize pro danou aplikaci určuje poměr vodivého a nevodivého materiálu. V tabulce č. 1 můžeme vidět několik patentovaných technologií předení vodivé přize.

	Verstraeten	Dhawan	Cottet	Post	Watson
Conductive Part (# of Strand)	Copper (1)	Copper (28)	Copper (1)	Steel (spun 20%)	Steel (4)
	d=148 μm	d=70 μm	d=40 μm	Not Known	d= 35 μm
Non-conductive Part (# of Strand)	Steel (3)	-	Polyester	Polyester (80%)	Polyester (1)
	d=12 μm \times 275		150.3 denier	4.5 denier	600 denier
Structure (Location of conductive material is described in darker colors)					
Twist Density (tpm)	Z100	Not Known	Not Known	Not Known	S350 & Z350
Resistance (Ω/m)	1.2	0.2441	15.7 – 17.2	~5,000	180

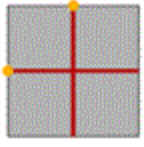
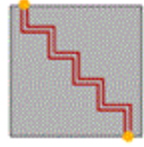
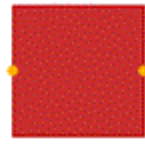
References

1. Verstraeten, S., J. Pavlinec, and P. Speleers, "Electrically Conductive Yarn Comprising Metal Fibers," U.S. Patent No. 6,957,525 (2005), assigned to N.V. Bekaert S.A.
2. Dhawan, A., T.K. Ghosh, and A.M. Seyam, "Fiber-based Electrical and Optical Devices and Systems," Textile Progress monograph series, Manchester: The Textile Institute, 2004.
3. Cottet, D., et al., "Electrical characterization of textile transmission lines," IEEE Transactions on Advanced Packaging 26 (2), 2003: 182-190.
4. Post, R., et al., "E-broidery: Design and Fabrication of Textile-based Computing," IBM Systems Journal, 39 (3/4) 2000: 840-860.
5. Watson, D.L., "Electrically Conductive Yarn," U.S. Patent No. 5,927,060 (1999), assigned to N.V. Bekaert S.A.

Tabulka 1- Různé technologie předení vodivé přize (převzato z [9])

Pro určení celkového elektrického odporu je důležitý způsob vsítí vodivé přize do samotné tkaniny. Přize může být do látky vetkána, všita, vyšita nebo vpletena. Každá z uvedených technologií má jiné elektrické vlastnosti. Příklady implementace přize do látky jsou uvedeny v tabulce 2. Další možností, jak zlepšit elektrický odpor, je pájené propojení vodivých cest.

[6][9]

	Dhawan	Linz	Post	Rattfalt
Conductive Yarn	Copper filaments	Silver coated polyamide	Steel spun	Steel filaments
	d=70 μm /28	11.7 tex/17 \times 2	40 tex	275 tex \times 2
Original Yarn Resistance (Ω/m)	0.2441	500	\sim 100	15
Fabric Substrate	Polyester plain weave	Stretch knit	Not Known	-
Integration Structure	Woven	Two sewn paths	E-broidered path	Knitted
Measurement Traces and Points			-	
Measurement Remarks	Welded at yarn intersections	Sewn three times in zigzag shape	Steel + polyester spun covering yarn	Measured on human skin
Final Trace Resistance (Ω/m)	0.25-0.50	\sim 25	Not Known	\sim 4,000,000

- References
1. Dhawan, A., T.K. Ghosh, and A.M. Seyam, "Fiber-based Electrical and Optical Devices and Systems," Textile Progress monograph series, Manchester, U.K.: The Textile Institute, 2004.
 2. Linz, T., et al. "Fully Integrated EKG Shirt based on Embroidered Electrical Interconnections with Conductive Yarn and Miniaturized Flexible Electronics," International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, Proceedings, Boston, 2006.
 3. Post, R., et al., "E-broidery: Design and Fabrication of Textile-based Computing," IBM Systems Journal, 39 (3/4) 2000: 840-860.
 4. Rattfalt, L., et al., "Electrical characteristics of conductive yarns and textile electrodes for medical applications," Medical and Biological Engineering and Computing 45 (12) 2007: 1251-1257.

Tabulka 2 - Způsoby implementace vodivé příze do látky (převzato z [9])



Obrázek 2 - Vodivá příze (převzato z [2])

2.2 Konektory

Druhou součástí propojovacích struktur jsou konektory. Ty slouží k propojení samotných vodivých cest s vnějším zařízením, např. řídicí nebo měřicí jednotkou. Tato propojení jsou standardně realizována pomocí klasických cvočků nebo speciálních

konektorů viz obr. 4. [6]



Obrázek 3 - konektory pro propojení v IT (převzato z [6])

3 Parametry propojovacích struktur

Níže uvedené parametry propojovacích struktur jsou vybrány s ohledem na spolehlivost celého systému IT v době návrhu.

"Spolehlivost se definuje jako obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek. Spolehlivost je komplexní vlastnost, která zahrnuje dílčí spolehlivostní vlastnosti, jako např. bezporuchovost, životnost, udržovatelnost, skladovatelnost a jiné vlastnosti." [14]

Dále je uvedeno několik základních pojmů a definic týkajících se problematiky spolehlivosti.

"Prvek je samostatně uvažovaná část objektu."

"Systém (soustava) je souhrn vzájemně spjatých prvků určených k plnění předepsaných funkcí."

"Porucha je jev spočívající v ukončení provozuschopného stavu objektu."

"Provozeroschopný stav je stav objektu, ve kterém je objekt schopen plnit (nebo plní) stanovené funkce a dodržuje hodnoty stanovených parametrů v mezích, stanovených technickou dokumentací."

"Bezpečnost je vlastnost objektu neohrožovat lidské zdraví nebo životní prostředí při plnění předepsané funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek."

Bezporuchovost je schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek. Číselně se vyjadřuje např. pravděpodobností bezporuchového provozu v daném intervalu, intenzitou poruch, střední dobou bezporuchového provozu apod." [14]

Aby mohly být stanoveny parametry, na základě kterých budeme stanovovat spolehlivost propojovacích struktur, je potřeba říci, pro jaké činnosti a v jakém prostředí bude IT používána. Je rozdíl, pokud mluvíme o tričku, které je schopné monitorovat tepběžce nebo o hasičské kombinéze používané v extrémních podmínkách.

Parametry jsou rozděleny do dvou skupin. První skupina parametrů obsahuje vlastnosti běžně nošených IT, jako jsou trička na sport, bundy, helmy, atd. Druhá skupina parametrů obsahuje vlastnosti IT textilií určených do extrémních podmínek, jako jsou například kombinézy hasičských záchranných sborů.

[14][15]

3.1.1 První skupina parametrů

Elektrická vodivost / Elektrický odpor

Jednoznačnou vlastností elektrických propojovacích struktur je schopnost vést elektrický proud. Elektrický odpor je u vodivých přízí stanoven v Ω/m a cílem je, aby byla jeho hodnota co nejnižší. Tento parametr je u propojovacích struktur základní. Výsledek každého testu je vždy rozhodnut na základě toho, zda je prvek v provozuschopném stavu.

Mechanická pevnost

S ohledem na to, že testujeme propojovací struktury v textiliích, je potřeba respektovat jejich základní vlastnosti, a to ohebnost a pružnost. Zde musí vodič projevit dostatečnou životnost co se týče opakovaného ohýbání, případně pevnosti v tahu u strečových materiálů.

I konektor musí splňovat určité parametry, nesmí například docházet k samovolnému uvolnění nebo vypadnutí konektoru.

Omyvatelnost

Pokud se nejedná o výrobek na jedno použití, nesmí být propojovací struktura náchylná na vnější chemické vlivy. Omyvatelnost souvisí se schopností IT odolat kromě

mechanického namáhání při praní také vlhkosti, pracím prostředkům a relativně vysoké teplotě. Z tohoto důvodu se v IT téměř nevyužívá měď, která rychle podléhá korozi.

V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty elektrického odporu vodivých přízí po daném počtu pracích cyklů. Z tabulky jasně vyplývá, že mokré čištění značně zhoršuje elektrické vlastnosti. Naopak suché čištění má na tyto vlastnosti minimální vliv.

	Cho	Cho	Slade	Slade
Material	Cu/Ni plated polyester	Cu/Ni plated polyester	Ni/Cu/Ag plated yarn	Ni/Cu/Ag plated yarn
Structure	Ripstop	Mesh	Woven Ribbons	Woven Ribbons
Washing Type	Machine wash	Machine wash	Machine wash	Dry cleaning
Initial Resistance (Ω/cm^2)	0.035	0.097	~ 0.0040	~ 0.0032
Resistance after 10 cycles (Ω/cm^2)	0.062	5.063	~ 0.0037	~ 0.0042
Resistance after 50 cycles (Ω/cm^2)	N/A	N/A	~ 0.0090	~ 0.0057

- References
1. Cho, J., et al., "Design and Evaluation of Textile-based Signal Transmission Lines and Keypads for Smart Wear," 12th International Conference on Interaction Platforms and Techniques, Proceedings: 1078-1085, Beijing, 2007.
 2. Slade, J., et al., "Washing Electrotexiles," Materials Research Society Fall Session Symposium D3.1, Boston, 2002.

Tabulka 3 - Hodnoty elektrického odporu před a po vyprání (převzato z [9])

Proudová zatížitelnost

Dalším z důležitých parametrů je proudová zatížitelnost propojovacích struktur. Na to, jaké hodnoty elektrického proudu budou v systému IT procházet, je třeba brát ohled již při návrhu celého systému. Tento parametr je uveden hlavně z důvodu bezpečnosti. Při špatně dimenzovaných vodičích nehrozí v systému pouze porucha, ale je ohroženo i zdraví uživatele.

3.1.2 Druhá skupina parametrů

Tepelná odolnost

V extrémních teplotách dochází u látek k teplotní roztažnosti. Cílem testu je stanovit, do jaké teploty je přípravek schopen si zachovat základní vlastnost, a to

elektrickou vodivost.

V aplikaci hasičské kombinézy je možné vodivé prvky ukrýt do vnitřních vrstev látky, tím budou vodiče chráněny proti extrémním teplotám již samotnou nehořlavou látkou.

Chemická odolnost

V extrémních podmínkách jsou IT vystaveny i jiným vnějším vlivům než jen pot. Proto je potřeba stanovit, zda je zařízení schopné funkce i po dlouhodobém vystavení chemikáliím jako je benzín, kyseliny a další.

Odolnost vůči EMP

Dalším testovatelným parametrem je náchylnost na elektromagnetický impuls neboli EMP. Testované vodiče totiž mohou fungovat jako anténa a pokud jsou vystaveny elektromagnetickému impulzu, může se na nich naindukovat vysoké napětí. To může mít za následek poškození elektrického zařízení nebo v horším případě i újmu na zdraví uživatele.

Elektrická pevnost izolace

Z předchozí metody je zřejmé, že může dojít k naindukování vysokého napětí na vodičích IT. Proto je potřeba testovat i izolaci těchto struktur, aby mohlo být s jistotou stanoveno, že celá IT není nebezpečná pro zdraví člověka.

Vysokofrekvenční rušení

Při velkém množství propojovacích cest a specifickém umístění mohou vodivé cesty připomínat sběrnici. Ta je pak náchylná na vysokofrekvenční rušení. Pokud je měřicí nebo vyhodnocovací člen citlivý, může dojít k nesprávnému vyhodnocení. Proto je potřeba stanovit, že je zařízení schopné funkce i v silném elektromagnetickém poli.

4 Testovací vzorky

4.1 Vodivé příže

Vodivé příže (viz kapitola 2.1.1) jsou první skupinou testovaných vzorků. Na obr. č. 4 je vidět jeden z měřených vzorků. Testované vzorky se lišily materiálem vodivé cesty, počtem vodivých vláken a celkovým průměrem.

Ve větší části měřených vzorků byla vodivým materiálem mosaz. V menším měřítku byl zastoupen monel, tedy sloučenina niklu a mědi. V některých případech bylo společně s mosazí použito vlákno silver.STAT, neboli stříbrné vlákno.

Monel je používán pro svou výbornou odolnost vůči korozi. V případě měřených vzorků se jedná o monel 1.4301. [10][11]

Průměr přízí byl buď 0,02, nebo 0,03 mm. Počet vodivých vláken se pohyboval v rozmezí od jednoho do osmi vláken.

U jednotlivých přízí byl měřen elektrický odpor jednoho metru nitě, proudové zatížení a také vizuální změny způsobené teplem při průchodu elektrickým proudem. Elektrický odpor byl pak porovnáván s hodnotami dodanými výrobcem.

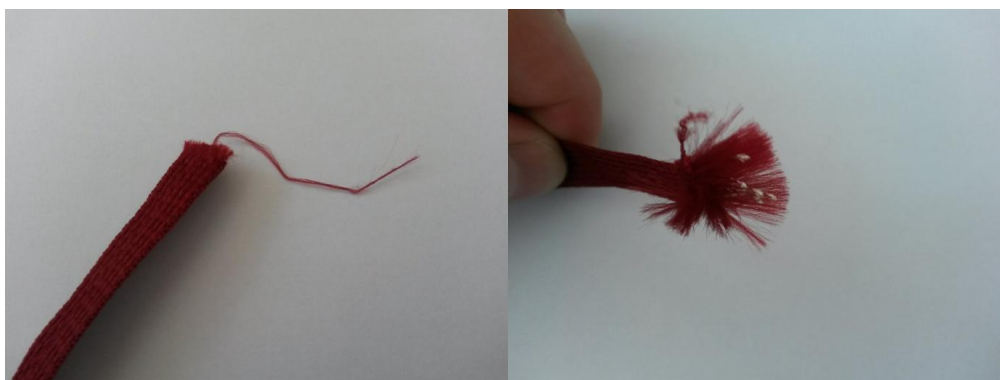


Obrázek 4 - Vodivá příže

4.2 Vodivý tkaloun

Dalším z testovaných vzorků je vodivý tkaloun (obr. č. 5). Na první pohled ploché lano obsahuje po rozpletení 6 vodivých a jednotlivě elektricky izolovaných vodičů typu lanko.

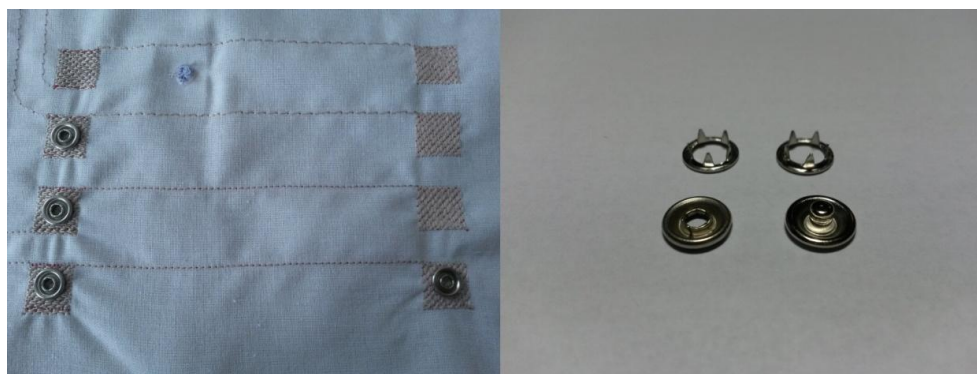
Izolaci je možné odstranit vystavením obnaženého vodiče teplotě přibližně 350 °C. Poté bylo možné, stejně tak jako u vodivé příze, měřit odpor jednotlivých cest, proudovou zatížitelnost a vizuální změny testovaného vzorku. Vodivý tkaloun byl 1,15 cm široký a 0,75 mm tlustý. Jednotlivá vodivá vlákna měla průměr 0,2 mm.



Obrázek 5 - vodivý tkaloun (vlevo), po rozpletení (vpravo)

4.3 Vodivá příze všíta do textilie

Posledním druhem testovaných vzorků byla vodivá příze již vyšíta do látky (obr. č. 6 vlevo). Na tomto vzorku bylo kromě samotných vodivých cest možné vyzkoušet a otestovat i další z klíčových propojovacích struktur, a to konektory. V tomto případě realizované pomocí druků. (obr. č. 6 vpravo)



Obrázek 6 - vodivá příze vyšíta do látky (vlevo), druky (vpravo)

5 Testování parametrů

5.1 Vodivá příze

Vodivá příze, určená pro všíť do tkaniny, není samostatně finálním produktem, proto byla testována pouze z hlediska provozuschopnosti prvku. Měřen byl u přízí elektrický odpor a proudová zatížitelnost.

Jednotlivé vlákno vodivé příze bylo vždy nataženo do speciální dřevěné konstrukce, která zajišťovala snadné upnutí měřeného vzorku a připojení sond pro měření elektrického odporu a dále elektrod proudového zdroje. Konstrukce zároveň zajistila, že bude vzorek vždy měřit 1 m. Díky tomu nebylo nutné odečtenou hodnotu elektrického odporu dále přepočítávat pro získání jednotek Ω/m .

Měření proudové zatížitelnosti bylo úzce spjato s vizuální a čichovou kontrolou vzorku. Na upevněný vzorek byl vždy přiveden stejnosměrný elektrický proud a postupně zvyšován. Pokud došlo k nějaké změně zaznamenané zrakem nebo čichem, byla tato hodnota zaznamenána.

Při naprosté většině měření byl vždy prvním projevem zápach. Ten je způsoben tavením polyesterového vlákna jouleovými ztrátami ve vodiči. Tento jev nebyl zpravidla doprovázen okem pozorovatelnými změnami ve struktuře vodiče. Hodnota proudu, který způsobil tento jev, se podle druhu vodivé příze pohybovala mezi 0,27 - 1,22 A.

Druhý jev, doprovázející zvyšování elektrického proudu, byl již viditelný. U některých druhů přízí se jednalo o tavení PES vlákna. Tento projev je vždy doprovázen patrně viditelným a nepříjemně zapáchajícím kouřem. Hodnoty tavení PES vlákna se pohybovaly v rozmezí 0,85 - 1,37 A.

U přízí s vodivým vláknem z mosazi nebo mosazi a stříbra, a zároveň s vyšším počtem vodivých vláken, docházelo k viditelnému protažení příze. Tento jev byl způsoben teplotní roztažností kovové cesty. Po odpojení od proudového zdroje, případně snížení hodnoty procházejícího elektrického proudu, docházelo vždy k ochlazení a následnému zkrácení vodivé příze. K prohybu u daných vodivých přízí docházelo při proudovém zatížení 0,6 - 1,53 A.

Posledním a jasně viditelným projevem procházejícího proudu bylo přetavení vodivé cesty. Ve všech případech, kromě jednoho typu příze, který neobsahuje PES vlákno, byla v době přetavení vodivé cesty již tepelně zničena polyesterová příze, a tak

došlo k viditelnému rozpojení obvodu.

V tabulkách 4a, 4b a 5 je u jednotlivých vzorků uvedena i jednotka tex neboli jemnost příze. Tato jednotka představuje hmotnost 1 kilometru příze v gramech.

5.1.1 Výsledky měření

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách č. 4a a 4b. Ze třech naměřených hodnot je uváděn aritmetický průměr. Jednotlivé projevy jsou v tabulkách označeny takto:

I_1 - proud, při kterém byl poprvé zaregistrován zápach páleného PES vlákna

I_2 - proud, při kterém tepelné ztráty způsobily vytavení PES vlákna

I_3 - proud, při kterém byl vizuálně zaregistrovaný pohyb nebo protažení vlákna

I_{max} - proud, při kterém došlo k přerušení obvodu důsledkem přetavení vodiče

	Vz. č. 25A 31% PES/69%mosaz; 72 tex; 8x drát	Vz. č. 26A 31% PES/ 69% mosaz; 54 tex; 6x drát	Vz. č. 28A 48% PES/ 52% mosaz; 71 tex; 6x drát
R [Ω]	7,67	9,93	10,07
I_1 [A]	0,46	1,15	0,71
I_2 [A]	1,35	1,33	1,24
I_3 [A]	1,50	1,77	1,27
I_{max} [A]	1,76	1,77	2,13
	Vz. č. 29A 48% PES/52%mosaz; 48 tex; 4x drát	Vz. č. 30A 48% PES/ 52% mosaz; 36 tex; 3x drát	Vz. č. 30C 42% PES/ 23% mosaz/ 35% silveR.Stat; 54 tex; 2x drát
R [Ω]	14,93	19,60	29,67
I_1 [A]	0,50	0,36	0,30
I_2 [A]	0,90	-	0,46
I_3 [A]	0,99	-	-
I_{max} [A]	1,08	0,77	0,60
	Vz. č. 31A 65% PES/ 35% mosaz; 53 tex; 3x drát	Vz. č. 31C 34% PES/ 38% mosaz/ 28% silveR.Stat; 66 tex; 4x drát	Vz. č. 32C 23% PES/ 51% mosaz/ 26% silveR.Stat; 72 tex; 6x drát
R [Ω]	20,23	15,40	9,87
I_1 [A]	0,46	0,46	0,76
I_2 [A]	-	0,85	1,21
I_3 [A]	-	-	1,36
I_{max} [A]	0,85	0,93	1,66

Tabulka 4a - Vodivé příze, proudové zatížení, naměřené hodnoty

	Vz. č. 32CI 23% PES/ 51% mosaz/ 26% silveR.Stat; 72 tex; 6x drát	Vz. č. 33C 25% mosaz/ 75% silveR.Stat; 50 tex; 2x drát
R [Ω]	9,90	77,40
I ₁ [A]	0,50	-
I ₂ [A]	1,17	-
I ₃ [A]	1,27	-
I _{max} [A]	1,56	0,51
	Vz. č. 34C 19% PES/ 20% mosaz/ 61% silveR.Stat; 62 tex; 2x drát	Vz. č. 36C 15% PES/ 34% mosaz/ 51% silveR.Stat; 74 tex; 4x drát
R [Ω]	30,57	15,20
I ₁ [A]	0,62	0,35
I ₂ [A]	-	0,96
I ₃ [A]	-	1,00
I _{max} [A]	0,62	1,33

Tabulka 4b - Vodivé příze, proudové zatížení, naměřené hodnoty

U dvou vzorků vodivých přízí nebylo možné proudové zatížení změřit. Proto jsou v tabulce č. 5 uvedeny pouze hodnoty odporů jednotlivých přízí uváděné výrobcem. Jedná se o příze s jedním kovovým vláknem. Ani při opatrné manipulaci nebylo možné přízi upnout do konstrukce bez porušení vodivé cesty. Proto ani hodnoty odporů nejsou potvrzeny.

	Vz. č. 4A 88% PES/ 12% Monel 1.4301; 27 tex; 1x drát	Vz. č. 7A 92% PES/ 8% monel 1.4301; 38 tex; 1x drát
R [Ω]	2729	2494

Tabulka 5 - Vodivé příze, hodnoty odporů

5.2 Vodivý tkaloun

Pro stanovení spolehlivosti byl u vodivého tkalounu nejprve měřen elektrický odpor jednotlivých cest a následně každá z cest proudově zatěžována. Jak je patrné z naměřených hodnot, vydržel vodivý tkaloun mnohonásobně (až 10-15x) vyšší proudové zatížení. Teplo vzniklé při vyšších hodnotách elektrického proudu způsobilo rapidní a markantní změny v PES struktuře a vzorku celkem (obr. č. 7). Test proudovým zatížením nebyl důležitý jen z hlediska provozuschopnosti, ale také bezpečnosti.

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.2, odstraňuje se izolace jednotlivých cest vysokou teplotou. Proto bylo po každém testu elektrickým proudem vyzkoušeno, zda nebyla elektrická izolace narušena. A následně přeměřen elektrický odpor.

Z obr. č. 7 je patrné, že natavením PES vlákna došlo ke zkrácení tkalounu. Proto byl tkaloun pro další měření upnut do stejné konstrukce jako vodivé příze.

Na rozdíl od vodivých přízí byla prvním zaregistrovatelným projevem průchodu elektrického proudu zvýšená teplota vodiče. Až následně bylo možné registrovat zápach, dále pak tavení PES a v poslední řadě úplné vytavení vodiče z tkalounu, jak je možné vidět na obr. č. 7.



Obrázek 7- Vodivý tkaloun, vodič po průchodu vysokého elektrického proudu

5.2.1 Výsledky měření

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 6. Pro přehlednost je ze šesti hodnot uveden pouze aritmetický průměr. Jednotlivé projevy jsou v tabulce označeny takto:

I_1 - proud, při kterém byla na dotek registrovatelná zvýšená teplota

I_2 - proud, při kterém byl poprvé zaregistrován zápach tavené PES (bez viditelné změny ve struktuře vláken), při tomto proudu byla teplota vodiče na dotek už nepříjemně vysoká

I_3 - proud, při kterém se z tkalounu začíná viditelně kouřit

I_4 - proud, při kterém je vzniklé ztrátové teplo natolik vysoké, že způsobilo vytavení vodiče z tkalounu

I_{\max} - proud, při kterém došlo k přerušení obvodu důsledkem přetavení vodiče

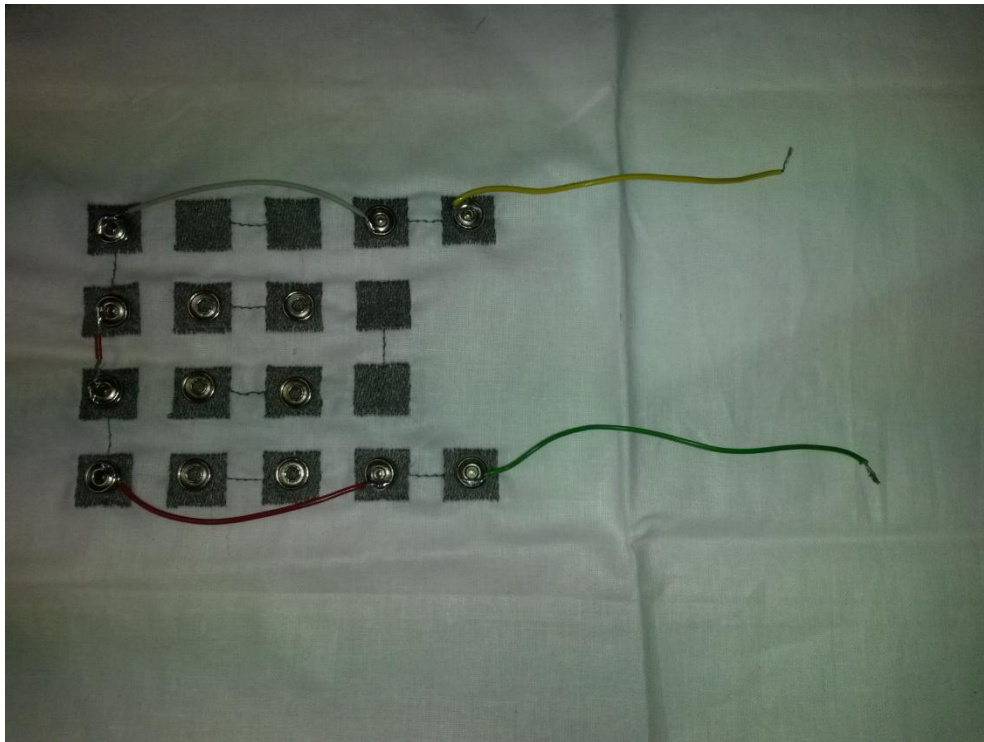
Projev	Průměr
R [Ω]	0,39
I_1 [A]	4,63
I_2 [A]	5,75
I_3 [A]	6,63
I_4 [A]	8,32
I_{\max} [A]	11,38

Tabulka 6 - Vodivý tkaloun, proudové zatížení, naměřené hodnoty

5.3 Vodivá příze všitá do textlie

Příze všitá do plátna nejpřesněji simuluje systém IT. Z hlediska spolehlivosti byly tyto vzorky, kromě měření odporu, zatěžovány proudově, mechanicky a chemicky.

Jedním ze dvou testovaných vzorků, kde je vodivá příze již všita do plátna, je vzorek zobrazený na obr. č. 8. Na obrázku je vidět zapojení daisy chain. Tento vzorek se však neukázal jako vhodný pro testování proudového zatížení z důvodu nízké odolnosti při průchodu elektrického proudu.



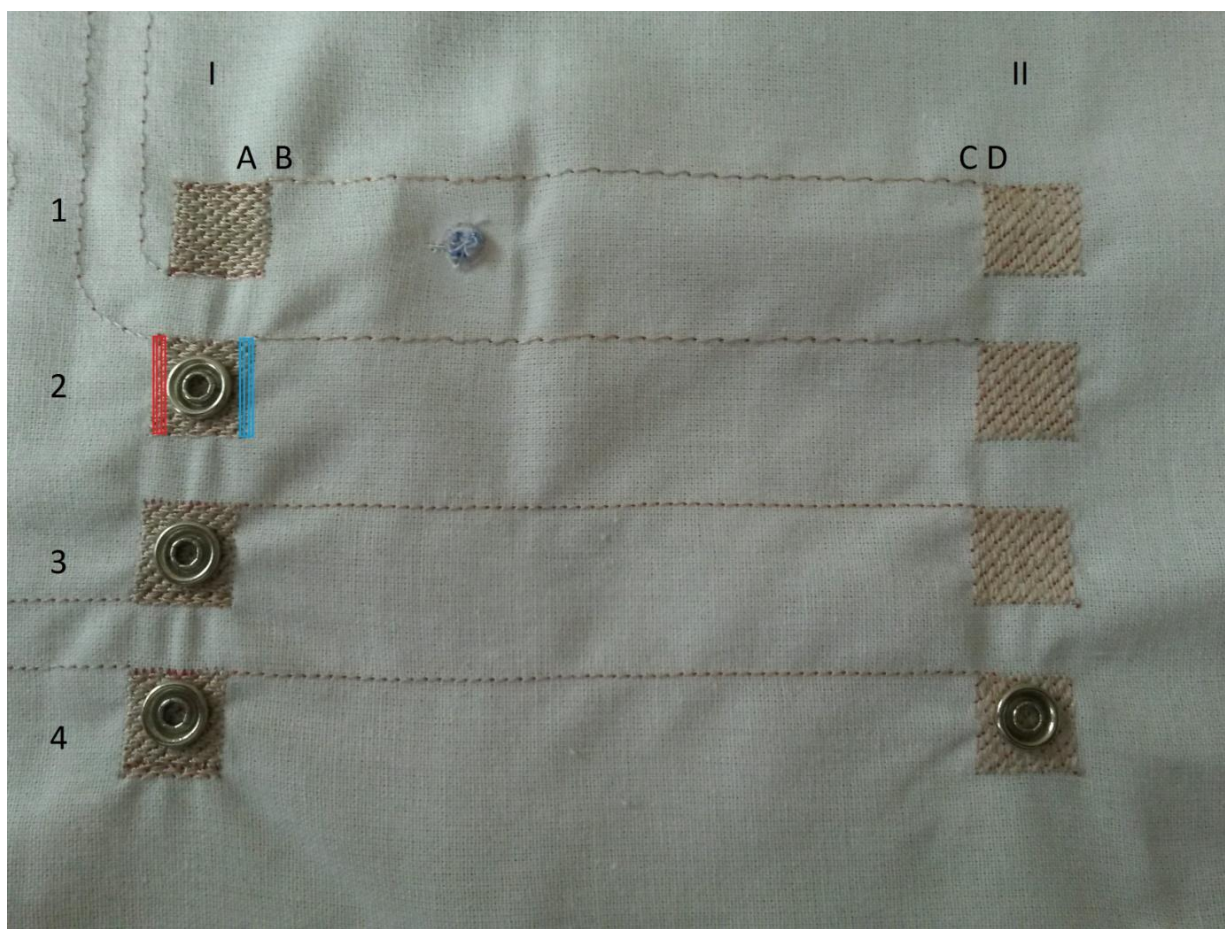
Obrázek 8 - Příze vetkaná do látky, zapojení daisy chain

Naproti tomu vzorek na obr. č. 6 vlevo se pro toto testování osvědčil lépe.

5.3.1 Měření elektrického odporu, výsledky měření

Testovaný vzorek vyobrazený na obr. 6 a 9 poskytuje svým vzorem širší spektrum možných měření. Jedním z důvodů je i to, že sloupec vyšitých plošek, označený na obr. 9 jako I, je prošit vodivou nití nejprve v jednom směru a následně ve směru na něj kolmém. Sloupec plošek označený jako II je vyšit pouze v jednom směru. Hustota vodivé příze na vyšité plošce měla velký vliv na výsledky měření (viz níže).

Nejprve byl elektrický odpor testován v bodech A, B, C a D naznačených na obr. 9. Měření bylo provedeno pro každý "řádek" označený číslem 1-4 v obr. 9. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č. 7.



Obrázek 9 - Vodivá přize (všitá), naznačení měřicích bodů

Řádek	1	2	3	4
Odpor mezi body A a D [Ω]	3,3	2,28	2,32	2,05
Odpor mezi body B a C [Ω]	2,15	4,32	4,19	2,31

Tabulka 7 - Vzor přize v látce, měření odporu nitě, naměřené hodnoty

Pro srovnání:

Elektrický odpor mezi ploškami druhého vzorku (viz obr. 7) přibližně 70 Ω .

Dalším způsobem, jak byl testován elektrický odpor, bylo použití již zmíněných druků (kapitola 3.3) zasazených do vyšitých plošek. Druky byly zasazeny do obou plošek v řádcích 2 - 4. Následně bylo prováděno měření elektrického odporu nejprve v rámci vyšité plošky, jak je naznačeno v obr. 9 červenou a modrou mřížkou. Poté odpor mezi ploškou a drukem, mezi druky v jednom řádku, mezi ploškou a vodičem s napájeným drukem (obr. 10) a následně mezi dvěma vodiči.



Obrázek 10- vodič s napájeným drukem

Elektrický odpor takto vytvořených vodičů se pohyboval v řádech desítek $m\Omega$, což je minimálně o řád nižší hodnota, než naměřené hodnoty vzorků. Na výsledky testování měly vodiče naprosto minimální vliv.

Výsledky těchto měření jsou uvedeny v tabulkách č. 8 a 9.

Odpor v rámci plošky [Ω]			Odpor ploška - druk [Ω]			Odpor ploška - vodič [Ω]		
	Sloupec I	Sloupec II		Sloupec I	Sloupec II		Sloupec I	Sloupec II
Řádek 2	0,33	1,62	Řádek 2	0,24	1,01	Řádek 2	0,38	1,51
Řádek 3	0,21	1,46	Řádek 3	0,23	0,23	Řádek 3	1,09	0,84
Řádek 4	0,26	1,13	Řádek 4	0,7	1,08	Řádek 4	1,67	1,51

Tabulka 8 - Vzor v látce, měření odporů, naměřené hodnoty

Odpor druk I - druk II [Ω]		Odpor vodič I - vodič II [Ω]	
Řádek 2	5,41	Řádek 2	5,61
Řádek 3	6,47	Řádek 3	6,94
Řádek 4	4,23	Řádek 4	4,41

Tabulka 9 - Vzor v látce, měření propojení, naměřené hodnoty

5.3.2 Měření proudového zatížení, výsledky měření

Aby mohl být systém propojovacích struktur označen jako spolehlivý, musí být schopen přenášet elektrický proud. Hodnoty maximálního proudu, který bude ve vodičích přenášen, musí být předem známy už při návrhu systému. To proto, aby mohly být propojovací struktury dostatečně dimenzovány. Pokud by tomu tak nebylo, mohlo by vlivem příliš vysokého elektrického proudu dojít k poruše.

Při tomto měření byl proud v řádcích 2 - 4 přiváděn vždy přes vodiče s drůtky. Proud byl zvyšován od nuly ve skocích o hodnotě 0,1 A, dokud nedošlo k přerušení vodivé cesty. Při tomto měření bylo možné zaregistrovat celou řadu projevů. Prvním z nich byl vždy zápach. Zvyšováním hodnoty elektrického proudu pak dotykem zaznamenané teplo, dále pak viditelné poškození struktury látky nebo vodiče, černání látky, kouř a nakonec žhavení vodivé cesty a její přetavení. Následky těchto projevů je možné vidět na obr. 11. Tímto způsobem byly měřeny všechny 3 "řádky" a hodnoty elektrického proudu, při kterém bylo možné dané jevy sledovat, zprůměrovány.

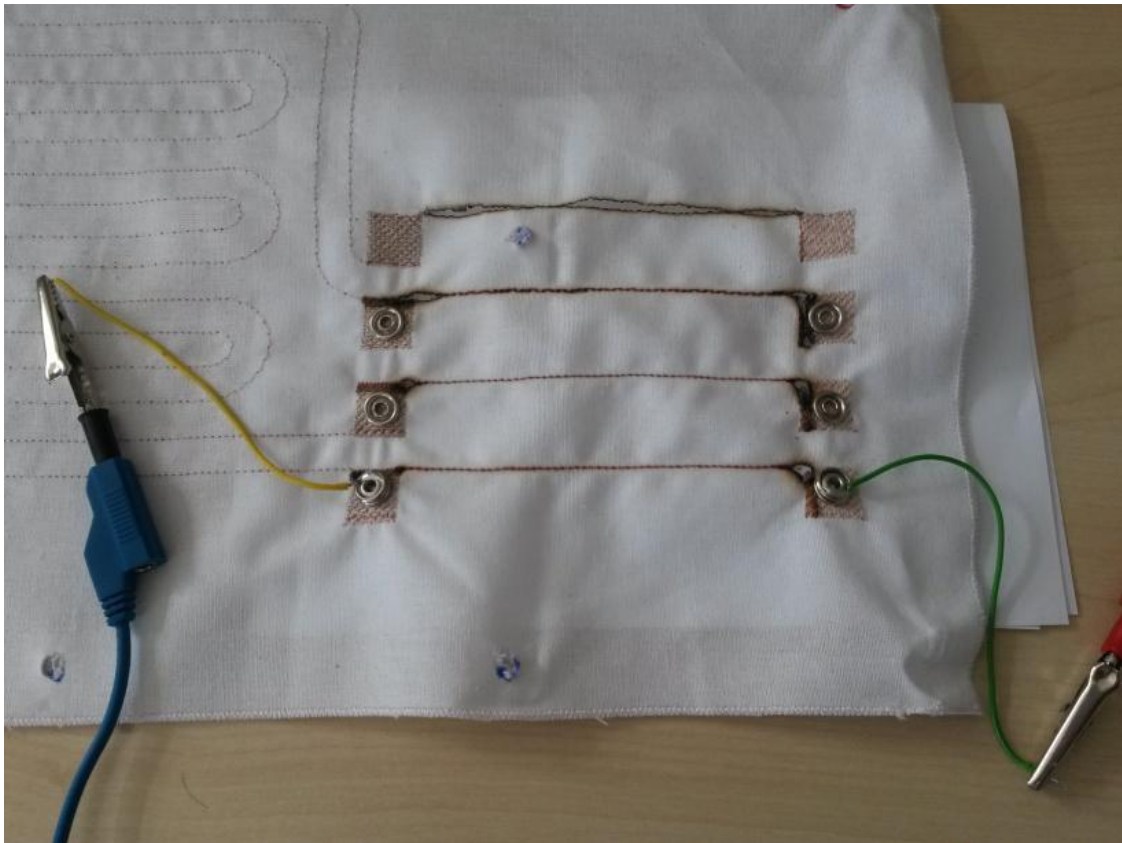
V tab. 10 jsou společně s hodnotami proudů uvedené i zaregistrované projevy.

I [A]	Projev
0,43	Slabý zápach
0,53	Na dotek registrovatelná zvýšená teplota
0,70	Na dotek nepříjemné pálení
0,87	Viditelné tavení PES v plošce II
0,97	Viditelné tavení PES v plošce I
1,27	Černání látky, kouř, silný zápach
1,37	Žhavení vlákna
1,47	Přetavení vodiče

Tabulka 10 - Příze v látce, proudové zatížení, naměřené hodnoty

Pro srovnání:

Druhý typ tkaniny (obr. 8) byl o poznání méně odolný proti proudovému zatížení. Při stejném druhu testu bylo možné cítit zápach taveného PES vlákna již při hodnotách 0,2 A. K úplnému přetavení vodivé cesty došlo již při hodnotách proudu 0,3 A.



Obrázek 11- Příže v látce, následky proudového zatížení

5.3.3 Měření proudového zatížení (teplotní závislost na proudu), výsledky měření

V průběhu měření proudovým zatížením (viz kapitola 5.3.2) bylo zároveň prováděno měření termokamerou. Díky tomu bylo možné kromě bezporuchovosti systému stanovit i bezpečnost systému s ohledem na uživatele.

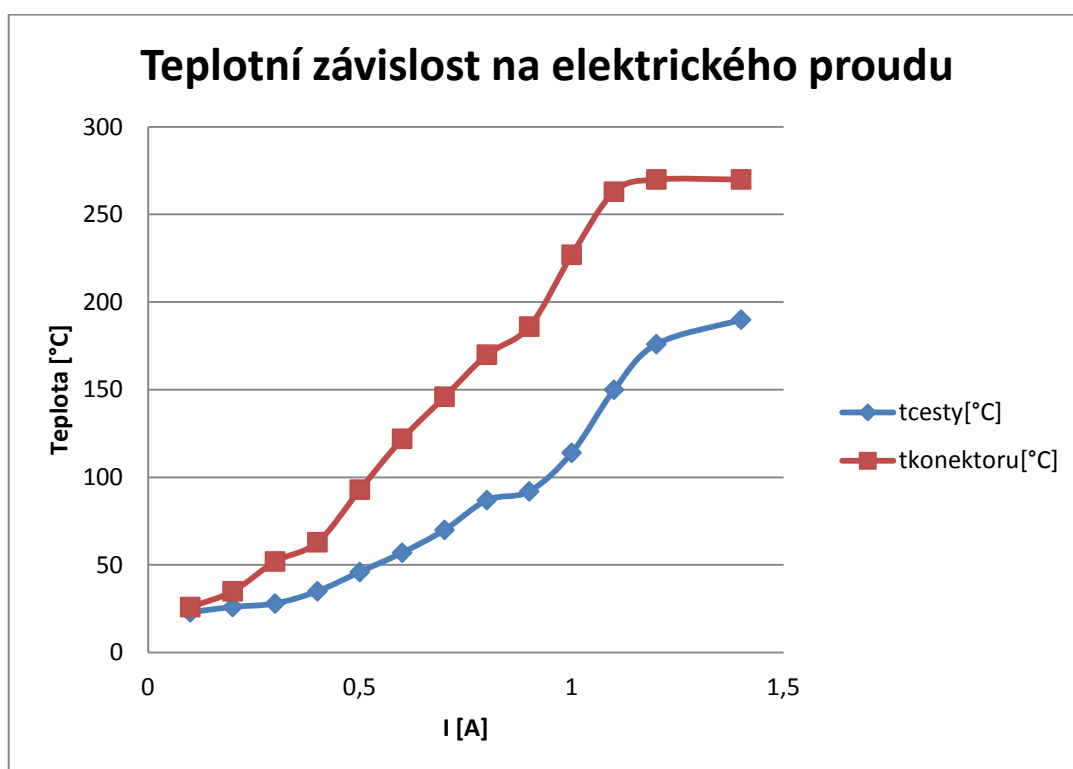
Měření tohoto parametru bylo provedeno tak, že po každém navýšení hodnoty elektrického proudu (viz kapitola 5.3.2) byly vzorek a jeho nejbližší okolí vyfotografovány termokamerou.

Naměřené hodnoty jsou patrné z tabulky č. 12 a grafu č. 1. Zároveň je nutné podotknout, že měření nebylo striktně prováděno podle normy ČSN ISO 18434-1 Monitorování stavu a diagnostika strojů - Termografie - Část 1: Všeobecné postupy.

Podle vyjádření výrobce má kamera Flir i7 sama o sobě chybu měření $\pm 2\%$. Zároveň volba emisivity nebyla přesná, ale provedena odhadem. Celková chyba měření může být přibližně $\pm 5\%$. Zároveň byla termokamera schopná měřit do hodnoty pouze 270 °C. [12][13]

I [A]	$t_{\text{cesty}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{konektoru}} [^{\circ}\text{C}]$
0,1	23	26
0,2	26	35
0,3	28	52
0,4	35	63
0,5	46	93
0,6	57	122
0,7	70	146
0,8	87	170
0,9	92	186
1	114	227
1,1	150	263
1,2	176	>270
1,4	190	>270

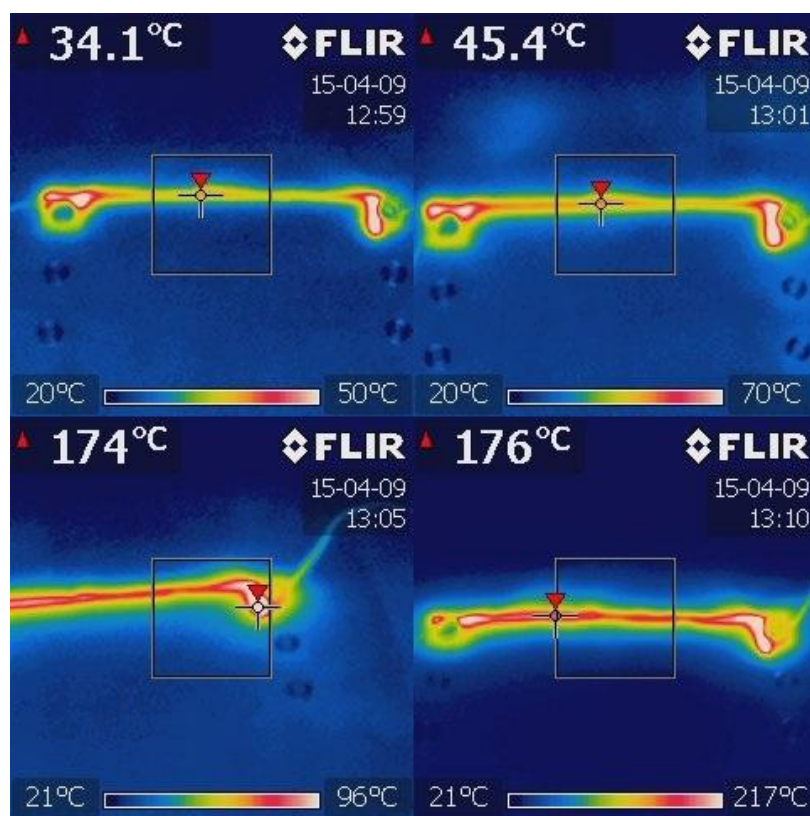
Tabulka 11 - Příze v látce, teplotní závislost, naměřené hodnoty



Graf 1- Příze v látce, teplotní závislost, graf

Pro srovnání:

U druhého typu vzorku byla teplota při hodnotě proudu 0,1 A přibližně 60 °C. Při hodnotě 0,2 A to bylo přibližně 130 °C.



Obrázek 12- Příže v látce, teplotní závislost, $I = 0,4$ A (vlevo nahoře), $I = 0,5$ A (vpravo nahoře), $I = 0,8$ A (vlevo dole), $I = 1,2$ A (vpravo dole)

5.3.4 Proudové zatížení (náchylnost na chemické vlivy), výsledky měření

Dalším úkolem testování spolehlivosti bylo zjistit i náchylnost na vnější chemické vlivy. Při tomto měření byl vzorek nejprve vystaven imitaci lidského potu a dále pak pracímu prostředku. Měření proudového zatížení bylo provedeno krátce po namočení roztokem, krátce po uschnutí, dále pak po 3 dnech a nakonec po vyprání běžným pracím prostředkem způsobem uvedeným v kapitole 4.3.2.

V lidském potu jsou ve velké míře zastoupeny soli. Dále pak pot obsahuje stopy bílkovin a močoviny. Pro tento test byl lidský pot nahrazen roztokem vody a kuchyňské soli. Na 1 l roztoku bylo použito 5 g soli.

Hodnoty odporů naměřené v jednotlivých fázích experimentu jsou znázorněny v tab. 12.

	Suché bez roztoku	Mokrý s roztokem	Suchý s roztokem	Suchý s roztokem (3 dny)	Suchý po vyprání
Odpor [Ω]					
Řádek 1	5,2	5,1	-	-	-
Řádek 2	6,4	6,2	6,5	-	-
Řádek 3	4,7	4,6	4,75	4,8	-
Řádek 4	4,7	4,65	4,7	4,7	4,65

Tabulka 12 - Chemická odolnost, elektrický odpor, naměřené hodnoty

V tab. 13 jsou uvedené naměřené proudy a k nim odpovídající zaregistrované projevy jouleových ztrát.

I [A]	Projev
1,2	Sálavé teplo
1,32	Vysoká teplota (nepříjemná na dotek)
1,5	Slabě registrovatelný zápach
1,8	Kouř, silný zápach
2,2	Zčernání látky, žhavení vodiče, přetavení

Tabulka 13 - Chemická odolnost, mokrá látka s roztokem, naměřené hodnoty

Hodnoty naměřené krátce po uschnutí jsou uvedeny v tab. 14.

I [A]	Projev
0,4	Slabě registrovatelný zápach
0,6	Na dotek registrovatelná zvýšená teplota
0,7	Na dotek nepříjemné pálení
0,9	Viditelné tavení PES v plošce II
1,2	Viditelné tavení PES v plošce I
1,4	Černání, žhavení, plamen

Tabulka 14 - Chemická odolnost, krátce po uschnutí roztoku, naměřené hodnoty

Po třech dnech byl stejný test proveden znovu. Výsledky jsou uvedeny v tab. 15.

I [A]	Projev
0,4	Na dotek nepříjemné pálení
0,6	Slabě registrovatelný zápach
0,9	Viditelné tavení PES v plošce II
1,1	Viditelné tavení PES v plošce I
1,2	Černání látky, kouř, silný zápach
1,4	Žhavení vodiče
1,5	Přetavení vodiče

Tabulka 15 - Chemická odolnost, 3 dny suché po vystavení roztoku, naměřené hodnoty

Vyprání bylo provedeno běžným pracím cyklem bez přeprání, za teploty vody 40 °C a rychlosti otáček 1 200 ot/min. Hodnoty po uschnutí jsou znázorněny v tab. 16.

I [A]	Projev
0,6	Slabě registrovatelný zápach
0,7	Na dotek nepříjemné pálení
0,9	Viditelné tavení PES v plošce I
1,0	Viditelné tavení PES v plošce II
1,1	Černání látky, kouř, silný zápach
1,3	Žhavení vodiče
1,5	Přetavení vodiče

Tabulka 16 - Chemická odolnost, suché po vyprání, naměřené hodnoty

5.3.5 Mechanické namáhání, výsledky měření

Tento test byl zvolen tak, aby z hlediska spolehlivosti otestoval oba aspekty propojovacích struktur. Vodiče i konektory.

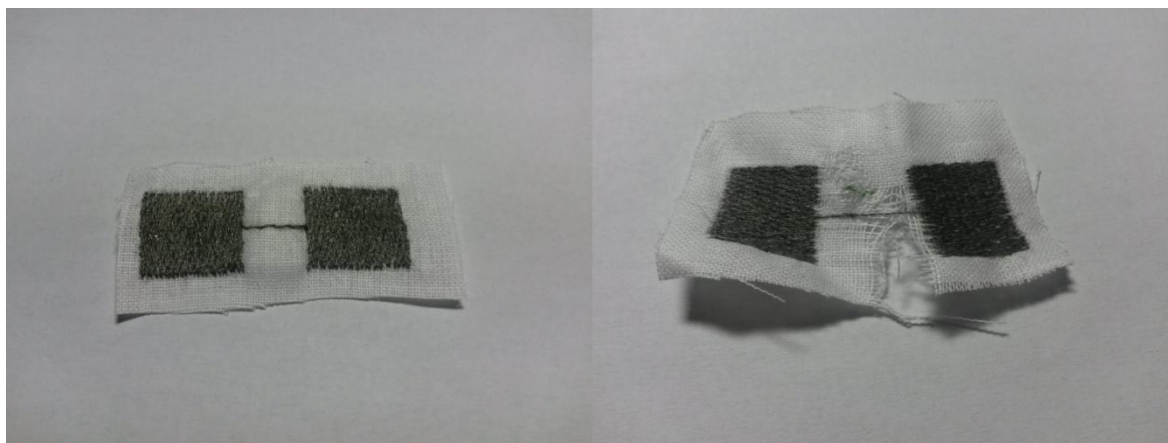
Aby byl systém provozuschopný, musí, jak vyplývá z definice, plnit nepřetržitě požadované funkce za stanovených podmínek. V případě IT je jedna z podmínek i odolávání mechanickému namáhání, které vzniká při pohybu uživatele.

Mechanická pevnost v tahu vodiče byla testována tak, že byl tenký proužek tkaniny (obr. 13 vlevo) upevněn do sklíčidel tak, aby byla vodivá cesta vždy mimo upevnění. Na elektricky vodivá sklíčidla byly přiloženy svorky multimetru se zvukovou indikací vodivé cesty. Následně byl spuštěn test mechanické pevnosti a sledována síla, nutná na přerušení vodivého spojení. Tento test byl proveden třikrát. Jeden vzorek měl již instalované druky.

Síla nutná pro přetržení tkaniny byla přibližně 113 N. K přerušení vodivé cesty však nedošlo ani v jednom případě. (obr. 13 vpravo).

Vzorek	F_{\max} [N]
Vzorek 1 (bez druku)	110,33
Vzorek 2 (bez druku)	114,27
Vzorek 3 (s drukem)	115,05
Průměr	113,22

Tabulka 17 - Mechanické namáhání látky, naměřené hodnoty



Obrázek 13 - Testovací vzorek, měření mechanické pevnosti, před testem (vlevo) a po testu (vpravo)

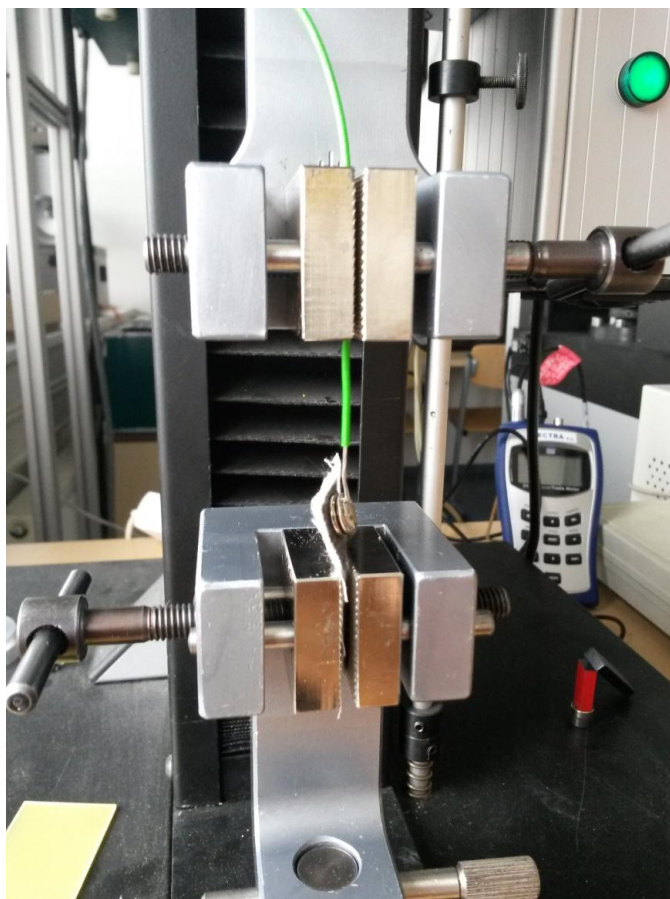
Test mechanické pevnosti konektoru (druku) byl postaven na předpokladu, že častým používáním může dojít k opotřebení materiálu. To může v praxi způsobit zvýšení přechodového odporu spoje nebo snížení síly potřebné k rozpojení kontaktu a ve výjimečných případech k samovolnému rozpojování.

Na třech vzorcích byla změřena síla nutná pro násilné vycvaknutí druku v podélném směru (viz obr. 14). Každý vzorek byl změřen pětkrát. Hodnoty uvedené v tab. 18 jsou jejich aritmetickým průměrem.

Vzorek	F_{\max} [N]
Druk 1	29,96
Druk 2	27,04
Druk 3	25,11
Průměr	27,37

Tabulka 18 - Mechanická pevnost druků, naměřené hodnoty

Aby bylo možné stanovit, zda dochází k opotřebení opakovaným používáním, bylo nutné druk vytrhnout obdobným způsobem v řádech desítek cyklů. Z důvodu časové náročnosti měření byla část tohoto testu provedena ručně mimo laboratoř. Přibližně při šedesátém opakování byla zaznamenána značná změna v pevnosti spoje a síla nutná pro rozpojení se přiblížila hodnotám 20 N (průměrně). Při stém pokusu byla síla nutná na rozpojení pouze 17 N (průměrně). Došlo tedy ke snížení pevnosti. Elektrický odpor přesto zůstal přibližně stejný.



Obrázek 14 - Testování pevnosti druku

6 Zhodnocení měření spolehlivosti

Z definice spolehlivosti vyplývá, že spolehlivý systém musí plnit funkci, ke které byl navržen, a zároveň zachovat parametry v předem definovaných mezích. Dané parametry je nutné stanovit s ohledem na zamýšlené prostředí, ve kterém se bude systém vyskytovat, a to již v době návrhu a vývoje.

6.1 Vodivá příze

Až na dva případy bylo u všech vzorků vždy možné změřit jejich elektrický odpor, resp. odpor ve vztahu k délce příze. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám, které uvádí výrobce.

U vzorků č. 4A a 7A, vlákna s jedním vodivým drátkem, nebylo možné tyto hodnoty změřit. Okamžitě po odvinutí příze ze špulky nejevila nit žádné známky elektrické vodivosti. Pro získání měřitelné hodnoty bylo nutné přikládat sondy ohmmetru na vzdálenost menší než 1 cm. Z tohoto důvodu tyto dvě příze nejsou vhodné pro použití jako propojovací cesty v inteligentních textiliích.

O poznání lepší výsledky byly zaznamenány u přízí s vyšším obsahem kovových vláken. U vláken se 4 a více vodivými vlákny bylo maximální proudové zatížení přibližně 1 A a víc, u přízí s 6 a 8 vodivými cestami 1,5 - 1,8 A. Z pohledu proudové zatížitelnosti vyšel nejlépe vzorek č. 28A (složení 48% PES/ 52% mosaz, 71 tex, 6x drát), kdy při hodnotě odporu 10 Ω /m docházelo k přerušení vodivé cesty až u hodnoty proudu přibližně 2,1 A.

Nutno podotknout, že hodnoty proudů, které jsou schopné vodiče přenést, nejsou pro použití v inteligentních textiliích nejdůležitější. Veškeré projevy, které byly při měřeních pozorovány, souvisí s jouleovými neboli tepelnými ztrátami. V případě, že bude vodivou přízí přenesen maximální možný proud, který je příze schopna vést, dojde vlivem tepelných ztrát k úplnému znehodnocení PES vlákna. Proto nemůžeme tuto hodnotu proudu považovat za použitelnou.

Jako mezní použitelnou hranici můžeme brát hodnotu proudu, při které byl poprvé zaregistrován slabý zápach. Přestože je zřejmé, že je zápach způsoben tavením polyesterového vlákna, není tento jev doprovázen žádnou vizuální změnou (např. ve struktuře PES vlákna). Lze předpokládat, že dochází k tavení pouze roztřepených mikrovláken. Vyšší elektrický proud by již způsobil viditelné změny ve struktuře příze. Hodnoty proudů, při kterých ještě nedocházelo k optickým změnám, se pohybují v rozmezí 0,27 - 1,22 A. Vzorek příze s označením 26 A (složení 31% PES/ 69% mosaz, 54 tex, 6x drát) vydržel hodnotu procházejícího proudu 1,22 A bez viditelných následků. V případě, že bude navrhován systém, kde proud ve vodičích nebude přesahovat hodnotu $I_{\max} = 1$ A (20% rezerva), lze říci, že je příze, s ohledem na proudové zatížení, spolehlivá.

6.2 Vodivý tkaloun

Vodivý tkaloun vykazuje z pohledu elektrického vodiče nejlepší vlastnosti ze všech měřených vzorků, má tedy nejmenší elektrický odpor. Přibližně 0,4 Ω /m.

Maximální proudové zatížení dosahovalo hodnot až 11,5 A. Znovu je ale nutné podotknout, že při tomto zatížení docházelo vlivem ztrátového tepla k nevratným změnám ve struktuře vzorku. Hodnota proudu, kdy bylo možné poprvé zaregistrovat slabý zápach, se pohybuje kolem 5,75 A. U vodivého tkalounu je úplně prvním zaregistrovatelným projevem zvýšená teplota vodiče, a to při hodnotách proudu přibližně 4,6 A. Při návrhu IT systému by se dala tato skutečnost využít. Pokud by byl celý systém připojen na dostatečně silný zdroj elektrické energie, mohl by tkaloun, vsítý například do podšívky bundy, sloužit jako zdroj tepla.

Zároveň byl měřením potvrzen předpoklad, že ani při maximálním proudovém zatížení nebude poškozena izolační vrstva jednotlivých vodivých cest. Izolace byla odstraňována při teplotě přibližně 350 °C. Teplota tavení PES vlákna je minimálně poloviční.

Pokud by měl tkaloun fungovat jako zdroj tepla a za předpokladu, že bude maximální procházející proud přibližně 5 A, nehrozí porušení izolace ani polyesterové struktury.

V případě, kdy nebyl vzorek upnut do dřevěné konstrukce, bylo při měření s maximálním proudovým zatížením zaznamenáno zkrácení vzorku přibližně o 5%. U nižších proudů tyto změny nenastaly.

Tak jako u vodivé příze je i v případě vodivého tkalounu nutné stanovit parametry systému s ohledem na procházející proud. Pro systém, kde bude maximální proud ve vodičích $I_{\max} = 5$ A, lze tkaloun označit jako provozuschopný z hlediska proudového zatížení. Je ale nutné brát v úvahu jev ztrátového tepla. Pokud teplota vodiče při kontaktu s pokožkou nositele překročí teplotu 45 °C, dochází k postupnému zániku buněk, při teplotě vyšší než 60 °C umírají buňky okamžitě. [16] Systém pak nemůže být označen jako bezpečný. Při měření docházelo k nepříjemnému dotyku až při hodnotách $I = 5,75$ A. Při dodržení proudového omezení, může být systém s tkalounem označen jako bezpečný.

6.3 Vodivá příze všitá do textilie

6.3.1 Měření elektrického odporu

První část měření, kdy bylo měřeno na ploškách v bodech A, B, C a D (podle obr. 9), neprokázala, že by přechod z plošky na jedno vlákno výrazně ovlivňoval elektrický odpor. Měření v bodech A a D, tedy na vyšitých ploškách, se podle výsledků (viz tab. 8) jeví jako stálější. Snaha změřit elektrický odpor v bodech B a C, tedy pouze odpor vodivé cesty, přinesla v polovině případů výsledky elektrického odporu téměř dvojnásobné. Bylo to pravděpodobně způsobeno obtížnou manipulací a nepřesným připojením klasické měřicí krokosvorky přesně na jednu nit.

Druhá část měření elektrických odporů přinesla zajímavé výsledky. Měření odporu v rámci vyšité plošky ukázalo, že ploška vyšitá ve dvou křížících se směrech má nižší elektrický odpor, než ploška vyšitá pouze v jednom směru.

Po instalaci druků do řádků 2 - 4 se ale ukázalo, že ve sloupci I nemá druk v plošce

velký vliv na hodnotu elektrického odporu. Ze tří případů bylo ve dvou zaznamenáno snížení odporu v řádech desítek m Ω . Ve sloupci II, ve kterém jsou plošky vyšity pouze v jednom směru, způsobila instalace druku snížení odporu až o 1 Ω .

Tyto rozdíly jsou ale v konečném měřítku smazány, protože "nejslabším" článkem v řetězci se ukázalo drukové propojení. Jak je vidět z naměřených hodnot, připojení vodiče do druku navýší celkový odpor řádově o stovky m Ω . Vyzkoušení několika desítek druků prokázalo, že některé po spojení drží lépe než jiné, které se viklají nebo protácejí. Ani druk nacvaknutý opakovaně do stejného spoje nevykazuje konstantní výsledky elektrického odporu. Tato skutečnost má také vliv na celkový elektrický odpor. Z tohoto testu lépe vychází plošky vyšité ve dvou směrech.

6.3.2 Měření proudového zatížení

Stejně tak jako u měření proudového zatížení vodivých přízí je třeba poznamenat, že v případě, kdy již dochází k tavení polyesterového vlákna, je všitá vodivá příze již znehodnocena. Jasným důkazem je výsledek zatěžování v řádku 1, kdy byly elektrody proudového zdroje přivedeny přímo na vodivou cestu, nikoli na plošky (obr. 15).



Obrázek 15 - přetavení látky vlivem proudové zátěže

Hlavním problémem se ukázaly v tomto testu vyšité plošky. V těchto ploškách se z důvodu nahuštění vodičů kumulovalo značné teplo (viz měření teplotní závislosti, kapitola 4.3.3). K přetavení vodiče vždy docházelo ve vyšitých ploškách, jak je možno vidět na obr. 16. Teplota v ploškách oproti teplotě samostatného vlákna byla vždy přibližně

dvojnásobná. Při hodnotách elektrického proudu nad 1 A se jednalo o teploty 300°C a více. Za předpokladu, že by se jednalo o použití textilie v praktické situaci (například tričko), jsou tyto teploty nepřijatelné. Při hodnotách elektrického proudu přibližně 0,4 A se teploty pohybovaly kolem 35°C ve vodiči a 63 °C v plošce. Za předpokladu, že se bude ve vodičích vyskytovat výše uvedená hodnota elektrického proudu, nelze tento systém označit za spolehlivý z hlediska bezpečnosti pro nositele. V době návrhu IT je potřeba s touto skutečností počítat a vodivé plošky teplotně izolovat, aby nedocházelo ke kontaktu s pokožkou.

Pro srovnání:

Proud pro dosažení zvýšené teploty je oproti vodivému tkalounu nižší v řádech jednotek A.



Obrázek 16 - znehodnocené vodivé cesty po proudové zátěži

Test chemických vlivů na proudovou zatížitelnost bohužel neukázal velké rozdíly v měřených hodnotách.

Vliv na elektrický odpor měl tento test pouze ve fázi úplného namočení látky do testovacího roztoku. Změna byla způsobena snížením přechodového odporu v druku. Ve fázích, kdy byl již testovaný vzorek suchý, docházelo ke kolísání hodnot elektrického odporu.

Tak jako u elektrického odporu měla i fáze měření po úplném namočení vliv na

testování proudové zatížitelnosti. Tekutina tady, spíše než z hlediska elektrochemického, působila jako chlazení vodivé cesty. To způsobilo, že i při proudu, který běžně vodivou cestu přetavil, docházelo u tohoto vzorku teprve k prvotnímu tavení mikrovláken. Je tedy zřejmé, že se v praxi budou hodnoty proudů, kdy dochází ke zmíněným jevům, lišit. A to především v případech, kdy vodič může být alespoň zčásti chlazen například okolo proudícím vzduchem nebo potem (např. u funkčních triček).

V další části pokusu nebyly naměřeny velké rozdíly vzhledem k měření běžného proudového zatížení, měřeného v kapitole 4.3.2. Za zmínku stojí fakt, že po vyprání nebyla vodivá cesta žádným viditelným způsobem poškozena, přestože byla při otáčkách 1 200 ot/min vystavena značnému mechanickému namáhání. Aby mohl být systém označen za spolehlivý, musel by být cyklus znečištění a následného vyprání proveden víckrát.

Test mechanickým namáháním ukázal, že lze testovaný vzorek propojovací struktury označit za spolehlivý. Vodivá cesta nebyla přerušena, přestože došlo ke zničení plátka. Plátka, ve kterém byla vodivá cesta vyšita, bylo však pružné pouze minimálně. Při vyšívání do látky není příze úplně napínána a vzniká jakási rezerva. V případě, že by byla tkanina pružnější, mohl by test mechanického namáhání přinést jiné výsledky.

V případě druků bylo dokázáno, že častým používáním dochází k mechanickému opotřebení spoje. Aby mohl být systém označen jako spolehlivý, musí být i na tento jev brán ohled. Pokud se bude při návrhu systému počítat s roztažností textilie a budou tomu podřízeny délky vodičů, může být testovaný systém druků označen za spolehlivý. Nedochovalo totiž ke změnám elektrického odporu v přechodovém kontaktu.

7 Závěr

V první části práce jsem krátce shrnul problematiku inteligentních textilií a trendů, kterých se drží jejich současný vývoj. Většina trendů směřuje k miniaturizaci a všestrannosti. Dnešním požadavkem na navrhovaný systém je, aby nabízel co nejširší spektrum funkcí. Inteligentní textilie nejsou v tomto vývoji výjimkou. Konkrétním příkladem je kombinéza schopná měřit srdeční tep společně s tepovou frekvencí, teplotou a polohou uživatele. Tato problematika je v práci shrnuta s důrazem na elektrické propojovací struktury, mezi než patří vodivé cesty a konektory.

V další části práce jsem se zabýval stanovením jednotlivých parametrů těchto propojovacích struktur s ohledem na provozní spolehlivost celého systému.

Aby mohlo být s jistotou řečeno, že jsou prvky s ohledem na daný parametr spolehlivé, je nutné znát prostředí a podmínky, kterým bude celý systém vystaven. Je potřeba tyto podmínky stanovit, a to včetně hodnot a rozmezí, které má systém splňovat. Při návrhu IT textilie je pak třeba se všemi těmito aspekty počítat.

Díky škále testovacích vzorků bylo možné přímo otestovat a porovnat vybrané parametry současně používaných technologií. Nejužitečnější data poskytlo měření proudové zatížitelnosti vzorků.

Na základě těchto měření vyvozují, že významným faktorem, který je třeba mít na paměti při navrhování textilií, je ztrátové teplo, které v tomto měření způsobilo veškeré destruktivní změny v měřených materiálech.

Test na odolnost proti chemickým vlivům neukázal žádné rozdíly v parametrech jako je elektrický odpor nebo výše zmíněné proudové zatížení. To ale připisují tomu, že byl v tomto ohledu proveden pouze jeden cyklus testů. V případě právě funkčního trička by měl spolehlivý systém udržet stálé hodnoty v řádech desítek cyklů. Tento test však přinesl užitek v jiném ohledu, a to chlazení. V případě, že byla látka namočena, jevila úplně jiné vlastnosti co se týče testu zatížení elektrickým proudem. Při návrhu kompletního systému inteligentní textilie je třeba brát v úvahu i tuto skutečnost. V případě, že se jedná o již zmíněné tričko, bude jistě chlazeno jinak, než vodiče všité nebo skryté na vnitřní straně oděvu, jako je bunda nebo hasičská kombinéza.

Teplo vzniklé průchodem elektrického proudu, které provázelo většinu měření, nemusí být vždy nežádoucí. Na trhu jsou již k dostání oděvy jako jsou vyhřívané rukavice nebo ponožky. Ty pracují právě na tomto principu. Vodivé nitě jsou pro toto použití ideální

vzhledem ke své velikosti, váze a ohebnosti.

Myslím si, že naměřené hodnoty odpovídají předpokladům a že i z nich vyvozené závěry jsou správné.

V průběhu zpracování této práce jsem se seznámil s řadou projektů a prací týkajících se problematiky inteligentních textilií, a to hlavně z elektronických článků, prací a knih. Z toho usuzuji, že technologie inteligentních textilií bude i nadále intenzivně studována a rozvíjena. To, že mají inteligentní textilie budoucnost, je zřejmé i jen z pouhého průzkumu trhu. Inteligentní textilie už dávno nejsou jen doménou vojenských složek a astronautů. Stále se rozšiřující a všestrannější nabídka produktů je již dostupná pro běžného uživatele.

Použitá literatura

- [1] SODOMKA: http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/inteligentni_textilie.pdf. [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/inteligentni_textilie.pdf
- [2] ETEXTILE LOUNGE. [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z:<http://etextilelounge.com>
- [3] KOVAČIČ: Inteligentní textilie. [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/inteligentni_textilie.pdf
- [4] SMARTTEXTILE. [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://smarttextiles.co.uk/overview/smart-materials/>
- [5] KATEDRA ODĚVNICTVÍ. Automotive a technická konfekce [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z:<http://www.kod.tul.cz/predmety/VTK/vtk.html>
- [6] DRAŠAROVÁ a HAVELKA. HIGH TECH oděvy. In: [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z:[http://www.kod.tul.cz/predmety/VTK/prednasky/hi_tech%20\[Režim%20kompatibility\].pdf](http://www.kod.tul.cz/predmety/VTK/prednasky/hi_tech%20[Režim%20kompatibility].pdf)
- [7] X M TAO. HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY. Smart Fibres, Fabrics and Clothing: Fundamentals and Applications [online]. [cit. 2015-03-01]. ISBN 978-1-85573-546-0. Dostupné z: https://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=plWkAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=smart+textile&ots=uTTzB-hwSu&sig=zHGu2TLGdPRR0xhx9rmw8kxEOVU&redir_esc=y#v=onepage&q=smart%20textile&f=false
- [8] The state-of-art Smart Textiles. [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.ptj.com.pk/Web%202004/08-2004/Smart%20Textiles.html>
- [9] E-Textiles For Wearability: Review On Electrical And Mechanical Properties. [online]. [cit.2015-03-29]. Dostupné z: http://www.textileworld.com/Articles/2010/June/Textile_News/E-Textiles_For_Wearability-Review_On_Electrical_And_Mechanical_Properties
- [10] Technical fibres: Products : silveR.STAT® fibres. [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.r-stat.fr/uk/silveRstat-fibre.php>
- [11] Specifikace nerezových materiálů. [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [12] Flir instruments: FLIR i-Series Infrared Camera Comparison Chart. [online]. [cit.

2015-05-02]. Dostupné z:

<http://www.flir.com/thermography/americas/us/view/?id=54156&collectionid=601&col=54163>

[13] Termokamera.cz: Chyby a omyly při měření [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z:

<http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/chyby-a-omyly-pri-mereni-termokamerou/>

[14] PROSR, Pavel. Soubor přednášek předmětu KET/SEZ (Spolehlivost elektrotechnických zařízení), verze LS 2015, Západočeská univerzita v Plzni

[15] ČSN IEC 50(191). Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spolehlivost a akost' služieb. 1993. Dostupné také z: <http://shop.normy.biz/detail/32262>

[16] Popáleniny: Patofiziologie [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.unob.cz/fvz/npp/Documents/Skripta_BATLS/13%20Burns.pdf