

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vyhřívání textilie pro smart textilní aplikace

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav PLIC**

Osobní číslo: **E17N0023P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Vyhřívání textilie pro smart textilní aplikace**

Zadávací 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. Prostudujte problematiku smart textilií a tepelného komfortu.
2. Popište technologie pro vsívání a vplétání elektrických prvků do plošných textilií a problematiku nerozebíratelného propojení elektricky vodivých nití.
3. Proveďte literární rešerši realizovaných vyhříváních textilií.
4. Navrhněte a realizujete vyhříváních textilii s důrazem na její dlouhodobou spolehlivost a odolnost vůči pracím cyklům.
5. Kriticky zhodnoťte realizovanou vyhříváních textilii a její vhodnost pro smart textilní aplikace.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

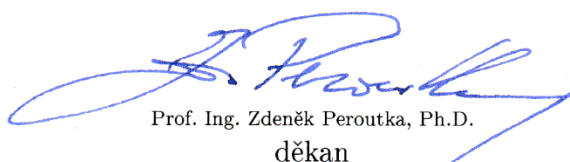
1. TAO, Xiaoming, ed. Handbook of Smart Textiles [online]. Singapore: Springer Singapore, 2015 [cit. 2017-11-19]. ISBN 978-981-4451-44-4.
2. Mattila, H., R., Intelligent Textiles and clothing, CRC Press, 2006. ISBN-13: 978-0849390999
3. Linz, T., Kallmayer, C., Aschenbrenner, R., Reichl, H.: New interconnection technologies for the integration of electronics on textile substrates. *Ambience 2005* (2005)
4. Neella, N., Gaddam, V., Rajanna, K., & Nayak, M.M. (2017). Low cost, disposable and wearable body warmer using RGO sheets coated on cloth substrate as heating element. *2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 177-180.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radek Soukup, Ph.D.**

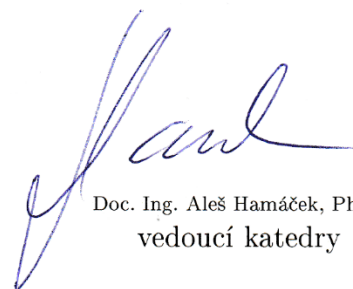
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou elektricky vyhřívaných textilií využívajících elektricky vodivých nití. Je zde popsána problematika tepelného komfortu, smart textilií, možnosti realizace elektricky vodivých prvků v textiliích a možnosti jejich propojování. Dále byla provedena literární rešerše realizovaných vyhřívaných e-textilií a průzkum nabízených produktů na trhu. Stěžejní součástí práce je návrh třech motivů elektricky vyhřívaných textilií, na jejichž základě bylo vytvořeno pět vzorků. Tyto vzorky byly kriticky zhodnoceny na základě testů odolnosti vůči ohýbání, natahování, praní v pračce a sušení v sušičce.

Klíčová slova

Vyhřívání textilie, e-textilie, smart textilie, tepelný komfort, elektricky vodivá nit

Abstract

The presented thesis deals with the issue of electrically heated textiles based on electrically conductive threads. There is described the issue of thermal comfort, smart textiles, possibilities of realization of electrically conductive elements in textiles and possibilities of their interconnection. Further, a literature survey of scientific papers deals with heated e-textiles topic and available heated e-textiles products on the market were carried out. The main part of the thesis is the design of three motives of electrically heated textiles. Overall, there were created five test samples of all designed motives, which were critically evaluated based on bending, stretching, automated washing and drying tests.

Key words

Heated textile, e-textile, smart textile, thermal comfort, electrically conductive thread

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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 28.5.2019

Václav Plic

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Soukupovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Mé poděkování patří také mojí přítelkyni a rodině, kteří mě po celou dobu mého studia podporovali.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 TEPLOTA LIDSKÉHO TĚLA A TEPELNÝ KOMFORT	12
1.1 TEPLOTA LIDSKÉHO TĚLA.....	12
1.2 VÝMĚNA A PRODUKCE TEPLA LIDSKÉHO ORGANISMU	13
1.3 TEPELNÝ KOMFORT	14
1.4 OBLEČENÍ.....	15
1.5 MĚŘENÍ A UKAZATELE TEPELNÉHO KOMFORTU.....	16
2 SMART TEXTILIE	18
2.1 TEXTILIE S FÁZOVOU ZMĚNOU	18
2.2 TEXTILIE S TVAROVOU PAMĚTÍ	19
2.3 E-TEXTILIE	19
2.4 VYHŘÍVANÉ E-TEXTILIE	20
2.4.1 Komerční vyhřívání bundy, vesty a mikiny.....	20
2.4.2 Komerční vyhřívání spodní vrstvy oblečení.....	21
2.4.3 Komerční vyhřívání ponožky, rukavice a další oděvy.....	23
2.4.4 Komerční vyhřívání prostěradla a deky.....	23
2.4.5 Publikace o vyhřívání e-textiliích.....	24
3 REALIZACE ELEKTRICKY VODIVÝCH PRVKŮ V TEXTILÍCH	26
3.1 VODIVÉ PŘÍZE.....	26
3.1.1 Vlastnosti vláken.....	27
3.1.2 Výrobci vodivých přízí.....	28
3.2 VYŠÍVÁNÍ.....	29
3.3 TKANÍ.....	29
3.3.1 Plátnová vazba	30
3.3.2 Keprová vazba	31
3.3.3 Atlasová vazba.....	31
3.4 PLETENÍ.....	31
3.5 NANÁŠENÍ VODIVÝCH VRSTEV NA TEXTILIE	32
4 ELEKTRICKÁ PROPOJENÍ V TEXTILÍCH	33
4.1 PÁJENÍ.....	33
4.2 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	34
4.3 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	35
4.4 ŠITÍ.....	36
4.5 KRIMPOVÁNÍ	37
4.6 LEPENÍ	38
4.7 ROZEBÍRATELNÁ PROPOJENÍ.....	39
5 NÁVRH A TESTOVÁNÍ ELEKTRICKY VYHŘÍVANÝCH TEXTILIÍ	40
5.1 VÝBĚR VYHŘÍVANÉ OBLASTI TĚLA A POŽADAVKY NA NAVRHOVANÉ TEXTILIE.....	40
5.2 POUŽITÉ TEXTILNÍ MATERIÁLY	41
5.2.1 Pletenina typu A.....	41
5.2.2 Pletenina typu B.....	42
5.3 NAPÁJECÍ JEDNOTKA	42
5.4 NAVRHNUTÉ MOTIVY ELEKTRICKY VYHŘÍVANÝCH TEXTILIÍ	44
5.4.1 Navržený motiv pro vzorky A1, A2 a A3	45
5.4.2 Navržený motiv pro vzorek B1	45
5.4.3 Navržený motiv pro vzorek B2	46

5.5	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A OVĚŘOVÁNÍ PARAMETRŮ VYROBENÝCH VZORKŮ	46
5.5.1	Měření odporu	46
5.5.2	Měření teploty povrchu	47
5.5.3	Měření napětí a proudu	49
5.6	TESTY PROVEDENÉ NA VYROBENÝCH VZORCÍCH	49
5.6.1	Praní a sušení	49
5.6.2	Ohýbací a natahovací testy	50
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	52
6.1	VÝSLEDKY PRACÍCH A SUŠÍCÍCH TESTŮ	52
6.1.1	Vzorek A1	52
6.1.2	Vzorek B1	53
6.1.3	Vzorek B2	55
6.2	VÝSLEDKY OHÝBACÍCH TESTŮ	56
6.3	VÝSLEDKY NATAHOVACÍCH TESTŮ	58
6.4	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	60
6.4.1	Zhodnocení vzorků pleteniny typu A	60
6.4.2	Zhodnocení vzorků pleteniny typu B	61
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	65
	PŘÍLOHY	
	PŘÍLOHA A – SNÍMKY Z TERMOKAMERY – VZOREK A1	I
	PŘÍLOHA B – SNÍMKY Z TERMOKAMERY – VZOREK B1	II
	PŘÍLOHA C – SNÍMKY Z TERMOKAMERY – VZOREK B2	III
	PŘÍLOHA D – SNÍMKY Z TERMOKAMERY – VZORKY A2 A A3	IV

Seznam symbolů a zkratk

Ag	Stříbro
CFP	Crimp Flat Package – pouzdro pro integraci plošných spojů do textilií
Cu	Měď
Dtex	Decitex – jednotka jemnosti příze – hmotnost v gramech na deset kilometrů
EEG	Elektroencefalografie
EKG	Elektrokardiografie
PAN	Polyakrylonitril
PCM.....	Materiály se změnou fáze
PES	Polyester
PP.....	Polypropylen
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
QFP.....	Quad Flat Package – pouzdro používané pro integrované obvody
SAC	Pájka na bázi cínu, stříbra a mědi
SMM.....	Materiály s tvarovou pamětí
Tex	Jednotka jemnosti příze – hmotnost v gramech na jeden kilometr

Úvod

Smart textilie jsou systémy vyvíjené za účelem zvýšení komfortu každodenních činností uživatele. Obecně lze říci, že se jedná o klasické textilie rozšířené o určitou funkčnost, kterou může být například elektrické vyhřívání integrované do struktury textilie.

Většina elektricky vyhříváných smart textilních produktů dostupných v současné době na trhu ovšem neposkytuje uživateli dostatečné pohodlí a příznivou cenu, což brání jejich masovému rozšíření. Velké množství z nich obsahuje konvenční vodiče, které způsobují omezení typicky textilních vlastností, jakými jsou zejména pružnost, ohebnost nebo prodyšnost. Jiné produkty využívají vodivých nití, jejichž komfort je značně vyšší, ovšem jejich odolnost nebývá většinou dostatečná vůči úkonům, kterým jsou obvykle textilie vystavovány. Mezi tyto úkony patří zejména ohýbání, natahování, praní v automatické pračce nebo sušení v sušičce.

Cílem této práce je návrh a vytvoření vyhřívání e-textilie, která bude dostatečně odolná vůči zmíněným úkonům a zároveň její použití bude co nejvíce komfortní pro uživatele při praktickém použití. Současně by tato e-textilie měla sloužit i pro demonstraci vyhříváných e-textilních produktů.

Pro dosažení tohoto cíle je vhodné se nejprve zaměřit na problematiku týkající se tepelného komfortu, čemuž se věnuje první kapitola práce. Druhá kapitola seznamuje se smart textiliemi a současnou situací na trhu vyhříváných e-textilních produktů. Před samotným návrhem e-textilie je potřeba prostudovat možnosti integrace vodivých prvků do výrobních procesů textilií a možnosti vytváření vodivých spojů mezi těmito prvky, čímž se zabývá třetí a čtvrtá kapitola. Pátá kapitola se zabývá samotným návrhem vzorků vyhříváných e-textilií a postupy jejich testování, jejichž výsledky jsou shrnuty a vyhodnoceny v šesté kapitole.

1 Teplota lidského těla a tepelný komfort

Následující podkapitoly se zabývají teplotou lidského těla, možnostmi její regulace, faktory ovlivňujícími tepelný komfort a možnostmi stanovení tepelného komfortu člověka. Rozsah teplot označovaných jako komfortních je u každého jedince odlišný a při vývoji produktů pro regulaci teploty je tedy vždy potřeba hledat řešení, které bude vhodné pro každého uživatele. Toho lze docílit uživatelsky nastavitelným ovládáním parametrů takového produktu.

1.1 Teplota lidského těla

Pro lidské tělo je velice důležité udržovat poměrně rovnoměrnou teplotu, která je potřebná pro životně důležité funkce. Teplota člověka se mění v průběhu dne, kdy nejnižší bývá ráno (mezi 4. až 6. hodinou) a naopak nejvyšší večer (mezi 16. až 18. hodinou). Teplota je v různých částech těla odlišná. Zejména teplota vnitřních orgánů je o něco vyšší, nazýváme ji *teplotou jádra* a není za běžných okolností příliš závislá na okolním prostředí osoby. Teplota jádra může být v oblasti jater až 40 °C. Jako *teplotu slupky* označujeme teplotu částí těla, které mění teplotu částečně i v závislosti na okolí. Těmito částmi jsou zejména končetiny a povrch těla, kde je běžně teplota okolo 31 °C až 34 °C. Během fyzické námahy může vzrůst teplota svalů na 39 °C až 40 °C. [1, 2]

Měření teploty dospělého člověka se provádí většinou v podpaží, kde rozlišujeme pět teplotních rozmezí, která uvádí *Tab. 1*. Další možností měření teploty je rektální měření (teplota přibližně o 0,5 °C vyšší než v podpaží) nebo také pod jazykem (přibližně o 0,2 °C až 0,3 °C vyšší než v podpaží). [1, 2]

Tab. 1 Rozdělení tělesných teplot člověka měřených na povrchu těla [2]

Stav	Tělesná teplota
<i>Subnormální</i>	<i>Pod 36 °C</i>
<i>Normální</i>	<i>36,0 – 37,0 °C</i>
<i>Subfebrilní</i>	<i>37,0 – 38,0 °C</i>
<i>Horečka</i>	<i>38,0 – 40,0 °C</i>
<i>Hyperpyrexie</i>	<i>Nad 40 °C</i>

1.2 Výměna a produkce tepla lidského organismu

Ve snaze dosáhnout tepelné rovnováhy dochází v lidském těle k produkci a výdeji tepla. Zatímco lidské tělo vyprodukuje v klidovém stavu přibližně 100 W, během fyzické námahy je to okolo 600 W a krátkodobě to může být i dvojnásobek. Tvorba tepla je zajištěna přibližně ze sedmdesáti procent činností srdce, jater, ledvin a mozku. K další produkci dochází svalovou aktivitou, která v reakci na chlad zvyšuje úroveň metabolismu a tím i produkci tepla. [1–3]

Tělo vydává teplo povrchem těla, na který se z jádra dostane tkáňovým vedením. Způsoby přenosu mezi povrchem a okolním prostředím jsou *radiace*, *kondukce*, *konvekce* a *evaporace*. Prvními třemi jmenovanými způsoby může lidské tělo teplo vydávat i přijímat.

Radiace (sálání) je proces, kdy je do prostoru emitována energie ve formě elektromagnetického záření. U lidského těla závisí zejména na teplotě těla a okolní teplotě. Z celkového výdeje tepla má podíl přibližně 60 %.

Kondukcí (vedením) dochází k přenosu tepla s předměty, které jsou s tělem v přímém kontaktu, a její podíl na celkovém výdeji tepla je průměrně okolo 3 %.

Konvekci (prouděním) dochází k výměně tepla s okolními tekutinami (většinou vzduchem). Od rychlosti proudění tekutiny se také odvíjí odevzdané množství tepla. Konvekce má průměrně podíl 15 % na celkovém výdeji tepla lidského těla.

Na rozdíl od předchozích třech způsobů *evaporací (odpařováním)* dochází k výdeji tepla do okolního prostředí, i pokud je teplota okolí vyšší než teplota organismu. Tělo vyprodukuje pot, který se z povrchu kůže odpařuje, a tím je odvedena část tepla. Čím je vyšší relativní vlhkost okolního prostředí, tím nižší je schopnost organismu odevzdat teplo pomocí evaporace, která má jinak průměrně čtvrtinový podíl na celkovém výdeji tepla. [1, 2]

Rovnicí tepelné bilance lze vyjádřit termoregulační procesy, jimiž organismus udržuje stálost vnitřního tepelného prostředí,

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S \quad (1)$$

kde

M Energetický výdej [W/m^2]

W Mechanická práce [W/m^2]

C_{res} Výměna tepla v dýchacích cestách konvekcí [W/m^2]

E_{res} Výměna tepla v dýchacích cestách evaporací [W/m^2]

K Výměna tepla na kůži kondukcí [W/m^2]

C Výměna tepla na kůži konvekcí [W/m^2]

R Výměna tepla na kůži evaporací [W/m^2]

S Teplo kumulované v těle [W/m^2]. [4, 5]

Pokud je u zdravého člověka tvorba a výdej tepla ve vzájemné rovnováze, je teplota organismu v rozmezí 36 °C až 37 °C. Pokud je výdej tepla vyšší, než vyprodukované a přijaté množství, dochází ke snižování teploty těla. Lidskou teplotu tedy ovlivňují faktory jako je produkce množství tepla, okolní teplota, vítr nebo vlhkost. [1, 2]

1.3 Tepelný komfort

Tepelný komfort, nebo také *tepelná pohoda*, je definován jako dosažení takových tepelných poměrů, při kterých člověku není ani chladno, ani příliš teplo, cítí se tedy příjemně. [6] Faktory ovlivňující tepelnou pohodu jsou podle *Centnerové* [3] rozděleny do třech skupin:

1) *Vnitřní prostředí*

- a) Teplota vzduchu
- b) Vlhkost vzduchu
- c) Radiační teplota
- d) Rychlost proudění vzduchu a jeho turbulence

2) *Osobní faktory*

- a) Hodnota metabolismu
- b) Oblečení

3) **Doplňující faktory**

- a) Aklimatizace (přizpůsobení se venkovnímu prostředí)
- b) Aklimace (přizpůsobení se vnitřnímu prostředí)
- c) Jídlo a pití
- d) Podkožní tuk
- e) Tělesná postava
- f) Věk a pohlaví

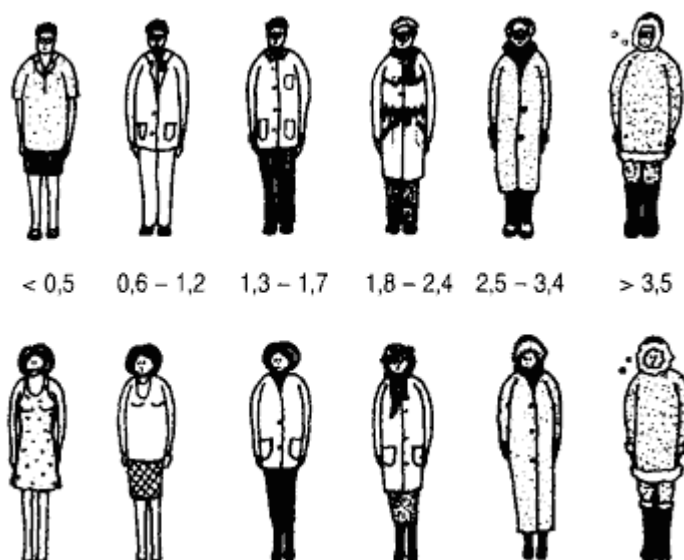
1.4 **Oblečení**

Jedním z faktorů ovlivňujících tepelný komfort, které lze snadno ovlivnit, je oblečení. Oblečení napomáhá k termoregulaci organismu, když to tělo samo nezvládá. Je jedním z klíčových prvků ovlivňujících odvod tepla z povrchu lidského těla do okolí. Pro hodnocení tepelného komfortu u textilií je důležitý vztah pro určení tepelného odporu deskových materiálů,

$$R = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

kde tepelný odpor R je roven podílu tloušťky textilie h a její tepelné vodivosti λ , která závisí na množství materiálu a vzduchu v textilii. Odvíjí se od jemnosti vláken a hustoty materiálu. [7]

Pro měření tepelné pohody oděvů byla zavedena jednotka *clo*, jež se v množství jedna rovná izolační hmotě s tepelným odporem $0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ a odpovídá běžnému pánskému obleku s bavlněným spodním prádlem. Každý kus oblečení má svoji hodnotu *clo* a celkový soubor oblečení na lidském těle se spočte jako 0,82 násobek součtu jednotlivých kusů oblečení. Pro ilustraci slouží *Obr. 1*. [3]



Obr. 1 Izolace souborů oblečení v jednotkách clo (převzato z [3])

Oblečení je pro člověka pohodlné když v něm cítí fyzickou, fyziologickou a duševní spokojenost, jako jsou třeba odvod přebytečného tepla a vlhkosti z pokožky. Proto je velmi důležité vyvíjet inteligentní textilie, které jsou schopny se přizpůsobovat vnějším podmínkám a udržovat tak stálé pohodlí uživatele. [1]

1.5 Měření a ukazatele tepelného komfortu

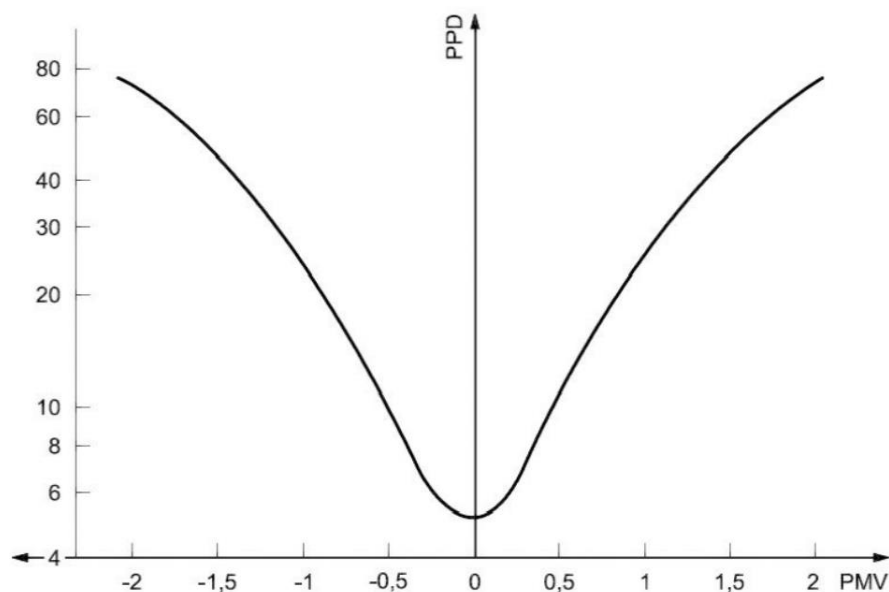
Jednou z metod měření tepelného komfortu je měření parametrů vzduchu a současně dotazování se osob na jejich subjektivní pocity ohledně okolní teploty. Tato metoda se většinou uplatňuje v interiérech za běžného provozu. Druhou metodou je měření fyziologických změn člověka probíhající v klimatické komoře. Možnými změnami jsou pocení nebo teplota pokožky.

Nejčastěji je ke zjištění tepelné pohody používáno sedmibodových stupnic od *Bedforda* nebo *ASHRAE*, které jsou zobrazeny v *Tab. 2*. Zatímco stupnice *ASHRAE* operuje pouze s tím, jak je člověku teplo nebo zima, *Bedfordova* stupnice k tomu ještě bere v potaz, jak se člověk cítí příjemně. Problémem obou těchto stupnic může být odlišné vnímání tepla jiných kultur. Například lidé žijící v chladném podnebí, mohou vnímat teplo jako něco velmi pozitivního na rozdíl od lidí žijících v teplém prostředí, kteří mohou naopak pozitivně vnímat chlad. Tepelný komfort lze změřit i jednodušší *McIntyreovou tříbodovou stupnicí*, kdy lidé odpovídají, zda preferují: 1 – tepleji, 2 – beze změny, 3 – chladněji. [3, 8, 9]

Tab. 2 Porovnání Bedfordovy a ASHRAE stupnice

Hodnota	ASHRAE	Bedford
3	<i>Horko</i>	<i>Velmi teplo</i>
2	<i>Teplo</i>	<i>Teplo</i>
1	<i>Tepleji</i>	<i>Příjemně teplo</i>
0	<i>Neutrálně</i>	<i>Příjemně</i>
-1	<i>Chladněji</i>	<i>Příjemně chladno</i>
-2	<i>Chladno</i>	<i>Chladno</i>
-3	<i>Zima</i>	<i>Velmi chladno</i>

Bedfordovou i ASHRAE stupnicí lze vyjádřit index *PMV* (*Predicted Mean Vote*), tedy předpokládanou průměrnou volbu při provádění měření tepelného komfortu na velké skupině osob. *PMV* je stanoven za předpokladu odhadu hodnoty tepelného odporu oděvu, energetického výdeje osoby a měření vlastností prostředí. Druhým používaným indexem je *PPD* (*Predicted Percentage Dissatisfied*) – předpokládané procento nespokojených, kterým je vyjádřen podíl osob, které pociťují tepelný diskomfort. Z *Obr. 2* plyne, že u velké skupiny lidí bude vždy minimálně 5 % osob se současným tepelným stavem nespokojeno. [3, 10]

Obr. 2 Závislost indexu *PPD* na indexu *PMV* (převzato z [10])

2 Smart textilie

Smart textilie jsou definovány jako textilní materiály, které snímají a reagují na okolní prostředí nebo vnější podněty, jako jsou mechanické, tepelné, chemické, elektrické, magnetické nebo jiné zdroje. [11–13] Díky propojení nanotechnologií, inteligentních materiálů, bezdrátových technologií a mnoha dalších oborů lze takové textilie realizovat a stále zdokonalovat. [7, 14] Některé zdroje řadí mezi inteligentní textilie i ty, které mají pouze estetický efekt, jako například svícení nebo zobrazování obrázků a videa na oděvu. [15] V současnosti jsou komerčně dostupné smart textilie z materiálů s tvarovou pamětí, změnou fáze, změnou barvy nebo vodivými a elektronickými prvky. Textilie s vodivými a elektronickými prvky jsou v literatuře většinou označovány jako *e-textiles* a na jejich podkategorii, vyhřívání e-textilie, je zaměřena tato práce.

Původní funkcí textilií bylo chránit člověka před chladem a deštěm. Později se začaly projevat i estetické funkce oděvů, a až v nedaleké minulosti začala vznikat nová generace „*inteligentních a interaktivních textilií*“. Jako úplně první materiál označený jako smart textilie byla hedvábná nit s tvarovou pamětí. [14]

Následující podkapitoly přinášejí seznámení s textiliemi s fázovou změnou, s tvarovou pamětí a e-textiliemi.

2.1 Textilie s fázovou změnou

Materiály se změnou fáze (PCM) jsou tepelně akumulacími materiály používané k regulaci teplotních výkyvů. Ukládají energii během tání látky a naopak během tuhnutí energii vydávají. Ideálně by tedy v oblecích měla tato technologie pracovat tak, že v obleku jsou zabudované *PCM mikrokapsle* absorbující teplo ve chvílích, kdy ho člověk produkuje a naopak hřející, když je uživateli chladno. PCM mikrokapsle jsou aplikovány pomocí polyuretanu (PUR) nebo polyakrylonitrilu (PAN) na povrch textilie. Případně je možné mikrokapsle přidat do polyuretanové pěnové matrice, která je poté nalaminována na textili. Základy technologie změny fáze byly vyvinuty během výzkumu americké vládní agentury NASA na začátku osmdesátých let minulého století. V roce 1987 americká *Triangle Research and Development Corporation* prokázala proveditelnost technologie v textilních vláknech a nezávislost tepelné kapacity tkaniny na obsaženém množství vzduchu. [1]

Textilie s fázovou změnou najdou své využití v zimě i v létě. Na trhu se lze setkat s oblečením a obuví obsahující PCM zejména pro aktivní nebo extrémní sporty. PCM materiály se mohou vyskytovat také například v autosedačkách, kancelářských židlích nebo v přikrývkách a prostěradlech. [1]

2.2 Textilie s tvarovou pamětí

Materiály s tvarovou pamětí (SMM) se projevují schopností vrátit se na základě vnějšího podnětu z deformovaného tvaru na jiný předem definovaný tvar. Spouštěcí impuls změny tvaru je většinou změna okolní teploty, ale může to být i magnetické pole, elektrické pole, UV světlo, hodnota pH nebo například kontakt s vodou. Schopnosti materiálů s tvarovou pamětí byly pozorovány již v roce 1932 na zlato-kadmiových vzorcích, později na mosazích nebo nikl-titanových slitinách. Kromě slitin kovů lze tyto vlastnosti pozorovat u některých keramik nebo i polymerů, které mají větší potenciál pro použití v textiliích. U kovových slitin lze mechanické vlastnosti nastavit jen v omezeném rozsahu a maximální deformace, kterou mohou podstoupit, je okolo 8 %. Naproti tomu polymery jsou snadno tvarovatelné, mají vysokou stabilitu tvaru a nastavitelnou teplotu přechodu. [1]

Ve smart textiliích se používají polymery s tvarovou pamětí pro udržení tepelného komfortu uživatele, odvedení vlhkosti z těla a zároveň ochrana před větrem a deštěm. To je velká výhoda oproti oděvům z PVC nebo PAN vláken, které jsou sice voděodolné ale nejsou příliš paropropustné. Pro sportovní oblečení se používají zejména polyuretanová vlákna s tvarovou pamětí. [1]

2.3 E-textilie

E-textilie jsou textilie, jež mají ve své struktuře zabudované elektronické komponenty sloužící pro snímání, vykonávání činností, zpracování dat nebo také uchovávání energie. V současnosti se objevují zejména e-textilie využívající současných technologií, jako jsou rigidní plošné spoje a konvenční vodiče zabudované do textilního substrátu. To s sebou nese značné omezení komfortu uživatele, komplikovanost údržby těchto textilií (praní, sušení nebo čištění), a s tím spojený nedostatečný zájem o tyto produkty. [1, 11] V budoucnu by ale mohly být vyvinuty elektronické prvky, které by byly přímo integrovány do textilních přízí a nebyl by tak nijak narušován výrobní proces oděvu a komfort by pro uživatele byl

srovnatelný s běžnými textiliemi. Je tedy snaha vyvinout nové technologie, které by byly schopné vyrábět elektronicky aktivní a senzorová vlákna. [16]

Využití e-textilií lze uplatnit jak pro snímání parametrů uživatele, tak i okolního prostředí. Mezi snímatelné parametry uživatele patří zejména monitorování životních funkcí, jako jsou tělesná teplota, EKG, dýchání nebo krevní tlak, ale také například snímání aktivity svalů a kloubů. Z okolního prostředí mohou snímat například vlhkost, teplotu, intenzitu UV záření nebo přítomnost plynů. Mezi činnosti, které e-textilie mohou vykonávat, patří například svícení a vyhřívání. Mohou ovšem vykonávat i mnohem sofistikovanější činnosti, jako je třeba aplikování léků uživateli. [1, 11, 13] Tato práce se zabývá možnostmi e-textilního vyhřívání lidského těla.

2.4 Vyhřívání e-textilie

Běžně užívané oblečení pro udržení tepelného komfortu v chladném prostředí bývá objemné a tím může být omezena i pohyblivost uživatele. Takový problém lze řešit méně objemným oblečením obsahujícím flexibilní elektricky vyhřívání těleso. [17] Flexibilní vyhřívací výrobky mají velkou výhodu v možnostech ohýbání se podle vyhřívajícího objektu nebo osoby, což vede k mnohem efektivnějšímu přenosu tepla kondukcí, než je tomu u rigidních systémů, kde jsou kontaktní plochy mezi vyhřívacím elementem a vyhříváním objektem mnohem menší. [18]

Mnoho vyhříváních textilních výrobků na trhu má uvnitř zabudovaný konvenční vodič, který se průtokem proudu ohřívá a vzniklé teplo je předáno do okolí. Některé produkty mají komfortnější technologii a používají vodivé nitě. Oděvy se zabudovanými vyhřívacími prvky jsou napájeny pomocí akumulátoru, který je potřeba mít umístěný v oděvu nebo jeho bezprostřední blízkosti. Výrobky pro domácí použití, jako jsou vyhřívání návleky na nohy, deky nebo podložky, jsou většinou napájeny síťovým příívodem na 230 V. Základní přehled těchto výrobků je uveden v následujících podkapitolách.

2.4.1 Komerční vyhřívání bundy, vesty a mikiny

Na trhu je velké množství vyhříváních bund, které lze pořídit za ceny přibližně od 3 500 Kč a většinu z nich lze prát v pračce. Bundy mají poměrně velkou tloušťku a nebývají přímo upnuté na tělo, takže u nich lze celkem snadno zachovat komfort i při použití

konvenčních vodičů a napájecích zdrojů uvnitř jejich struktury. Pro bundy se na trhu objevují akumulátory s napětím až 20 V a kapacitou až 10 400 mAh. Některé mají napětí pouze 5 V a lze je nabíjet přes konektor USB z jakékoliv powerbanky určené pro mobilní telefony. Akumulátory je samozřejmě potřeba vyjmout před praním. Většina bund je vyhřívána v oblasti hrudníku a horní oblasti zad, některé i v oblasti kapes. [19–24] Na trhu jsou i vyhřívání bundy pro motorkáře (viz Obr. 3), které lze připojit přímo na dvanácti voltový zdroj motocyklu, což s sebou nese tu nevýhodu, že pokud uživatel opouští motocykl, nesmí zapomenout napřed odpojit přívodní kabel, aby nedošlo k jeho poškození. [25]



Obr. 3 Vyhřívání oblastí motorkářské bundy od společnosti Milwaukee (převzato z [26])

Velice podobně jako bundy jsou na tom mikiny a vesty. Jejich ceny se pohybují přibližně již od 2 000 Kč a nabízejí podobné parametry jako bundy, včetně pratelnosti a napájení. Jsou zde již vyšší nároky na pohodlí uživatele, ale stále zde lze použít ve struktuře oděvu klasické vodiče při zachování dostatečného komfortu. [20–22]

2.4.2 Komerční vyhřívání spodní vrstvy oblečení

Na vrstvy oblečení, které přichází do kontaktu přímo s pokožkou uživatele, je kladen mnohem vyšší nárok na komfort. V této oblasti je mnohem náročnější vyvinout elektricky vyhřívanou textilií, protože použití klasických vodičů je uživateli značně nepohodlné. Ještě více nepohodlným prvkem je akumulátor, který musí být značně objemný, aby vydržel oděv napájet několik hodin.

Z důvodu nepohodlnosti klasických vodičů používá společnost *Volt Heat* patentovanou technologii *Zero Layer*[®], která pro vyhřívání spodních vrstev oblečení používá ultra-tenké topné panely konstruované vlákny z nerezové oceli, které jsou tkané na izolační vrstvu a následně zapouzdřeny tepelnou lepicí páskou, která chrání topné panely před opotřebením. Izolační vrstva slouží k odrazu vyzářeného tepla topnými panely směrem k lidskému tělu. Samotné topné panely využívají k přenosu tepla zejména kondukcí. Celý systém navíc pomáhá snížit objem a zvýšit efektivitu přenosu tepla, protože není potřeba přidávat další vrstvy látky mezi vyhřívací elementy a pokožku. Tuto technologii používá společnost *Volt Heat* nejen ve všech svých spodních trikách, ale i ve většině bund, rukavicích a dalších produktech. [27]

Na trhu lze najít i vyhřívání spodní kalhoty, které má ve svém portfoliu například společnost *Venture Heat* (viz *Obr. 4*) nebo *Gobi Heat*, která využívá k vyhřívání svého oblečení elementů z uhlíkových vláken. [23, 24]

Všechny zmíněné produkty lze prát v pračce a sušit v sušičce. Spodní trika jsou většinou vyhřívána zejména v oblasti zad, ale některá i v oblasti hrudníku nebo břicha a jejich ceny se pohybují od 2 000 Kč výše. Spodní kalhoty jsou zpravidla vyhřívány v oblasti kolen, ale mohou být i v oblasti stehen nebo hýždí a stojí od 3 000 Kč výše. Vyhřívání částí výrobků od společnosti *Venture Heat* lze vidět na *Obr. 4*. [23, 24, 27]



Obr. 4 Vyhřívání oblastí spodních kalhot a spodního trika od společnosti Venture Heat (převzato z [24])

2.4.3 Komerční vyhřívání ponožky, rukavice a další oděvy

I u vyhřívání ponožek a rukavic je asi největším problémem potřeba umístění akumulátoru do oděvu. Ponožky mají většinou akumulátor umístěný v oblasti lýtky nebo holeně. Ponožky od společnosti *Volt Heat* a *Gobi Heat* používají bezdrátový ovladač k ovládnutí intenzity tepla. Není tedy potřeba teplotu nastavovat přímo na samotných ponožkách jako je tomu například u ponožek od společnosti *Belginova NV*, což může být při mnoha vrstvách oblečení velmi nepraktické. Velkou výhodou ponožek od *Gobi Heat* je možnost praní v pračce, což u *Volt Heat* není možné a u ponožek značky *30seven* od *Belginova NV* pouze po vyjmutí vyhřívání vložky, kterou nelze vyprat. Ponožky jsou vyhřívány pod chodidlem a jejich ceny začínají přibližně na 3 000 Kč. [23, 27, 28]

Dalšími vyhříváními oděvy, které se na trhu vyskytují, jsou rukavice, vyhřívání šály (viz *Obr. 5*), čepice, kukly nebo stélky do bot. Rukavice od *Volt Heat* mají vyhřívání z rubové i lícové strany ruky, ostatní výrobci tuto informaci neuvádějí. Napájecí akumulátory se umísťují do předloktní části rukavice. Rukavice lze zakoupit od 4 000 Kč výše. [21, 23, 24, 27, 28]



Obr. 5 Vyhřívání ponožky od Gobi Heat (převzato z [23]) a šála od Volt Heat (převzato z [27])

2.4.4 Komerční vyhřívání prostěradla a deky

Na českém trhu lze narazit na elektricky vyhřívání návleky na nohy, deky, či podložky do postele napájené ze sítě na 230 voltů. Jako příklad lze uvést prostěradlo (dle dalších zdrojů uváděné jako deka nebo podložka) s názvem *Lanaform Heating Blanket S2* (viz *Obr. 6*).

Udávaná výška tohoto prostěradla je 1 cm, což je značně více, než u klasických prostěradel. Na základě toho se lze domnívat, že v prostěradle je použito nějakého konvenčního vodiče, nikoliv vodivých nití. Navíc by se tento výrobek měl na lůžku užívat tak, že je překrytý klasickým prostěradlem. V manuálu výrobku je uvedeno, že ho po odpojení napájecího kabelu lze prát v pračce, nejvýše však pětkrát za celou jeho životnost. [29, 30]



Obr. 6 Prostěradlo Lanaform Heating Blanket S2 (přezvato z [29])

Některé tyto výrobky lze dokonce prát v pračce, ale většina z nich má záruku kratší, než dva roky a v manuálech jiných je zase uvedeno, že se záruka nevztahuje na škody způsobené běžným používáním výrobku. [30] Na základě těchto informací lze předpokládat, že odolnost těchto výrobků není na takové úrovni, aby s nimi mohlo být zacházeno jako s klasickými oděvy a textiliemi.

2.4.5 Publikace o vyhřívání e-textilíích

Indický tým doktora Neelly [31] vyvinul elektricky vodivou textilií za použití nanovrstev redukovaného oxidu grafenu (RGO), které jsou naneseny na bavlněné oblečení metodou ponoření (dip coating). Tyto vodivé nanovrstvy vytvářejí film s tloušťkou okolo 200 μm , který lze použít pro účely elektrického vyhřívání. Indickým týmem byl vytvořen vzorek o rozměrech 18 mm na 6 mm, který byl napájen napětím 40 V, kdy bylo na jeho povrchu dosaženo konstantní teploty 52 $^{\circ}\text{C}$ při příkonu okolo 480 mW. [31]

Čínský tým doktora Hao [32] představil výrobní technologii vetkávání stříbrných vláken a postříbřených nití do běžných tkanin za účelem vytvoření flexibilní vyhřívání tkaniny.

Bylo vytvořeno několik vzorků, s různými parametry a byla porovnávána jejich flexibilita, proudová zatížitelnost a termostabilita, která byla určována měřením rozdílu odporu vzorků umístěných po dobu čtyř hodin v komoře s konstantní teplotou 80 °C, 100 °C, 120 °C, respektive 140 °C. Z experimentů vyplývá, že vyšší proudovou zatížitelnost mají vzorky se stříbrnými vlákny, jež byly zatíženy i proudem vyšším než 0,3 A oproti postříbřeným přízím, které lze zatížit méně než 0,1 A. Také termostabilita vychází lépe pro stříbrná vlákna, jejichž odpor se během čtyř hodin v konstantní teplotě měnil v řádu jednotek procent, zatímco u postříbřených nití to byly desítky procent. [32]

Tým docentky Bahadirové [33] zrealizoval elektricky vyhřívanou textilií vyrobenou pletením, do jejíž struktury byla přidána postříbřená polyamidová příze. Aby zabránil zkratům vodivých cest při ohýbání textilie nebo přítomnosti vlhkosti, provedl ultrazvukové svařování polymerních svařovacích pásek k textilií při zachování vysokého tepelného výkonu topného tělesa. [33]

Článek doktora Hamdaniho a kol. [34] pojednává o vyhřívacích schopnostech pletenin vytvořených z nerezových vláken. Cílem studie bylo najít vhodný materiál pro oděv chránící před chladným prostředím. Pro experiment byla použita dvouvrstvá příze z nerezové oceli obsahující v každé vrstvě 90 vláken o průměru 14 μm. Odpor příze činil 0,3 Ω/cm a k jejímu přetržení by byla v tahu potřeba síla 25 N. Z výsledků této studie plyne, že pleteniny s vlákny z nerezové oceli jsou schopny dosáhnout vyšší úrovně vyhřívání při stejném napájecím napětí, než je tomu u pletenin s postříbřenými polymerními přízemi. Dalším poznatkem bylo, že natahování textilie nevykazovalo významný vliv na ohřev pleteniny. [34]

3 Realizace elektricky vodivých prvků v textiliích

Vodivé cesty v textiliích lze realizovat vodivými přízemi, které mohou být do struktury textilie vetkány nebo vpleteny přímo během procesu výroby textilie. Dále mohou být také na již vyrobenou textilií vyšity nebo vytištěny, například pomocí sítotisku. Všechny tyto procesy jsou popsány v následujících podkapitolách. Do textilií lze integrovat i elektronické prvky jako jsou například diody, tranzistory a mnoho druhů senzorů, čímž se zabývá například druhá část knihy *Handbook of Smart Textiles [11]*. Tato problematika ale není předmětem této práce.

3.1 Vodivé příze

Vodivé příze mohou být čistě kovové nebo složeny z kovového a textilního materiálu. Čím více kovu je součástí vodivé příze, tím více ztrácí svoji flexibilitu a další vlastnosti typické pro textilie. Textilní vlákno také zajišťuje mechanickou pevnost příze. Nejčastěji používané kovy pro vodivé příze jsou stříbro a nerezová ocel. Výrobu vodivých přízí lze realizovat několika způsoby:

- ***Textilní vlákno ovinuté kovovými vlákny***

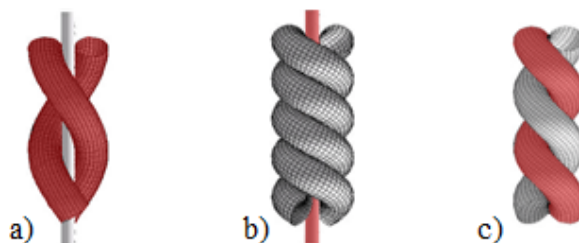
Jádro z textilního vlákna je ovinuto kovovým vláknem, které tvoří plášť (viz Obr. 7 a).

- ***Kovové vlákno ovinuté textilními vlákny***

Textilní vlákno tvoří plášť kovového jádra. Vodič je tak lépe chráněn vůči fyzickému namáhání (viz Obr. 7 b).

- ***Textilní vlákno seskané s kovovým vláknem***

Textilní vlákno je seskáno spolu s kovovým vláknem v jeden celek (viz Obr. 7 c). [35]



Obr. 7 Druhy přízí: a) Textilní vlákno ovinuté kovovými vlákny; b) Kovové vlákno ovinuté textilními vlákny; c) Textilní vlákno seskané s kovovým vláknem; (vše převzato z [35])

Dalším způsobem jak dosáhnout vodivosti přízí je nanesení povlaku vodivých vrstev na textilní vlákna. Toho bývá dosaženo chemickým pokovením. Taková vlákna bývají dostatečně tenká, aby nedošlo k jejich poškození během procesu výroby textilií, ale nemají většinou dostatečnou vodivost pro plnou funkčnost. Pro zvýšení jejich vodivosti nebo zlepšení povrchových vlastností se používají elektrochemické a galvanické nanášecí způsoby. [1] Lze se také setkat s přízemi z vodivých polymerů, jako jsou polyanilin, polypyrrol, polyacetylen a další. [1, 36]

3.1.1 Vlastnosti vláken

Příze jsou tvořeny z vláken, jejichž parametry jsou důležité pro vhodnost použití v konkrétních aplikacích. Mezi základní vlastnosti vláken patří:

- **Jemnost**

Jemnost nebo také *délková hmotnost* je vyjádření hmotnosti vlákna na jednotku délky. K určení jemnosti slouží jednotka *tex*, která udává hmotnost vlákna v gramech na jeden kilometr. Ovšem vhodnější a častěji používanou pro určení jemnosti textilních vláken je její desetina, tedy *decitex (dtex)*, která tedy označuje hmotnost v gramech na deset kilometrů. Jemnost má vliv jak na omak textilií, tak zejména na schopnost smísení dvou a více komponent za účelem dosažení optimálních vlastností textilie.

- **Délka**

Délka vláken je vyjadřována v milimetrech nebo palcích a určuje spradatelnost vláken. U přírodních vláken délka souvisí s jejich jemností, u chemických nikoliv.

- **Tuhost v ohybu**

Tuhost v ohybu souvisí s jemností vláken. Jedná se o odpor vůči deformaci vnějším zatížením.

- **Ohebnost**

Ohebnost vláken je vyjádření počtu ohybů do doby, kde se vlákno přelomí. Je závislé na vnitřní struktuře vlákna, orientaci makromolekul a pevnosti jejich vazeb. Tato vlastnost koresponduje se žmolkovitostí tkanin a pletenin.

- **Sorpční schopnost**

Sorpční schopnost vláken závisí na četnosti hydrofilních skupin, na které jsou vázány molekuly vody. Absorbováním vody vlákno zvětší objem, což zapříčiní změnu mechanických vlastností.

- **Odolnost vůči oděru a slunečnímu záření**

Tyto parametry jsou velmi důležité z hlediska účelu použití vláken. Zpravidla chemická vlákna mají vyšší odolnost než vlákna přírodní. Právě proto jsou také vlákna spolu směřována, aby byla zvýšena odolnost a trvanlivost textilních výrobků. [37]

3.1.2 Výrobci vodivých přízí

R.STAT SAS je francouzská společnost zabývající se přes 40 let výrobou antistatických, vodivých, teplu-vzdorných a antibakteriálních vláken pro využití v různých průmyslových aplikacích. Vlákna *SilveR.STAT* se používají jako ochrana proti elektrostatickým výbojům, antibakteriální ochrana v textiliích, pro elektromagnetické stínění nebo i pro vyhřívání textilie. Tato vlákna jsou složena z polyamidového jádra, které je chemicky ovrstveno čistým stříbrem. Tato společnost nabízí dále ultra-tenká vlákna z nerezové oceli (8 μm až 22 μm) s elektrickým odporem až 10 Ω/cm , jež lze použít pro vysokoteplotní aplikace. [38]

ELITEX® je vysoce vodivá příze z polyamidu potažená čistým stříbrem od společnosti *Imbut GmbH* zaměřené na výrobu speciálních nití a tkanin. Příze si i přes pokovení zachovává textilní vlastnosti v podobě flexibility a je možné ji čistit. Lze ji zpracovat tkaním, vyšíváním, šitím i pletením a je používána například pro vyhřívání autosedaček, výrobu textilních elektrod EEG a EKG nebo díky její pájitelnosti pro textilní integrované obvody. Výrobce nabízí své příze v několika stupních jemnosti. Pro medicínské účely vyvinul přízi *ELITEX® SC* vhodnou pro kontakt s pokožkou s hodnotami odporu okolo 20 Ω/m a pro aplikace vyžadující izolaci nebo ochranu proti korozi nabízí přízi *ELITEX® I*. Tam, kde je vyžadována vyšší elasticita slouží příze *ELITEX® E*. [39]

Česká společnost *VÚB a.s.* nabízí elektricky vodivé hybridní nitě *CleverTex®*, které vyvinula společně s *Regionálním inovačním centrem elektrotechniky Západočeské univerzity*. Nitě obsahují ultra-jemná kovová vlákna a syntetické filamenty (polyester nebo polyamid) a jsou vhodné pro tkaní, pletení vyšívání a šití. Nitě jsou zdravotně nezávadné a nedráždí pokožku. [40, 41]

Společnost *Elektrisola* se specializuje na výrobu smaltových měděných drátů. Nabízí ale i drátky, které lze použít pro textilní aplikace. Jsou to vlákna z nerezové oceli s průměry od 25 μm , postříbřená ocelová vlákna s průměry od 30 μm nebo postříbřená měděná vlákna s průměrem od 20 μm . [42]

3.2 Vyšívání

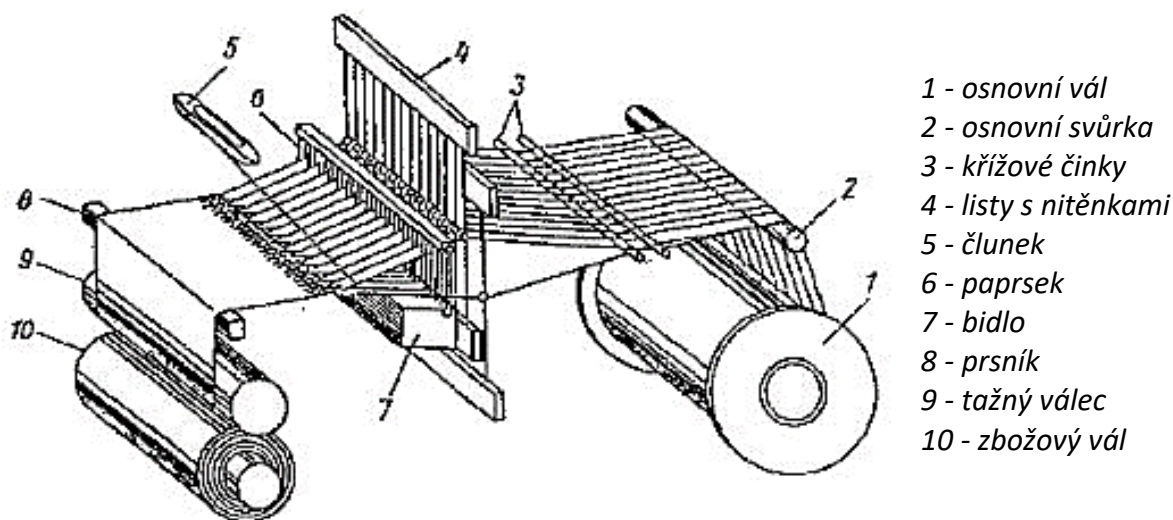
Vyšívání se tradičně používá k vytváření dekorativních vzorů na vhodný substrát. Lze ho realizovat ručně nebo pomocí strojů k tomu určených. Substrát je uchycen do rámce udržujícího jeho napnutí a za pomoci jehly je substrátem provlékána nit. Při výrobě vodivých textilií jsou vodivé příze vyšity do požadovaného tvaru na izolační substrát, který může být tkaný, netkaný nebo pletený. Jednou z výhod tohoto procesu je možnost tvorby elektrického obvodu libovolného tvaru bez ohledu na směr přízí substrátu. Během vyšívání jsou nitě zatěžovány různými úrovněmi tření a pnutí a z toho důvodu je potřeba, aby byly dostatečně pevné a pružné. Dále je k omezení tohoto mechanického namáhání většinou aplikován lubrikant na bázi parafinů nebo silikonů. Přerušení vyšívací nitě při obyčejném dekorativním vyšívání nemusí být problémem, ale při vytváření vodivých struktur může být takový defekt rozhodujícím faktorem pro nefunkčnost celého obvodu, proto je potřeba při tomto procesu dbát zvýšené opatrnosti. [1, 7]

3.3 Tkaní

Do struktury textilie lze spolu s nevodivými vlákny vetkat i vlákna vodivá a vytvořit tak elektrický obvod. Výroba tkanin probíhá na *tkacím stroji*, kde jsou během procesu tkaní používány dvě navzájem kolmé soustavy nití, které jsou vzájemně provázány. Soustava nití v podélném směru je označována jako *osnova* a v příčném směru *útek*. Nevýhodou tkaní vodivých nití je potřeba dodržení směru vláken tkaniny, takže jsou možné pouze kolmé struktury vedení, což může vést ke zbytečně dlouhým vodivým cestám. Dalším velkým omezením je, že vodivé nitě ve směru osnovy musí být umístěny na předem určených místech již na osnovním válu. [1, 43, 44]

K vysvětlení principu tkaní slouží *Obr. 8*, na kterém jsou vyobrazeny součásti tkacího stroje. Osnova je navinuta na *osnovním válu*, ze kterého jde přes *osnovní svůrku* do *tkací roviny* přes *křížové činky*, což jsou dvě tyče, které zajišťují nit'ový kříž a znemožňují tak změnu pořadí osnovních nití. Ve tkací rovině jsou navedeny jednotlivé nitě do oček *nitěnek*, které jsou součástí *listů*. Soustava listů se nazývá *listové brdo* a listy se pohybují ve svislém směru a vytvářejí z osnovních nití prostor klínovitého tvaru nazývaný *prošlup*, do něhož je zanášen útek pomocí *člunku*. Za brdem nitě procházejí *paprskem*, který udržuje nitě osnovy v požadované šířce, čímž je zajištěna stejnosměrná hustota osnovních nití. Paprsek je upevněn v *bidle*, které se po průchodu člunku prošlupem pohybuje směrem k čelu tkaniny

a přirazí tak útek ke tkanině. Poté se vrátí do zadní polohy, změní se vzájemná poloha listů a cyklus se opakuje. Poté je tkanina odvedena kolem *prsníku* pomocí *tažného válce* a následně je navíjena na *zbožový vál*. [44]



Obr. 8 Tkací stroj (převzato z [44])

Vzájemný způsob provázání osnovních a útkových nití nazýváme *vazbou tkaniny*. Místo překřížení soustav nití je označováno jako *vazný bod*. Vazba ovlivňuje pevnost, pružnost, tuhost, splývavost, vzhled, tepelnou izolaci, prodyšnost, oděruschopnost a další vlastnosti tkaniny. *Střídou vazby* je provázání nití po osnově i útku, které se ve tkanině pravidelně opakuje. *Dostava tkaniny* je vyjádření počtu osnovních nebo útkových nití na jednotku délky (centimetr nebo 10 centimetrů). [44]

Rozlišujeme tři základní vazby tkanin, z nichž se odvozují další vazby. Základními vazbami jsou *plátno*, *atlas* a *kepr*, jejichž kombinací můžou vzniknout různé další složené vazby. Každá základní vazba má také několik vazeb odvozených.

3.3.1 Plátnová vazba

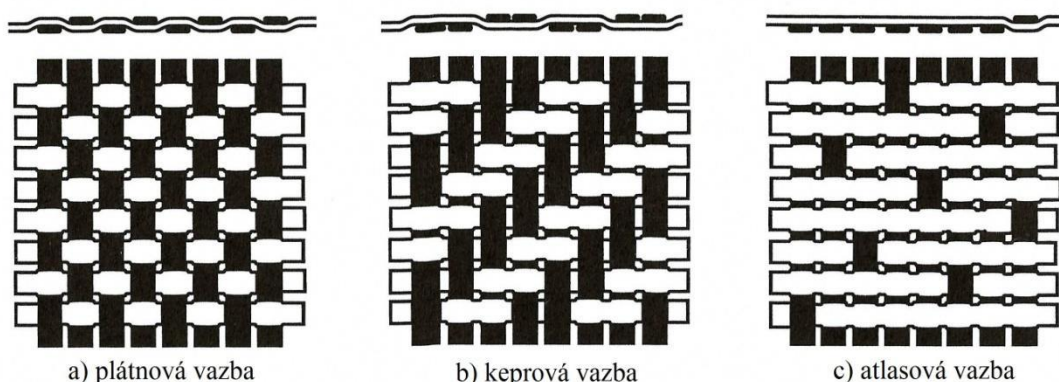
Plátno je nejjednodušším a zároveň nejhustším typem vazby. Útková nit se během tkaní pravidelně střídá vůči osnovním nitím tak, že je vedena nejprve nad jednu osnovní nit a poté pod jednu osnovní nit (viz *Obr. 9 a*). Další útková nit má stejnou pravidelnost, ale začíná nejprve pod osnovní nití. Tento proces se stále opakuje a vzniká tak obrazec šachovnice. Podíl osnovních a útkových vazebních bodů je tedy v poměru 1:1, tudíž rub má stejný vzhled jako líc. Od plátnové vazby se odvíjejí vazby *ryps* a *panama*. [44, 45]

3.3.2 Keprová vazba

Kepr je snadno identifikovatelný podle šikmých souběžných řádků na tkanině. Nejmenší možný kepr je třívazný, který vzniká tak, že útková nit prochází nad dvěma a následně pod jednou osnovní nití. U čtyřvazného kepru dochází ke střídání dvou a dvou osnovních nití (viz Obr. 9 b). Každá další útková nit začíná svůj proplétací proces o jednu nit dříve nebo později oproti předchozí a tím vznikají zmíněné šikmé souběžné řádky. Kepr má mnoho odvozenin jako je *zesílený*, *víceřádkový*, *lomený*, *hrotový kepr* a další. [44, 45]

3.3.3 Atlasová vazba

Atlas má nejmenší počet vazných bodů oproti předchozím vazbám, které se navíc nedotýkají (viz Obr. 9 c). Charakteristický je pro tuto vazbu její hladký povrch a malá odolnost vůči oděru. Nejmenší atlas je pětivazný, kdy je jedna útková nit nad jednou osnovní a čtyři pod ní. Střídání další útkové niti pak probíhá po dvou nebo třech osnovních nitích (podle tzv. *postupového čísla*). Odvozené vazby od této jsou *atlas nepravidelný šestivazný*, *zesílený* nebo *stínovaný*. [44, 45]



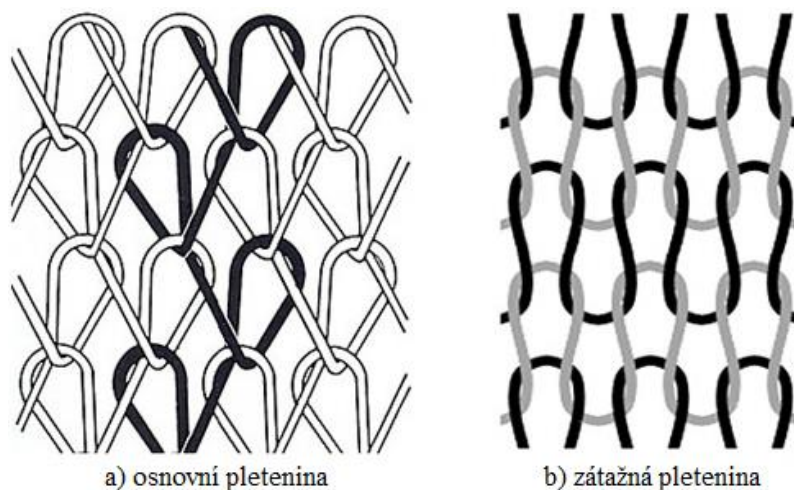
Obr. 9 Základní vazby tkanin (převzato z [46])

3.4 Pletení

Vodivé textilie lze realizovat i pomocí *pletení*. Vodivé pleteniny bývají často používány pro senzory mechanického napětí, kdy princip měření spočívá ve změně elektrického odporu pleteniny. Tyto senzory mohou být použity například k monitorování dechu. [1, 11]

Princip pletení spočívá ve vytváření a vzájemném provlékání ok z nekonečné nitě. Pleteniny mají zpravidla větší roztažnost a prodyšnost, než tkaniny. Pletení lze realizovat ručně, kdy je pletenina vytvořena pomocí alespoň dvou pletacích jehlic. Pro průmyslovou

výrobu je používáno mnoho druhů *pletařských strojů*. Jejich základní rozdělení je podle způsobu pletení na *osnovní* a *zátažné* stroje nebo podle pracovního pohybu na *pletací stroj* a *stávek*. Osnovní pletenina (viz *Obr. 10 a*) se vyznačuje tím, že se nedá párat a vzniká tak, že podélné nitě (osnovní) procházejí pleteninou ve směru sloupců, takže každé oko v řádku pleteniny je vytvořeno ze samostatné nitě. Zátažná pletenina (viz *Obr. 10 b*) je tvořena v řádku vždy jednou nití a je snadné ji párat. [11, 47–49]



Obr. 10 Základní rozdělení pletenin (převzato z [49])

3.5 Nanášení vodivých vrstev na textilie

Vodivé prvky v textiliích nemusí být realizovány jen pomocí vodivých přízí, ale mohou být na textilní substrát naneseny různými aditivními technikami. Mezi ně patří například *sítotisk* nebo *laminace* fólií s vodivými motivy. Na tyto fólie je většinou vodivá struktura nanesena také pomocí *sítotisku*. [50]

Sítotisk je jednoduchý, běžně užívaný proces v elektrotechnice pro výrobu desek plošných spojů, ale stejně tak je užíván v textilním průmyslu pro barevný potisk různých druhů látek. Pro tisk vodivých motivů na textilie je ale užíváno většinou polymerních vodivých past obsahujících částice kovů. Princip *sítotisku* spočívá v protlačování pasty skrz napnuté síto s požadovaným motivem na substrát umístěný pod ním. Výtisky s vodivou pastou musí být následně vytvrzeny. *Sítotiskem* lze dosáhnout čar o šířce 200 μm a tloušťce okolo 10 μm . Nevýhodou použití tohoto procesu v oblasti textilií je zejména odolnost výsledného potisku vůči praní a natahování. [43]

4 Elektrická propojení v textiliích

Hlavním cílem elektrického propojení je realizovat ho tak, aby mělo nízký elektrický odpor a vysokou odolnost vůči širokému rozsahu podmínek, kterým může být vystaveno. Vodivá propojení v textiliích mohou být realizována pevnými kontakty, které nelze odpojit bez zničení kontaktu nebo odnímatelnými (rozebíratelnými) kontakty, jež mohou být opakovaně zapojeny a odpojeny. Rozebíratelné kontakty je ve smart textiliích vhodné použít například tehdy, pokud je součástí textilie elektronické zařízení, u něhož by během čištění nebo praní došlo k poškození. Pevné nerozebíratelné kontakty mají své uplatnění v případech, kdy chceme provést spojení s důrazem na jeho odolnost a není potřeba ho za celou dobu životnosti přerušit. [50]

Nerozebíratelná propojení lze rozdělit do třech kategorií:

- **Tepelné spoje**

Tepelné spoje jsou vytvářeny procesy, během nichž jsou teplem roztaveny materiály, které chladnutím tuhnou a vytvářejí vazby s dalšími materiály. Nevýhodou je vysoká teplota roztavených kovů, která může poškodit textili. Mezi tepelné spoje používané na textilních substrátech patří pájení (*podkapitola 4.1*), odporové svařování (*podkapitola 4.2*) a ultrazvukové svařování (*podkapitola 4.3*). [50]

- **Mechanická upevnění**

Při mechanickém upevňování jsou dva předměty k sobě připevněny pomocí vnější struktury. Mezi tyto struktury se řadí nýty, svorky, šrouby, krimpy a další spojovací materiály. V případě smart textilií je k mechanickému připevnění používáno šití (*podkapitola 4.4*) nebo krimpování (*podkapitola 4.5*). Do této kategorie lze zařadit i laminaci polymerů na textilie. [50]

- **Lepení**

Lepení lze realizovat různými druhy lepidel, které lze rozdělit dle jejich vodivosti nebo způsobu vytvrzování. Na tento způsob spojování je zaměřena *podkapitola 4.6*.

4.1 Pájení

Pájení je proces, při kterém jsou materiály spojovány přídavným materiálem nazývaným pájka. Pájka musí mít nižší teplotu tavení, než spojované materiály, které se během procesu na rozdíl od pájky, netaví. Roztavená pájka je nanášena do místa kontaktu pájených

materiálů, kde dochází k difuzi atomů pájky do těchto materiálů. K pájení v elektronice je používáno takzvaných měkkých pájek, jejichž teplota tavení je nižší, než 500 °C. Dříve byly v oblasti elektroniky používány zejména pájky na bázi cínu a olova, později ale začaly být nahrazovány pájkami bezolovnatými, kvůli zdravotní závadnosti olova. Široce rozšířené jsou v současnosti pájky na bázi cínu, stříbra a mědi (SAC), které mají bod tavení okolo 217 °C. [50–52]

Ve smart textiliích je potřeba používat pájky s ještě nižší teplotou tavení, než mají SAC pájky, aby nedošlo během pájení k poškození textilie. Pájky na bázi india jsou obvykle křehké, drahé a nekompatibilní s pájkami SAC, zatímco olovo je zdravotně závadné. Proto se jako nejvhodnější pro e-textilie jeví pasty Bi-Sn a Bi-Sn-Ag s teplotami tavení okolo 140 °C, jež jsou také poměrně křehké, ale jsou kompatibilní s pájkami SAC. [52]

Výhodou pájených spojů je velmi nízký elektrický odpor. [52] Omezením pro použití pájek v oblasti e-textilií je tuhost textile v pájeném místě. Problémem je také nadměrné ohýbání na rozhraní rigidní části textilie (v místě pájky) a flexibilní části textilie (okolí pájky), kde je zvýšená pravděpodobnost přerušení vodivého spojení. Pájení také není použitelné pro nerezové nitě. Dále může být proces pájení v e-textiliích příliš pomalý nebo obtížný k automatizaci výroby, což vede k vysokým nákladům. [53]

4.2 Odporové svařování

Odporové svařování je realizováno lokálním roztavením svařovaných materiálů díky průchodu elektrického proudu po stanovenou dobu a lokálnímu zvýšenému tlaku. Vznikající teplo je dáno svařovacím proudem I , elektrickým odporem R , časem průchodu proudu t a termální konstantou M , která je funkcí geometrie svařovaných materiálů a svařovací síly. Tuto závislost uvádí vzorec dle [54]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \cdot M \quad (3)$$

Elektrický odpor v uvedeném vzorci je složen z několika dílčích odporů, jako je odpor elektrod, kontaktní odpor mezi elektrodami a svařovaným materiálem a kontaktní odpor mezi svařovanými materiály. Kovy jako měď, zlato a stříbro se za běžných podmínek taví

za teplot okolo 1000 °C. Při lokálním použití zvýšeného tlaku na budoucí spoj je možné snížit teplotu potřebnou k roztavení kovů na hodnotu okolo 300 °C. [50, 52, 54]

Dle zdrojů [1, 54] je odporové svařování jednou z nejlepších metod pro vytvoření bodového propojení vodivých přízí, a to zejména díky jeho jednoduchosti a minimálnímu poškození okolních nevodivých vláken. Spojení vytvořená odporovým svařováním nejsou tak rigidní jako je tomu v případě pájení. [1, 54]

4.3 Ultrazvukové svařování

Ultrazvukové svařování využívá mechanického kmitání o vysoké frekvenci. Součástí zdroje kmitání je *ultrazvukový měnič* napájený elektronickým vysokofrekvenčním generátorem proudu. Na měnič je připojen *vlnovod* zesilující amplitudu kmitání zakončený *sonotrodou*, která je přitlačována silou do místa spoje, kde přenáší vibrace do spojovaného materiálu. Svařované materiály jsou k sobě přitlačeny, kdy jeden materiál je pevně fixován, zatímco druhý je rozkmitán. Na rozhraní materiálů tak dochází ke tření, které u kovů vede k lokální plastické deformaci za relativně malého zvýšení teploty a výslednému metalurgickému spojení. U termoplastů dochází k natavení polymerů a tlakem sonotrody se obě součásti svaří. Pro spojování kovů jsou většinou používány frekvence od 20 kHz do 40 kHz, zatímco u plastů je to 20 kHz až 70 kHz. [50, 52, 55]

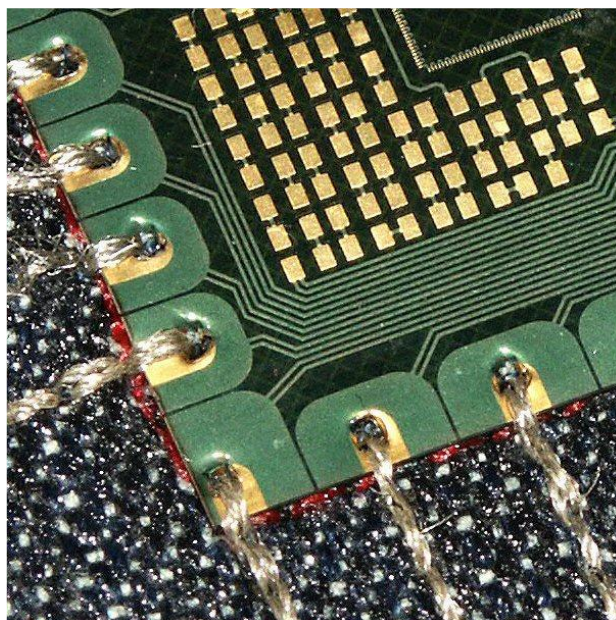
Ultrazvukem lze spojovat materiály s velkou tepelnou vodivostí (měď, hliník), materiály s rozdílným tepelným odporem (například měď s železem), materiály s ochrannými vrstvami na povrchu, barevné kovy a jejich legování nebo také plastické hmoty a fólie. Ultrazvukem lze svařit hliník a jeho slitiny s téměř všemi kovy. Velmi širokou svařitelnost má také měď, železo, stříbro nebo molybden. Naopak nevhodící se pro svařování ultrazvukem jsou materiály obsahující olovo, zinek nebo cín. Svařování plastů ultrazvukem je vhodné zejména pro termoplasty, díky jejich nízké teplotě tavení a nízkému tlumení ultrazvukových kmitů. [55]

Hlavní výhodou svařování ultrazvukem je rychlost, velké množství aplikací a malá spotřeba energie. Naopak nevýhodou je potřeba přesné úpravy stykových ploch před svařováním. Výhody oproti odporovému svařování jsou zejména v nižší teplotě a absenci jiskření. Pořizovací cena odporových svařovaček je ale značně nižší než ultrazvukových.

4.4 Šití

Dva elektricky vodivé materiály jsou k sobě přišity vodivou nití, čímž vzniká elektricky vodivý kontakt. Tento kontakt je zajištěn kontaktní vodivostí povrchů spojovaných materiálů a vodivé nitě a také jejím napnutím. Během užívání textilie dochází k jejímu ohýbání a napínání a to způsobuje změny těchto parametrů. Vodivost kontaktu je tedy značně proměnlivá. V porovnání vůči výše zmíněným možnostem kontaktování, sešíváním není vytvořen tak dobrý elektrický kontakt jako je tomu v případě metalurgického spojení. Výhodami jsou vysoká mechanická pevnost, nízké náklady a do určité míry možnost čištění nebo praní. [52]

Torsten Linz [56] se ve své disertační práci zabývá problematikou kontaktování v textiliích pomocí šití. Zkoumá zde vhodnost jednotlivých typů přízí pro realizaci vodivých kontaktů a také nastavení parametrů vyšívacích strojů. Poukazuje zde na problematiku nestálosti vyšitého vodivého kontaktu a navrhuje možnosti jak dosáhnout stabilnější hodnoty kontaktu. Navrhuje zde zapouzdření místa kontaktu flexibilním termoplastickým polyuretanem, který se roztaví během vytváření spoje a po ztuhnutí poskytne trvalý kontakt a zároveň i jeho ochranu. Příklad elektrického kontaktu provedeného šitím lze vidět na *Obr. 11*. [56]



Obr. 11 Elektricky vodivý kontakt mezi flexibilní deskou plošného spoje a vodivou nití vytvořený šitím (převzato z [56])

4.5 Krimpování

Krimpování se běžně v elektrotechnice používá ke spojení vodičů s konektorem. Proces probíhá tak, že vodič je vložen do svorky konektoru, která je následně deformována za vysokého tlaku vyvíjeného *krimpovacími kleštěmi* tak, že dochází k pevnému mechanickému spojení mezi svorkou a vodičem. [52] Během procesu dochází i k deformaci samotného vodiče, což vede k plynotěsnému kontaktu mezi svorkou a vodičem, tudíž zde nedochází k oxidaci. Dle *Christine Kallmayer a Erika Simona* [57] je potřeba vyvinout na vodivé nitě mnohem vyšší sílu pro dosažení stejně dobrého kontaktu jako je tomu u konvenčních vodičů. [57] Vodivé příze kontaktované krimpováním lze vidět na *Obr. 12*.

Simon a kol. [58] představili nové pouzdro pro integraci plošných spojů do textilií pomocí krimpování. Pouzdro nese název *Crimp Flat Package (CFP)* a je podobné konvenčnímu pouzdru *Quad Flat Package (QFP)*, ale místo standardních pinů má krimpovací vývody, ke kterým lze připojit vodivé příze. Velikost tohoto pouzdra je 2 cm na 2 cm a má 10 vývodů. [50, 58]

Krimpování přináší výhodu pro spojování izolovaných nití, protože během procesu je působením mechanické síly zničena izolační vrstva nitě, kterou tedy není potřeba odstraňovat před samotným krimpováním. [57] Dalšími výhodami jsou používání standardních výrobních technologií a zejména nízká teplota během spojování. [58]



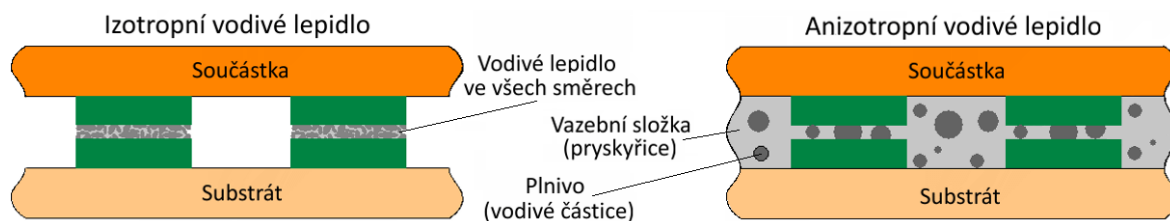
Obr. 12 Kontakty vytvořené krimpováním pro snímač tlaku v sedadle (převzato z [57])

4.6 Lepení

Dle *Lochera [52]* lze používaná lepidla v textiliích rozdělit na izotropní vodivá, anizotropní vodivá a nevodivá. Izotropní lepidla jsou vodivá ve všech směrech oproti anizotropním, která jsou vodivá pouze v jednom směru vůči substrátu. Jak již z názvu plyne, nevodivými lepidly vodivá propojení realizovat nelze, ale je možné jimi zafixovat vodivá propojení realizována jiným způsobem. [52] Rozdílný způsob vodivosti izotropních a anizotropních lepidel je dán hustotou a velikostí vodivých částic v lepidle, jak lze vidět na *Obr. 13*.

Izotropní vodivá lepidla jsou většinou dvousložkové epoxidové pryskyřice používající se v solárních článkách, LED diodách nebo radiofrekvenčních obvodech na keramických substrátech. Obsahují stříbrné částice a to z osmdesáti až devadesáti procent, což způsobuje jejich vysokou cenu. Obvykle jsou vytvrzovány teplem při teplotě okolo 150 °C nebo UV světlem a to po dobu několika minut až hodin. U teplem tvrditelných lepidel se zvyšující teplotou a dobou tvrzení zvyšuje vodivost, která může být dokonce podobná jako při použití pájky, ovšem za cenu vyšší křehkosti. Podle parametrů mohou být lepidla určena pro dispenzní procesy, šablonový tisk nebo sítotisk. Nevýhodou izotropních lepidel je, že nejsou schopna narušit oxidové vrstvy na spojovaných materiálech, tak jako je to možné při procesu pájení. [52]

Podle *Mehmann a kol. [50]* se rozdělují lepidla do kategorií podle způsobu tvrzení. U prvních je vytvrzení dosaženo zchlazením lepidla. V druhém případě dochází k chemické reakci, která je vyvolána například smícháním složek dvousložkového lepidla. Třetí kategorii tvoří lepidla, která jsou vytvrzována odpařením vody nebo rozpouštědla. Pro textilie se nejčastěji používají polymerní lepidla obsahující vodu. Jelikož textilní substrát může být citlivý na teplo, je použití epoxidu výhodnější než použití pájky.



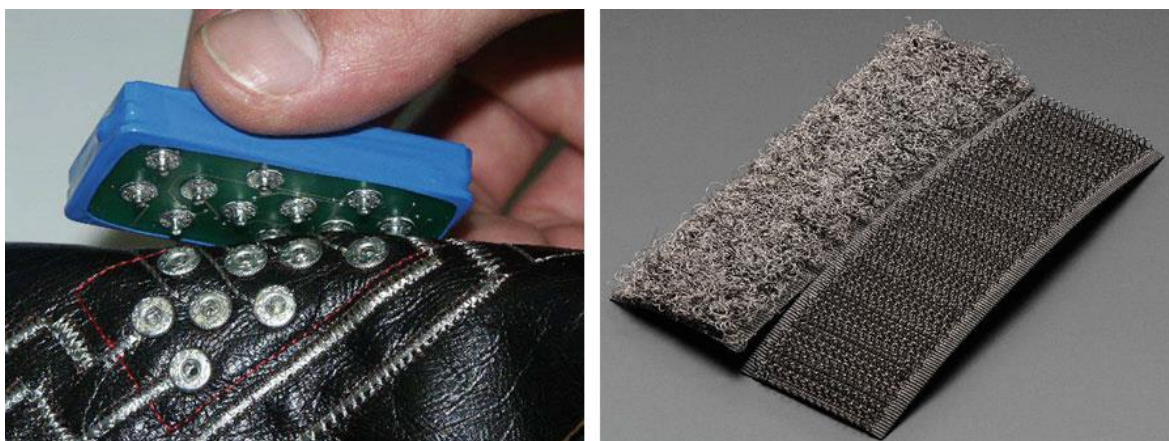
Obr. 13 Rozdíl v principu vodivosti izotropního a anizotropního vodivého lepidla (překresleno podle [59])

4.7 Rozebíratelná propojení

Rozebíratelná spojení lze realizovat například pomocí *stiskacích knoflíků*, častěji nazývaných *patentkami* nebo *druky* (viz *Obr. 14*). K textiliím je lze připevnit nýtováním nebo šitím a jejich kontakt s vodivými přízemi lze realizovat i dalšími nerozebíratelnými metodami popsány výše. Rozebíratelný kontakt je tvořen *hlavicí* na jedné textilii, která se zacvakne do *patice* na druhé textilii. Velkou výhodou tohoto spojení je možnost snadného a rychlého připojení nebo odpojení. [50, 53]

Další možností je například *vodivý suchý zip* (viz *Obr. 14*), jehož kontakt probíhá přes zaháknuté háčky jedné části kontaktu do smyček druhé části. Elektrický odpor kontaktu po každém cyklu rozepnutí a zapnutí je ovšem značně proměnlivý, protože se pokaždé spojí jiný počet háčků a smyček, takže je potřeba použít velkou plochu, aby byl kontakt co nejlepší. Velice rychle také dochází k opotřebení a odlupování vodivé vrstvy a kvalita kontaktu se tak postupně zhoršuje. Technologie je především používána pro stínění a není určena pro vysoké proudy. [50, 52]

Dalšími možnostmi rozebíratelných kontaktů, které uvádí *Matija Varga* v knize *Smart Textiles - Fundamentals, Design, and Interaction* [50] jsou například magnetické konektory nebo vodivé zipy. [50]



Obr. 14 Rozebíratelné kontakty realizované pomocí druků (vlevo) a pomocí suchého zipu (vpravo) (převzato z [50])

5 Návrh a testování elektricky vyhříváných textilií

Cílem této práce bylo navrhnout, nechat vyrobit a otestovat elektricky vyhřívanou textilií, kterou lze použít jak pro demonstrační účely, tak v praxi, a zároveň u ní i po větším množství pracích cyklů zachovat její původní elektrické a vyhřívací vlastnosti. Použitím v praxi je myšleno použití e-textilie jako součásti oděvu během běžné činnosti uživatele. Praktické využití nacházejí vyhřívání textilie zejména ve venkovním prostředí, kde se užívají v širokém spektru teplot až po extrémní mrazy. Lze je ale využít i v interiérech s nižší teplotou, než je komfortní teplota uživatele. Pro běžné nošení stačí, aby vyhřívání textilie poskytovala vytápění s teplotami podobnými přirozené lidské teplotě, tedy přibližně v rozmezí 35 °C až 40 °C. V chladném prostředí bude taková textilie pocitově vnímána jako teplá. Pokud ovšem budeme chtít ověřit krátkodobým fyzickým kontaktem (například přiložením dlaně) při běžné pokojové teplotě, že je textilie vyhřívána, pravděpodobně mezi vyhřívání textilií s touto teplotou a nevyhřívání textilií nepocítíme rozdíl.

Pokud chceme za pokojových podmínek demonstrovat výhřevnost e-textilie, jež bude zúčastněnými testována právě dotykem dlaně, je vhodné, aby byla její teplota dostatečně rozdílná oproti okolnímu prostředí. Samozřejmě teplota nesmí být příliš vysoká, aby nehrozilo popálení kůže. Při kontaktu pokožky s kovem o konstantní teplotě po dobu deseti sekund dochází k popáleninám prvního stupně při teplotách přesahujících 53 °C. Naopak při dlouhodobém kontaktu s teplým předmětem (v řádu hodin) dochází k popáleninám prvního stupně již při teplotách přesahujících 43 °C. [60, 61]

V této práci byly navrženy celkem tři motivy pro dva různé textilní substráty, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

5.1 Výběr vyhřívání oblasti těla a požadavky na navrhované textilie

Jak již bylo zmíněno v *podkapitole 2.4*, existují e-textilie zaměřené na vyhřívání různých částí lidského těla. V této práci byly navrženy e-textilie, které lze použít pro vyhřívání bederní oblasti zad. Vyhříváním bederní oblasti dochází k ohřívání ledvin, které slouží k odstraňování nečistot z krve. Za minutu proteče ledvinami okolo 1,2 litru krve. [2] Vyhřívání této oblasti se tedy zdá být vhodné pro rozvedení tepla do celého těla pomocí krevního oběhu.

Dalšími požadovanými vlastnostmi navrhované e-textilie v této práci je pohodlí uživatele, a zároveň, aby e-textilie vykazovaly elektrické vlastnosti srovnatelné s původními i po dlouhodobém užívání a praní. Velká část elektricky vyhříváných textilií na trhu je vybavena konvenčními vodiči, jež nejsou příliš ohebné a nemají téměř žádnou možnost prodloužení jejich délky natažením. Jen některé takové výrobky lze prát v pračce, a to pouze za podmínek šetrného praní.

Na základě zmíněných požadavků byly navrženy textilní vzorky využívající nití s vodivými vlákny, jež díky svým textilním vlastnostem poskytují značně vyšší komfort než konvenční vodiče. Měly by také být více odolné vůči běžnému užívání a praní, než je tomu právě u konvenčních vodičů, a to zejména díky vysoké flexibilitě a možnosti jejich natahování.

5.2 Použité textilní materiály

Vyrobené vzorky v této práci byly ze dvou druhů pletenin pletených na okružním jedolůžkovém pletacím stroji *Relanit 2.4 SE* od společnosti *Mayer & Cie*, jehož průměr činí 76 cm a je do něj možno zavést až 36 systémů. Rychlost stroje byla pro výrobu obou pletenin nastavena na 16 otáček za minutu.

5.2.1 Pletenina typu A

První použitou textilií pro praktickou část této práce je tzv. krytá pletenina obsahující dva druhy nevodivých nití a jeden druh hybridní vodivé nitě. Materiálem první nevodivé nitě je modal, což je přírodní viskóza získávaná z celulózy bukového dřeva. Modal se vyznačuje hladkým a jemným povrchem, velmi dobrou prodyšností, nasákavostí a pružností. [62] U této textilie byla použita příze ze staplových modalových vláken s jemností 200 dtex. Druhá nevodivá nit je z třiceti šesti polyesterových hedvábných vláken o jemnosti 75 dtex. Vodivá hybridní nit (v dalším textu uváděné jako *Cu/Ag*) byla vyrobena společností *VÚB a.s.* a je složena z osmi drátků postříbřené mědi o průměru 20 μm a devadesáti devíti vláken polyesterového hedvábí o průměru 14 μm . Tato nit má jemnost 440 dtex a vykazuje elektrický odpor 7,42 Ω/m .

Základní strukturou této textilie je hladký jedolící krytý úplet o šíři 180 cm s plošnou hmotností 170 g/m^2 . Základní úplet je tvořen z 25 % polyesterovým hedvábím a ze 75 %

přízemi z modalového vlákna. Do této struktury bylo vpleteno pět řádků vodivé hybridní nitě vytvářejících tmavé vodivé proužky. Tyto proužky jsou odděleny čtrnácti řádky nevodivé modalové nitě, čímž mezi proužky vzniká vzdálenost přibližně 8 mm. Pletenina je z rubové strany krytá polyesterovými nitěmi, čímž by z této strany mělo být za běžného užívání v praxi zabráněno náhodným vodivým spojením vodivých pruhů. Tato pletenina je pro přehlednost v pozdějším textu označována také jako „pletenina typu A“.

5.2.2 Pletenina typu B

Druhou textilií je krytá pletenina ze dvou druhů nevodivých nití na bázi syntetických materiálů a jedné vodivé nitě. První nevodivá nit je z polypropylenových vláken, která se vyznačují svojí velmi nízkou hustotou, hmotností a navlhavostí. Tato vlákna jsou také velmi odolná vůči chemikáliím a oděru. [63] V pletenině byla použita nit s jemností 560 dtex seskaná ze dvou přízí o třiceti třech vláknech. Druhou nití je stejně jako u první pleteniny polyesterové hedvábí s třiceti šesti vlákny o jemnosti 75 dtex. Vodivé nitě jsou v tomto případě tvořeny polyamidovými vlákny chemicky pokovenými stříbrem o tloušťce několika stovek nanometrů. Tyto nitě od společnosti *R.STAT* nesou název *SilveR.STAT* a jsou složeny z dvaceti čtyř vláken o jemnosti 110 dtex.

Základní strukturou textilie je i v tomto případě hladký jednolící krytý úplet o šíři 180 cm s plošnou hmotností 170 g/m². Základní úplet zde tvoří z 38 % polyesterové hedvábí a z 62 % polypropylenové hedvábí. Do struktury bylo vpleteno pět řádků nitě *SilveR.STAT* vytvářejících tmavé vodivé proužky, které jsou odděleny čtrnácti řádky nevodivé polypropylenové nitě, čímž je rozestup mezi proužky přibližně 8 mm. Z rubové strany je pletenina kryta polyesterovými vlákny, aby během užívání nedocházelo k náhodným vodivým spojením vodivých pruhů. Tato pletenina je pro přehlednost v pozdějším textu označována také jako „pletenina typu B“.


5.3 Napájecí jednotka

Klíčovým parametrem pro návrh struktury e-textilií byly parametry napájecího zdroje. S ohledem na možnost použití textilií jako vyhřívání bederního pásu bylo žádoucí použít pro napájení zdroj takový, kterým by uživatel nebyl limitován na použití pouze v interiéru, kde při napájení ze sítě uživatele omezuje zejména délka přívodního kabelu. Bylo tedy zvoleno napájení jednotkou s akumulátorem.

Důležitými parametry pro volbu přenosného napájecího zdroje jsou velikost, hmotnost, umístění v oděvu a kapacita. Aby bylo použití vyhřívání e-textilie pro uživatele pohodlné, je potřeba použít zařízení umístěné v oděvu tak, aby uživatele omezovalo co nejméně. To souvisí s tím, že by zařízení mělo mít co nejmenší rozměry a také co nejnižší hmotnost. Při snižování těchto dvou parametrů ale dochází také ke snižování kapacity, kterou je naopak žádoucí mít co nejvyšší, a to zejména proto, aby byl akumulátor schopný dodávat do e-textilie elektrickou energii po co nejdelší dobu. Vyšší kapacitou může být také prodloužena životnost baterie díky tomu, že by baterii nemělo být potřeba tak často dobíjet. Časté dobíjení škodí akumulátoru, a navíc je to další omezení pro uživatele.

Pro tuto práci byla vybrána komerčně dostupná napájecí jednotka od společnosti *Belginova NV*, která tuto jednotku využívá k napájení svých vyhříváních výrobků prodávaných pod značkou *30seven*. Tato jednotka obsahuje lithium-iontový akumulátor a poskytuje čtyři úrovně intenzity vyhřívání, což je pro účely této práce výhodné s ohledem na požadavek vyšší teploty pro demonstrační účely a nižší teploty pro užívání v praxi. Další výhodou pro užívání v praxi jsou rozměry této jednotky, díky kterým ji lze umístit do kapsy téměř jakéhokoliv běžně užívaného oděvu. Dále je jednotka vybavena ochranou proti zkratu. *Tab. 3* uvádí další její parametry.

Tab. 3 Parametry napájecí jednotky značky 30seven od společnosti Belginova NV (převzato z [64])

	Kapacita	2600 mAh
	Výstupní napětí	7,4 V
	Hmotnost	108,1 g
	Rozměry	70 mm x 42 mm x 22 mm
	Počet nabíjecích cyklů	Alespoň 1000
	Doba nabíjení	Přibližně 4 až 5 hodin

Na základě měření bylo zjištěno, že napájecí jednotka poskytuje obdélníkový signál a na základě vybrané úrovně se mění její střída při zachování amplitudy výstupního napětí. Jedná se tedy o řízení PWM modulací. Pro režim s nejnižší úrovní výhřevnosti označovaný na jednotce jako „25 %“ byla naměřena střída 22,9 %, pro režim „50 %“ střída činila 47,9 %, pro režim „75 %“ to bylo 74,5 % a pro režim „100 %“ s nejvyšší výhřevností byla střída 97,8 %. Amplituda výstupního napětí je značně závislá na zátěži, jedná se tedy o poměrně měkký zdroj.

5.4 Navrhnuté motivy elektricky vyhříváných textilií

Jak již bylo zmíněno výše, byla snaha navrhnout textilii, kterou lze použít jak pro demonstraci vyhříváných e-textilií, tak pro užívání v praxi. Pro demonstrační účely bylo stanoveno vhodné teplotní rozmezí na 45 °C až 80 °C. Z důvodu nízkého objemu vodivých nití dochází při kontaktu s pokožkou k rychlému odvedení teploty z povrchu textilie, a tak při krátkodobém kontaktu nehrozí pro tato teplotní rozmezí popálení pokožky. Pro užívání v praxi bylo stanoveno vhodné teplotní rozmezí na 35 °C až 40 °C.

Na základě parametrů zdroje a změřených hodnot vodivých pruhů pletenin byly navrženy tři motivy. Jako sběrnice k propojení vodivých pruhů byla použita pružná vodivá stuha se čtyřmi vodivými pruhy. Tato vodivá stuha byla kontaktována k textilii přišitím za použití hybridní vodivé nitě složené z polyesterových hedvábných vláken a osmi drátků postříbřené mědi s průměrem 30 µm. Tato nit má celkovou jemnost 777 dtex a její odpor na jeden metr délky činí 2,85 Ω. Byl požadavek, aby vodivá stuha měla co nejvyšší vodivost, protože jinak by zejména v místech s vysokou proudovou hustotou docházelo k jejímu nadměrnému ohřívání. Z toho důvodu byly všechny čtyři vodivé pruhy propojeny během šití vodivou nití. Místa, kde je potřeba stuhu kontaktovat s textilí vodivými nitěmi, jsou v návrzích naznačena červenou barvou.

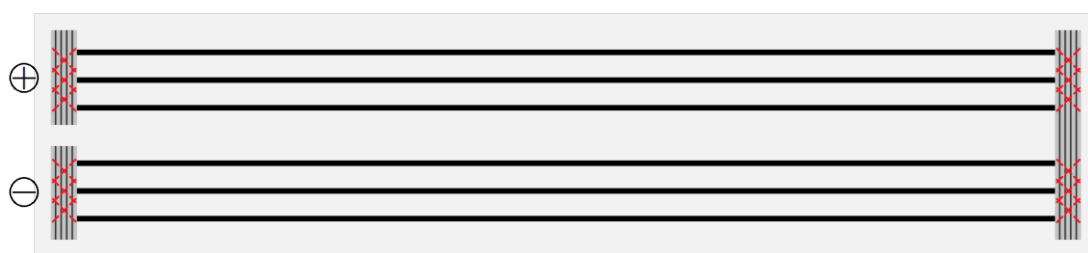
Pro první sérii testů byly vytvořeny tři textilní vzorky se třemi rozdílnými motivy, a to konkrétně vzorky *A1*, *B1* a *B2*. Na základě výsledků měření po první sérii testů (viz *podkapitola 6.1*) byly vytvořeny další dva vzorky (*A2* a *A3*) pro *pletenu* typu *A* se stejným motivem jako má *vzorek A1*. Pro přehlednost jsou základní parametry jednotlivých vzorků uvedeny v *Tab. 4*. Detailněji jsou jednotlivé motivy popsány v následujících podkapitolách.

Tab. 4 Základní parametry vytvořených vzorků

Vzorek	Materiál pleteniny	Vodivé nitě	Počet vyhřívacích pruhů	Rozměry [mm]
<i>A1, A2, A3</i>	<i>Modal + PES</i>	<i>PES + Cu/Ag</i>	6	400 x 70
<i>B1</i>	<i>PP + PES</i>	<i>SilveR.STAT</i>	40	470 x 55
<i>B2</i>	<i>PP + PES</i>	<i>SilveR.STAT</i>	20	220 x 75

5.4.1 Navržený motiv pro vzorky A1, A2 a A3

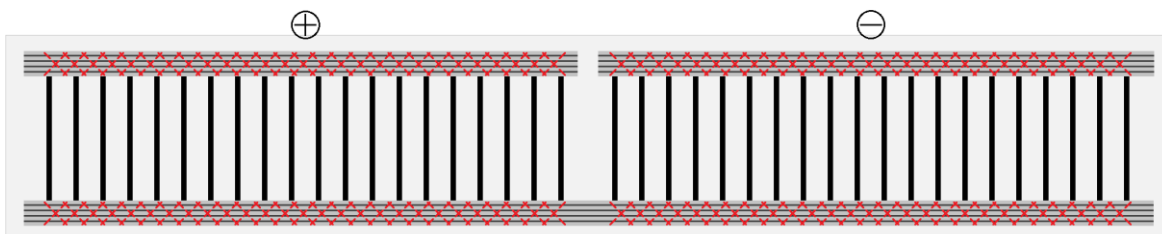
Pro vzorky z *pletiny typu A* s *Cu/Ag* hybridní vodivou nití byl navržen motiv (viz *Obr. 15*) s délkou každého vodivého pruhu 400 mm a celkovou šířkou 70 mm. Napájení textilního vzorku bylo navrženo z jedné kratší strany (viz levá část *Obr. 15*), kde je zdroj kontaktován se sběrnými elektrodami v podobě vodivých stuh. Z přívodní sběrnice je proud rozdělen do třech paralelních větví, které se spojují na druhé straně textilie, odkud je opět rozdělen na tři paralelní větve. Z toho plyne, že největší proudová hustota bude uprostřed vodivé stuhy propojující obě tyto části (viz vpravo uprostřed na *Obr. 16*). Vzorky vyrobené na základě tohoto návrhu jsou v dalším textu označovány „A1“, „A2“ a „A3“.



Obr. 15 Navržený motiv pro vzorky vyhřívání e-textilie z *pletiny typu A* se šesti vyhřívacími pruhy (vzorek A1, A2 a A3)

5.4.2 Navržený motiv pro vzorek B1

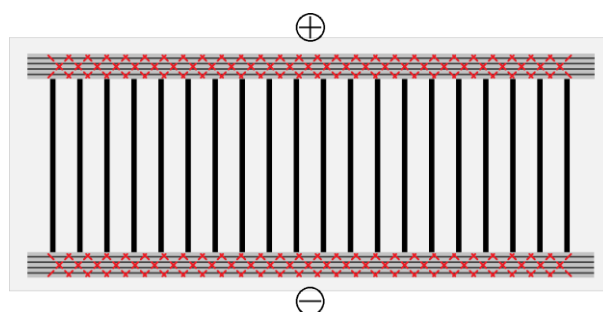
Druhý motiv (viz *Obr. 16*) byl navržen pro *pletinu typu B* s vodivými nitěmi *SilveR.STAT*, kde se obě napájecí sběrnice nacházejí na stejné podlouhlé straně motivu. Z první napájecí sběrnice se proud dělí do dvaceti větví, které se spojují do sběrnice na druhé straně textilie, odkud proud pokračuje dalšími dvaceti větvemi do druhé napájecí sběrnice. Proudová hustota tak bude opět nejvyšší v prostřední části propojující stuhy (na *Obr. 16* dole uprostřed). Délka vodivých pruhů mezi sběrnicemi činí 55 mm a celková šířka vytápěné plochy je 470 mm. Vzorek vyrobený na základě tohoto návrhu je v dalším textu označován jako „vzorek B1“.



Obr. 16 Navržený motiv pro vzorek vyhřívání e-textilie z *pletiny typu B* se čtyřiceti vyhřívacími pruhy (vzorek B1)

5.4.3 Navržený motiv pro vzorek B2

Třetí motiv (viz Obr. 17) byl navržen pro stejnou pleteninu, jako předchozí, tedy pleteninu typu B s vodivými nitěmi *SilveR.STAT*. Zde jsou použity pouze dvě vodivé stuhky na podlouhlých stranách pleteniny a obě slouží jako napájecí sběrné elektrody. Nejvyšší proudové hustoty by zde měly být v místech připojení napájení, ale nemělo by zde docházet k tak velkému proudovému zatížení jednoho místa stuhy jako je tomu u předchozích dvou motivů. Předpokládaná teplota je zde značně vyšší, než u předchozích dvou pletenin z důvodu vyššího předpokládaného proudu jednotlivými větvemi. Délka vodivých pruhů mezi sběrnicemi činí 75 mm a celková šířka vytápěné plochy je 220 mm. Vzorek vyrobený na základě tohoto návrhu je v dalším textu označován jako „vzorek B2“.



Obr. 17 Navržený motiv pro vzorek vyhřívání e-textilie z pleteniny typu B s dvaceti vyhřívacími pruhy (vzorek B2)

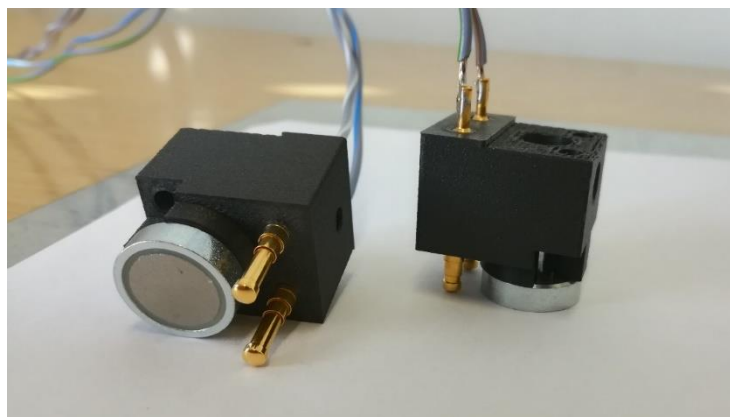
5.5 Použité přístroje a ověřování parametrů vyrobených vzorků

Parametry textilních vzorků byly ověřovány nejprve měřením elektrického odporu vodivých motivů a následně snímáním teplot jejich povrchu po připojení k napájecí jednotce značky *30seven* pomocí termokamery značky *FLIR*. Během snímání teplot byl také měřen proud a napětí poskytované napájecí jednotkou. Měření probíhala při pokojové teplotě 21 °C a relativní vlhkosti 50 % s výkyvy ± 10 %. Následující podkapitoly popisují tato měření a použité přístroje.

5.5.1 Měření odporu

Měření odporu vodivých motivů e-textilních vzorků bylo prováděno laboratorním přístrojem *Keithley 2701*. Odpor byl měřen čtyřbodovou metodou, která je vhodná k měření velmi malých odporů, a to z důvodu minimalizace chyby způsobené přírodními vodiči měřících sond. K minimalizaci chyby dochází díky tomu, že dva vodiče slouží pro přivedení proudu a dalšími dvěma je měřen úbytek napětí na vzorku. [65] Během měření byl textilní

vzorek volně položen na feromagnetické podložce pokryté izolantem. Během měření jsou měřicí jehly zafixovány na požadované místo vzorku pomocí magnetů, které jsou součástí měřících sond. Navíc měřicí jehly jsou pružinové, čímž je zajištěn konstantní přítlak s vodivými nitěmi, a vzniká tak kvalitní elektrický kontakt. Měřicí sondy jsou zobrazeny na Obr. 18.




Obr. 18 Měřicí sondy pro čtyřbodové měření odporu

5.5.2 Měření teploty povrchu

Teploty povrchu textilií byly měřeny termokamerou *FLIR i7*, která disponuje displejem s rozlišením 140 pixelů na 140 pixelů. Její další parametry jsou uvedeny v Tab. 5. Při měření byla na termokameře nastavena emisivita měřeného povrchu na hodnotu 0,95. Přesnost měření termokamerou je zkreslena kromě nepřesnosti udávané výrobcem také právě nastavením emisivity, protože ta je pro klasická textilní vlákna pravděpodobně vyšší než pro pokovená.

Tab. 5 Parametry termokamery *FLIR i7* (převzato z [66])

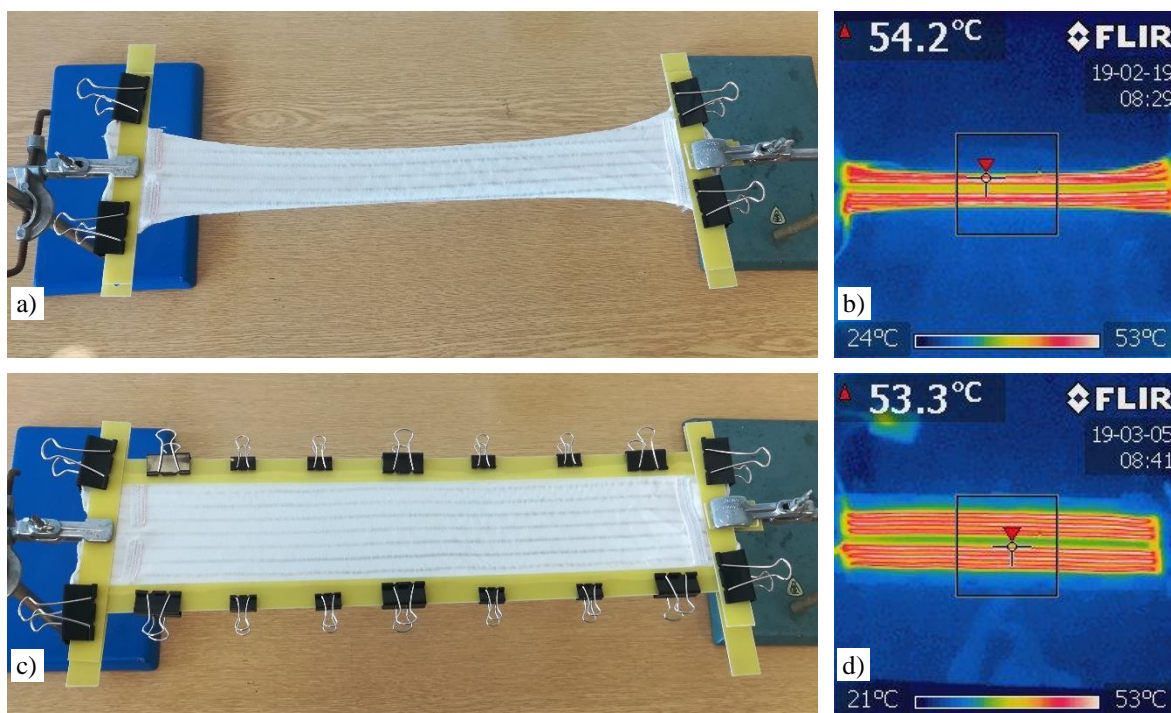
	Rozlišení senzoru	140 pixelů x 140 pixelů
	Teplotní citlivost při 25 °C	< 0,1 °C
	Přesnost	± 2 % nebo 2 °C
	Teplotní rozsah	- 20 °C ... + 250 °C
	Zorné pole	29° x 29°

Z důvodu snahy minimalizace přestupu tepla mezi vyhřívacími elementy textilie a okolními objekty byl pro měření teploty povrchu textilie proveden následující postup.

Na každý textilní vzorek byly po obou jeho kratších stranách umístěny dvě sklo-epoxidové lišty, mezi kterými byly za pomoci kancelářských kovových klipů sevřeny

okraje textilie. Tyto lišty byly poté uchyceny do laboratorních stojanů přibližně dvacet centimetrů nad deskou stolu. Textilie byly uchyceny v horizontální poloze, aby měření nebylo ovlivněno vzhůru stoupajícím teplým vzduchem. Zároveň bylo měření značně přesnější, než kdyby textilie volně ležela na podložce a docházelo tak k odvádění tepla kondukcí. Následně byly vzorky připojeny k napájecímu zdroji značky *30seven*, na kterém byla zvolena nejvyšší úroveň napájení (režim „100 %“). Připojení bylo realizováno pomocí krokosvorek na okrajích vodivých stuh nebo pomocí lisovacích druků u textilií, které jimi byly opatřeny. Jako dostatečná doba k ustálení teploty byl stanoven čas pěti minut, po kterém byl vzorek vyfotografován termokamerou. Jediná výjimka nastala u vzorku *B2*, kde docházelo před prvním pracím cyklem k vypínání jednotky z důvodu příliš vysokého proudu (viz *podkapitola 0*), a proto byla vyfotografována již po dvaceti sekundách.

Po prvním pracím a sušícím cyklu (viz *podkapitola 5.6.1*) se začaly všechny vzorky z první série (*A1*, *B1* a *B2*) na jejich okrajích ohýbat, což u vzorku *A1* vedlo k zamezení možnosti zachytit jediným snímkem termokamery celou lícovou stranu (viz *Obr. 19 a, b*). Bylo proto potřeba uchytit tento vzorek do sklo-epoxidových lišt po celém svém obvodu (viz *Obr. 19 c, d*). Toto opatření bylo poté prováděno i u všech dalších vzorků *pleteniny typu A*. U vzorků *pleteniny typu B* ohyb okrajů nezasahoval do vyhřívací oblasti, takže u nich zmíněné opatření nebylo potřeba.



Obr. 19 Vzorek *A1* po prvním pracím cyklu *a, b*) při uchycení do lišt na dvou stranách; *c, d*) při uchycení do lišt po celém obvodu

5.5.3 Měření napětí a proudu

Během měření teploty povrchu textilních vzorků byl mezi napájecí jednotku a vzorek zapojen do série digitální multimetr *FLUKE 179* vybavený funkcí True RMS, kterým byla měřena efektivní hodnota proudu procházejícího vzorkem.

Paralelně k textilnímu vzorku byl připojen digitální osciloskop *Agilent Technologies DSO-X 2002A*, kterým byl snímán průběh napětí na vzorku. Tento přístroj umí z naměřených hodnot spočítat, mimo jiné, efektivní hodnotu napětí, která z něj byla odečítána.

5.6 Testy provedené na vyrobených vzorcích

Testy provedené na vyrobených vzorcích byly rozděleny do dvou sérií. V první sérii byly vyrobeny vzorky *A1*, *B1* a *B2*, které byly testovány na odolnost vůči pracím a sušicím cyklům. Na základě výsledků první série testů (viz *podkapitola 6.1*) byly vyrobeny vzorky *A2* a *A3*, které měly identické parametry jako *vzorek A1* a navíc byly opatřeny lisovacími druky pro snazší připojení vzorků k napájecí jednotce. Na *vzorku A2* byl proveden test na odolnost textilie vůči opakovanému ohýbání a na *vzorku A3* byl proveden test na odolnost vůči opakovanému natahování o dvacet procent délky.

Detaily provedených testů popisují následující podkapitoly.

5.6.1 Praní a sušení

Textilní vzorky byly podrobeny testům na jejich odolnost vůči praní v automatické pračce a sušičce. Kontrolní měření parametrů textilních vzorků bylo provedeno před prvním praním a dále po jednom, dvou, pěti, deseti, dvaceti a třiceti pracích a sušicích cyklech. Pro praní byl zvolen program „*Syntetika*“ při teplotě 40 °C a při rychlosti 400 otáček za minutu pro odstředování. V bubnu pračky byly vždy dva kilogramy prádla a bylo použito 60 ml pracího prostředku *Bonux 3v1*. Pro sušení byl použit šetrný program „*Syntetika extra*“, při kterém se teplota pohybuje do 60 °C. Tyto testy jsou u e-textilních produktů klíčové z hlediska jejich životnosti a stability parametrů. A to zejména proto, že praní a sušení jsou běžné procesy, kterým jsou textilie během jejich životnosti vystavovány, a navíc během těchto procesů dochází u textilií k namáhání jak mechanickému, tak i tepelnému a chemickému.

5.6.2 Ohýbací a natahovací testy

Textilní vzorky byly podrobeny testům na odolnost vůči cyklickému ohýbání a natahování prováděným na bend testeru (viz *Obr. 20* a *Obr. 21*), který vznikl na Katedře technologií a měření Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Odpor textilních vzorků byl čtyřbodově změřen před testováním, po jednom, dvou, pěti a deseti tisících ohýbacích nebo natahovacích cyklů. V průběhu ohýbacích a natahovacích testů byl odpor vzorku měřen dvoubodovou metodou, u které se ovšem značně projevuje chyba způsobená odporem přívodních vodičů a přechodovými odpory kontaktních spojů. Na základě výsledků měření odporu byl vzorek podroben měření teploty, napětí a proudu při napájení jednotkou *30seven* pouze před testováním a po poslední várce testů.

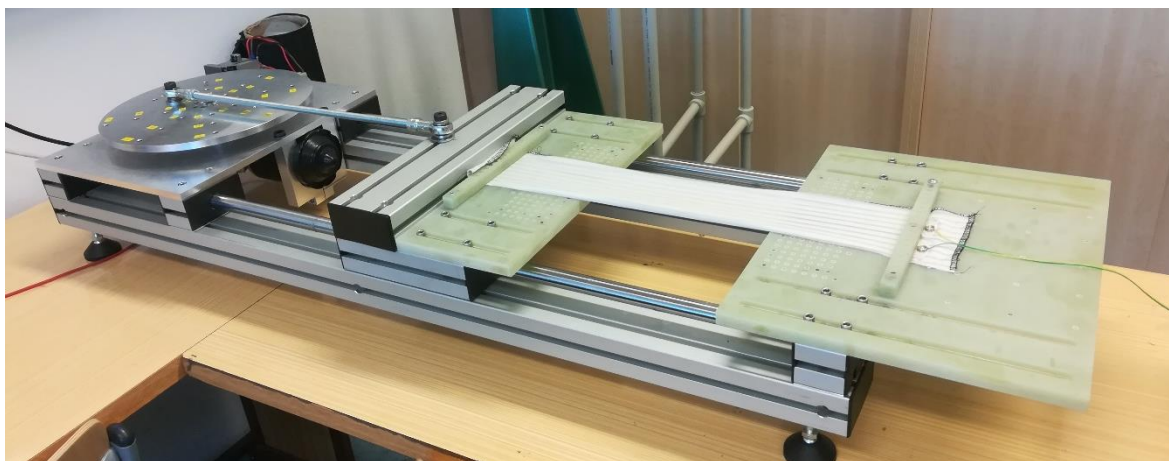
Jak lze vidět na *Obr. 20*, během ohýbacích testů byla textilie položena na teflonové podložce, která zajišťovala při každém cyklu stejný ohyb textilie. Na jedné straně byla textilie s teflonovou podložkou zafixována ke statické části bend testeru a na druhé straně k posuvné části, o jejíž pohyb se pomocí ojnice stará elektrický šnekový motor *Nidec SWMV 402 525*. Během natahovacích testů teflonová podložka použita nebyla (viz *Obr. 21*), tudíž docházelo v jedné krajní poloze k volnému prověšení textilního vzorku a v druhé krajní poloze k natažení o dvacet procent oproti délce při volném položení vzorku. Rychlost motoru byla nastavena tak, aby jeden cyklus trval dvě sekundy. Na statické části byly k textilii pomocí druků připojeny vodiče pro dvoubodové měření odporu, jehož hodnota byla odečítána také každé dvě sekundy, a to po celou dobu testování. Pro měření a záznam hodnot odporu do počítače byl použit měřicí přístroj *Keithley 2700*.

Čtyřbodové měření probíhalo tak, jak je popsáno v *podkapitole 5.5.1*. Textilní vzorek byl tedy během měření volně položen na podložce. Při jeho opětovném zvednutí a položení došlo vždy ke změně odporu v řádu miliohmů, což je způsobeno tím, že vzorek není vždy na podložku položen přesně stejně a sondy také nejsou vždy přiloženy úplně přesně stejně jako při předchozím měření. Tím dochází k mírné změně odporu v kontaktních místech vodivých nití. Z tohoto důvodu bylo měření čtyřbodovou metodou zaokrouhлено na setiny ohmu. U dvoubodového měření docházelo k cyklickému ohýbání textilie, kdy byla textilie na obou koncích zafixována a pohyb prováděný s textilií byl tak pokaždé téměř identický. Relativní přesnost mezi dvěma měřeními byla tedy u dvoubodových měření vyšší, než

u provedených čtyřbodových měření, a z toho důvodu jsou dvoubodově zaznamenané hodnoty zaokrouhleny na tisíce ohmů.



Obr. 20 Ohýbání vzorku A2 na bend testeru



Obr. 21 Natahování vzorku A3 na bend testeru

6 Výsledky měření

Testy odolnosti proběhly ve dvou sériích, kdy nejprve byly provedeny prací a sušící testy na vzorcích *A1*, *B1* a *B2* a po nich byly provedeny testy ohýbání a natahování na vzorcích *A2* a *A3*.

V následujících podkapitolách jsou prezentovány naměřené hodnoty a získané poznatky o textiliích na základě provedených testů.

6.1 Výsledky pracích a sušících testů

Všechny tři testované vzorky byly změřeny před praním a následně po prvním, druhém, pátém, desátém, dvacátém a třicátém pracím a sušícím cyklu. Všechny tyto vzorky vykazovaly i po posledním testu stále určitou schopnost vyhřevnosti.

Zvláštním jevem u obou vzorků *pleteniny typu B* byly pravidelně ob jeden vodivý pruh střídající se více a méně teplé pruhy, což bylo způsobeno značně rozdílným odporem dvou po sobě jdoucích pruhů. Jak k tomu během výrobního procesu došlo, nebyl schopen vysvětlit ani výrobce této pleteniny.

6.1.1 Vzorek A1

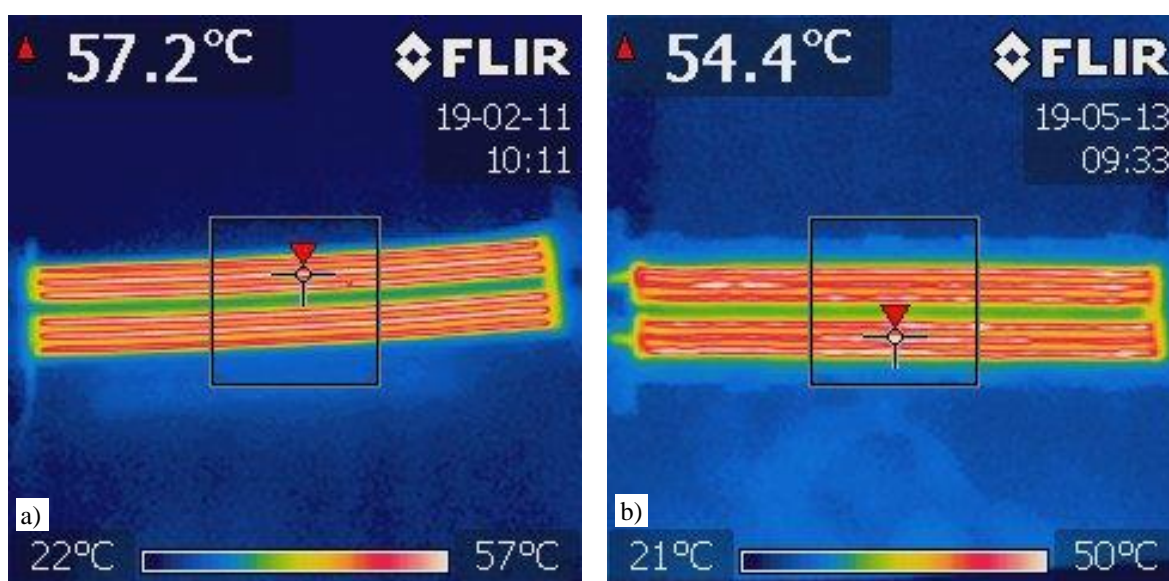
Textilní vzorek *A1* s vodivými nitěmi Cu/Ag vykazoval i po třiceti pracích a sušících cyklech stále velmi stabilní hodnoty odporu, jak lze vidět v *Tab. 6*. Odpor vzrostl z původní hodnoty 2,73 Ω na hodnotu 4,74 Ω po třiceti pracích cyklech. Z důvodu charakteru napájecího zdroje se to ovšem na výsledné teplotě vyhřívacích pruhů projevilo jen minimálně. Před prvním vypráním se efektivní hodnota napětí napájecího zdroje pohybovala okolo 6,5 V, zatímco po třiceti pracích cyklech to bylo přibližně 7,0 V a efektivní hodnota proudu poklesla z přibližně 2,2 A na 1,7 A. Dodávaný výkon napájecí jednotkou se tak příliš nesnížil.

U tohoto vzorku lze pozorovat rovnoměrné rozložení teploty v ploše vyhřívacích pruhů (viz *Obr. 22*). Díky dostatečné vodivosti vodivé stuhly zde nedochází k přehřívání v prostředním úseku propojovací sběrnice, kde je proudová hustota nejvyšší. U tohoto vzorku byla teplota vyhřívacích pruhů před prvním pracím a sušícím cyklem značně nižší,

než u obou vzorků *pleteniny typu B*, ovšem byla dostatečná pro použití v praxi i pro demonstrační účely vyhřívání e-textilie. V ploše vyhřívacích pruhů tohoto vzorku dosahovala teplota velice podobných hodnot po třiceti pracích cyklech jako před prvním praním a to v rozmezí 49 °C až 61 °C (viz *Obr. 22*). U tohoto vzorku ovšem nastal problém po vyprání a usušení, kdy se začaly okraje textilie značně ohýbat (viz *podkapitola 5.5.2*). Všechny pořízené snímky tohoto vzorku obsahuje *Příloha A*.

Tab. 6 Hodnoty naměřené na textilním vzorku A1

Počet pracích a sušících cyklů	0	1	2	5	10	20	30
Odpor [Ω]	2,73	2,71	2,74	3,02	3,38	4,29	4,74
Rozsah teplot pruhů [$^{\circ}\text{C}$]	54 – 60	50 – 56	52 – 58	52 – 58	54 – 60	55 – 61	49 – 58
Napětí [V]	6,5	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9	7,0
Proud [A]	2,3	2,2	2,2	2,1	2,0	2,0	1,7



Obr. 22 Vzorek A1 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou: a) před vypráním, b) po třiceti pracích a sušících cyklech

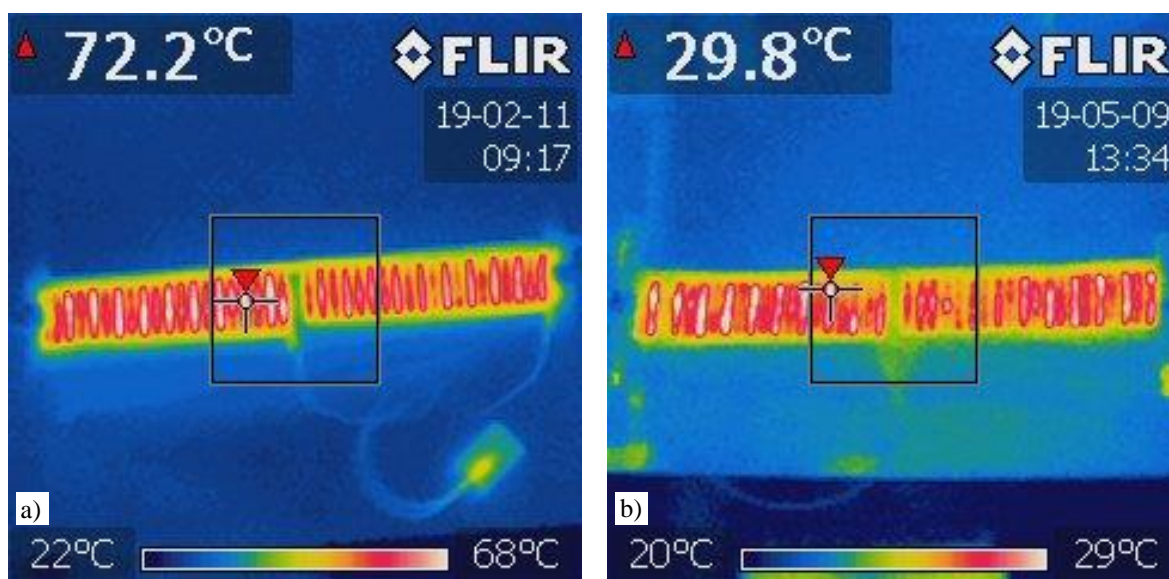
6.1.2 Vzorek B1

U vzorku *B1* byl zpočátku celkový odpor vodivého motivu srovnatelný s odporem vzorku *A1*. Ovšem s narůstajícím počtem testů docházelo ke značnému zhoršení, což vedlo k navýšení odporu z 3,08 Ω až na 41,00 Ω . Efektivní hodnota napětí dodávaného napájecí jednotkou byla před vypráním 6,7 V a po poslední várce testů 7,9 V. Efektivní hodnota proudu během testů poklesla z 2,3 A na 0,2 A.

Ani u tohoto vzorku nedocházelo k nadměrnému ohřívání propojovací sběrnice. Ovšem docházelo zde k již zmíněnému střídání více a méně teplých pruhů (viz *podkapitola 6.1*), což lze dobře vidět na *Obr. 23*. Ani v rámci jednotlivých pruhů nebylo rozložení teploty tak rovnoměrné, jako tomu bylo u *vzorku A1*. S narůstajícím počtem testů docházelo ke snižování teploty vyhřívacích pruhů, kdy pro teplejší pruhy došlo k ochlazení z původních teplot v rozmezí 67 °C až 79 °C na teploty okolo 28 °C až 30 °C a pro méně teplé pruhy z teplot okolo 54 °C až 68 °C na teploty okolo 25 °C až 28 °C (viz *Obr. 23*). Všechny pořízené snímky tohoto vzorku obsahuje *Příloha B*.

Tab. 7 Hodnoty naměřené na textilním vzorku B1

Počet pracích a sušících cyklů	0	1	2	5	10	20	30
Odpor [Ω]	3,08	4,37	5,30	8,62	18,29	27,01	41,00
Rozsah teplot pruhů [°C]	54 – 79	44 – 62	42 – 58	39 – 51	33 – 42	31 – 38	25 – 30
Napětí [V]	6,5	6,7	6,8	7,4	7,5	7,8	7,9
Proud [A]	2,3	1,6	1,4	1,0	0,5	0,3	0,2



Obr. 23 Vzorek B1 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou: a) před vypráním b) po třiceti pracích a sušících cyklech

6.1.3 Vzorek B2

Vzorek B2 se *SilveR.STAT* nitěmi vykazoval zvyšující hodnoty odporu s narůstajícím počtem pracích a sušících cyklů podobně jako vzorek B1. Původní hodnota odporu byla 2,19 Ω a po třiceti cyklech praní a sušení to bylo již 29,51 Ω .

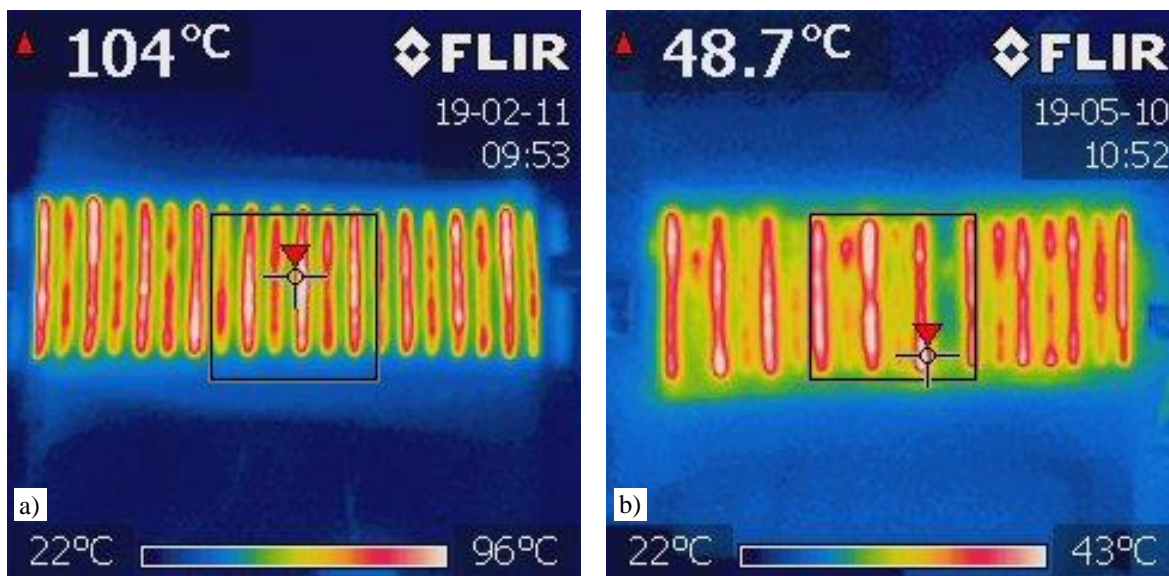
U tohoto vzorku byla původní teplota vyhřívacích pruhů značně vyšší, než u ostatních vzorků, a to až tak, že by mohlo nastat popálení kůže při dotyku. Jednotkou ovšem protékal tak vysoký proud, že nadproudová ochrana napájecí jednotku vždy nejpozději po dvaceti sekundách vypnula. První fotografie z termokamery (viz *Obr. 24 a*) je tedy pořízena po dvaceti sekundách od zapnutí napájení. Po prvním pracím cyklu již motivem protékal nižší proud a bylo možné textilní vzorek fotografovat až po ustálení teploty jako všechny ostatní vzorky. Efektivní hodnoty naměřené během dvaceti sekund před prvním vypráním byly 5,8 V a 3,1 A. Po posledním pracím a sušícím cyklu to bylo po ustálení teploty 7,8 V a 0,3 A.

I u tohoto vzorku se značně projevilo střídání teplot vyhřívacích pruhů (viz *podkapitola 6.1*) a ani teplota jednotlivých pruhů nebyla rovnoměrně rozložena. Před prvním pracím cyklem se po dvaceti sekundách nejteplejší části vyhřívacích pruhů pohybovaly v teplotách okolo 92 °C až 104 °C a méně teplé mezi 65 °C a 89 °C, po prvním pracím a sušícím cyklu to byly podobné hodnoty, ovšem až po ustálení teploty (5 minut). Po třicátém pracím a sušícím cyklu to bylo 39 °C až 49 °C pro více teplé pruhy a 25 °C až 40 °C pro méně teplé. Všechny pořízené snímky tohoto vzorku obsahuje *Příloha C*.

Tab. 8 Hodnoty naměřené na textilním vzorku B2

Počet pracích a sušících cyklů	0	1	2	5	10	20	30
Odpor [Ω]	2,19	3,21	3,83	6,52	13,38	18,99	29,51
Rozsah teplot pruhů [°C]	65 – 104*	63 – 100	60 – 94	47 – 71	38 – 58	35 – 52	25 – 49
Napětí [V]	5,8*	6,6	6,7	6,8	7,4	7,6	7,8
Proud [A]	3,1*	2,5	2,0	1,3	0,7	0,5	0,3

* – hodnoty naměřené po dvaceti sekundách od zapnutí napájecí jednotky



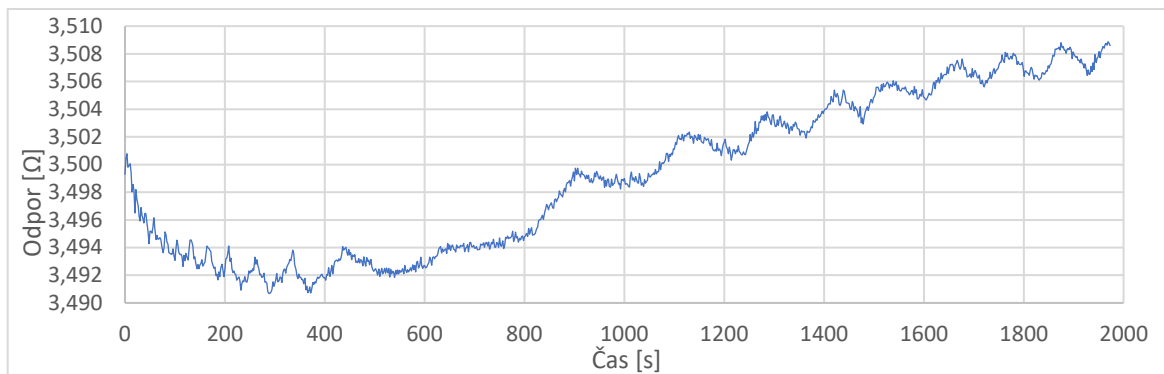
Obr. 24 Vzorek B2 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou: a) před vypráním po 20 sekundách od zapnutí b) po třiceti pracích a sušících cyklech po 5 minutách od zapnutí

6.2 Výsledky ohýbacích testů

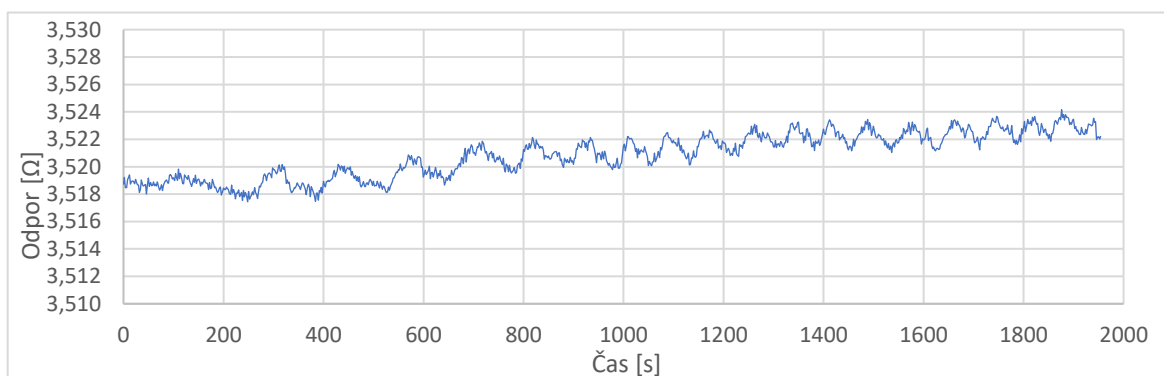
Grafy ze zaznamenaných hodnot dvoubodového měření provedených na textilním vzorku A2 lze vidět na Obr. 25 – Obr. 28. Perioda jedné otáčky motoru byla nastavena na 2 sekundy stejně jako četnost odečítání hodnot odporu. Reálná perioda motoru ovšem byla o několik setin sekundy kratší a naopak hodnota odporu byla občas odečtena o několik setin sekundy později, což se na měření projevilo tím, že textilie nebyla změřena pokaždé ve stejném stavu ohýbacího cyklu, což vedlo k cyklicky se opakujícím výkyvům naměřených hodnot (viz Obr. 25 – Obr. 28). Druhým důsledkem bylo, že během každé várky ohýbacích cyklů bylo naměřeno méně hodnot, než proběhlo cyklů. Z toho důvodu je v grafech vynesena závislost odporu na čase (nikoliv na počtu ohýbacích cyklů), kdy každý graf začíná v čase 0 sekund od začátku jednotlivých várek testů.

Během prvního tisíce cyklů (viz Obr. 25) byly zaznamenány největší změny odporu v průběhu celého testování, kdy na začátku měření byl dvoubodově změřen odpor $3,499 \Omega$, který během první pětiny této várky cyklů klesl přibližně o $9 \text{ m}\Omega$, kdy byla naměřena nejnižší hodnota dvoubodového měření, a to $3,491 \Omega$. Následně odpor začal stoupat až na hodnotu $3,509 \Omega$, které nabýval po prvním tisíci cyklů. Mezi koncem prvního a začátkem druhého tisíce cyklů byl odpor čtyřbodově změřen a následně znovu připojen k dvoubodovému měření. Tím se mohl změnit přechodový odpor v místě připojení druků, který mohl zapříčinit změnu o $10 \text{ m}\Omega$ na začátku druhého tisíce cyklů oproti konci prvního tisíce. Mezi ostatními várkami byla tato změna o něco nižší. Hodnota odporu stoupala až do konce třetí várky

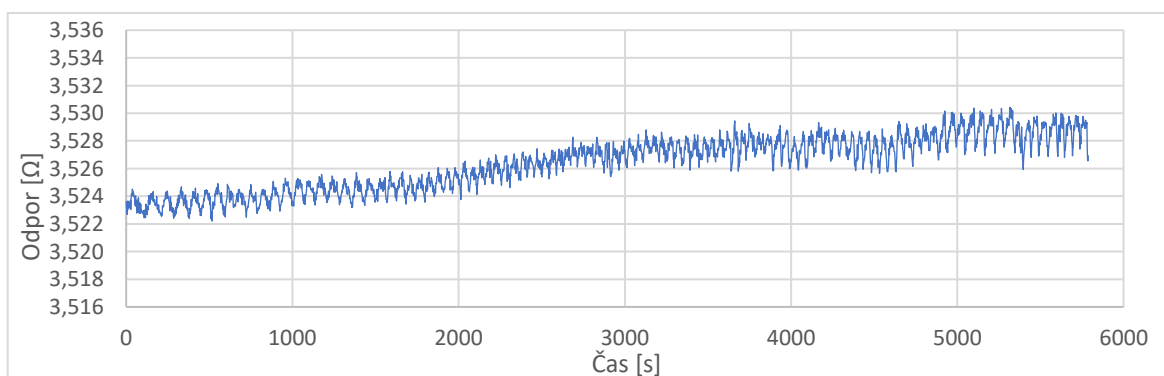
(viz Obr. 27), kdy bylo dokončeno dohromady pět tisíc cyklů. V první pětině poslední várky byla naměřena nejvyšší hodnota odporu během dvoubodového měření, a to $3,534 \Omega$ (viz Obr. 28). Následně již odpor až do konce měření klesal a to až na konečnou hodnotu $3,526 \Omega$.



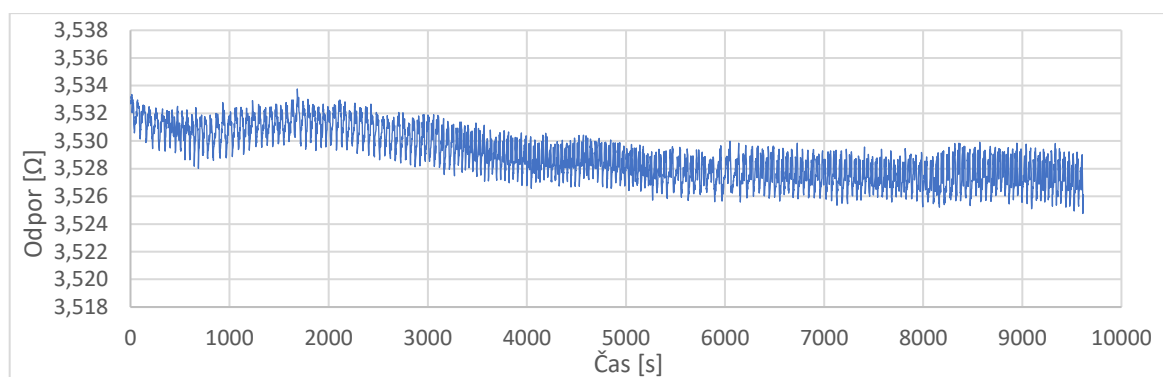
Obr. 25 Naměřené hodnoty odporu vzorku A2 pro 1000 ohýbacích cyklů



Obr. 26 Naměřené hodnoty odporu vzorku A2 pro 1001 až 2000 ohýbacích cyklů



Obr. 27 Naměřené hodnoty odporu vzorku A2 pro 2001 až 5000 ohýbacích cyklů



Obr. 28 Naměřené hodnoty odporu vzorku A2 pro 5001 až 10000 ohýbacích cyklů

Čtyřbodovou metodou byly naměřeny hodnoty $2,65 \Omega$ před testováním a $2,68 \Omega$ po testech. Odpor textilních vzorků se tedy změnil o tři setiny ohmu. Tato změna tedy nebyla zaznamatelná ve výhřevnosti textilie (viz Příloha D – Obr. 36). Hodnoty naměřené dvoubodovou metodou jsou tedy přibližně o $0,85 \Omega$ vyšší, než hodnoty naměřené čtyřbodově.

Tab. 9 Hodnoty odporu naměřené čtyřbodovou metodou na textilním vzorku A2

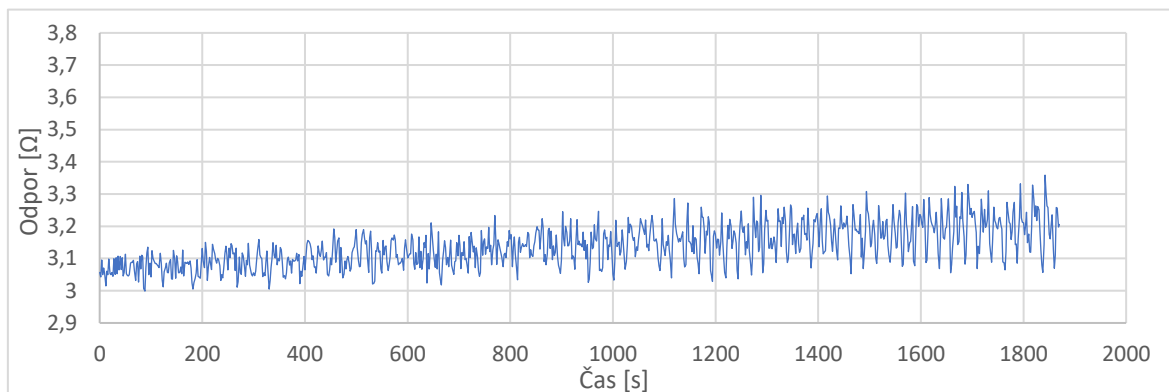
Počet ohýbacích cyklů	0	1 000	2 000	5 000	10 000
Odpor [Ω]	2,65	2,67	2,67	2,68	2,68

6.3 Výsledky natahovacích testů

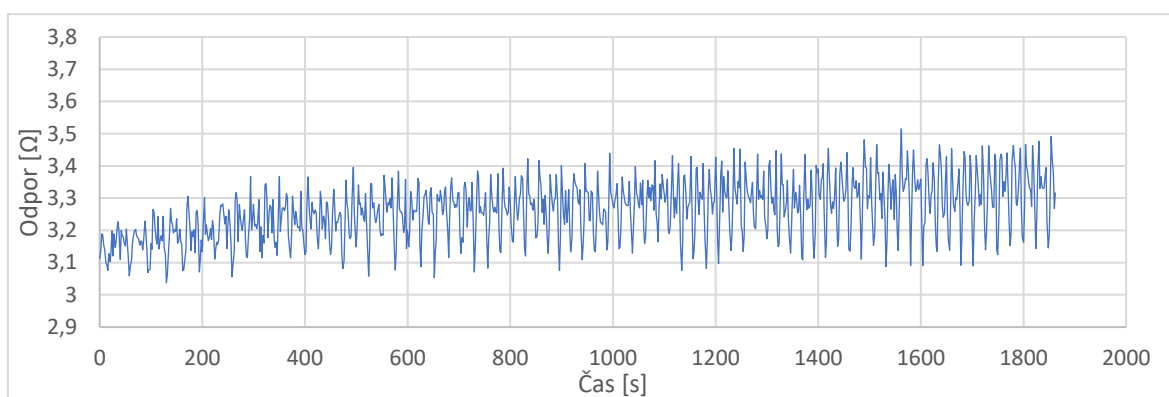
Grafy ze zaznamenaných hodnot dvoubodového měření provedených na textilním vzorku A3 lze vidět na Obr. 29 – Obr. 32. Perioda otáčky motoru a četnost odečítání hodnot se neshodovaly podobně jako u ohýbacích testů (viz podkapitola 6.2), takže textilie nebyla změřena pokaždé ve stejném stavu natahovacího cyklu, což vedlo k cyklicky se opakujícím výkyvům naměřených hodnot (viz Obr. 29 – Obr. 32). Dvoubodové měření odporu je tedy i zde v grafech vyneseno v závislosti na čase.

Rozptyl naměřených hodnot odporu byl na počátku měření i méně než $0,1 \Omega$, ale s přibývajícím počtem cyklů rostl až na hodnoty okolo $0,6 \Omega$ (viz Obr. 29 – Obr. 32). Během měření bylo zjištěno, že hodnoty odporu vzorku v napnutém stavu jsou o několik setin ohmu nižší, než při volném stavu vzorku. Čtyřbodové měření (viz Tab. 10) volně položeného vzorku ukázalo, že mezi jednotlivými měřeními došlo k rozdílu pouze několik setin ohmu. Zmíněný rozptyl hodnot během dvoubodového měření je tedy pravděpodobně způsoben dynamickým průběhem procesu, zatímco během statického měření jsou hodnoty ustáleny.

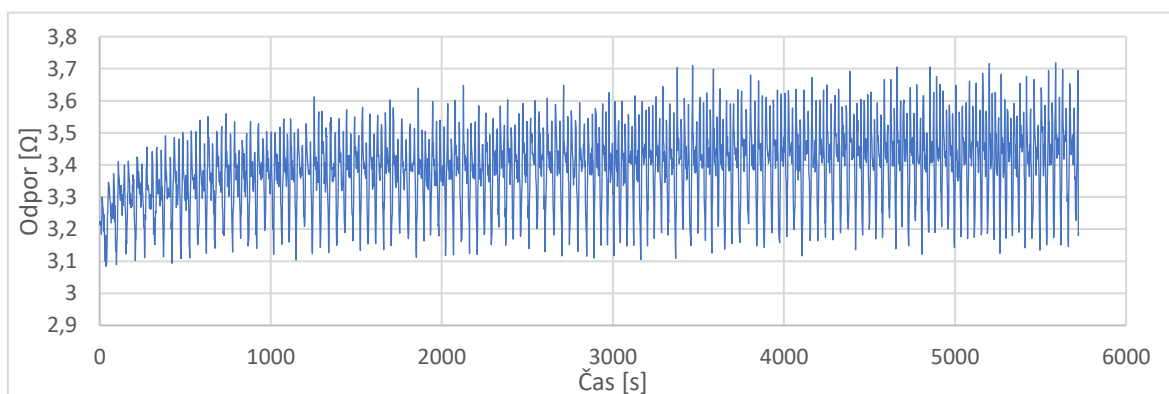
Celkový nárůst odporu byl podle čtyřbodového měření o šest setin ohmu (viz *Tab. 10*), což nemělo vliv na vyhřívací schopnosti textilie (viz *Obr. 37 – Příloha D*).



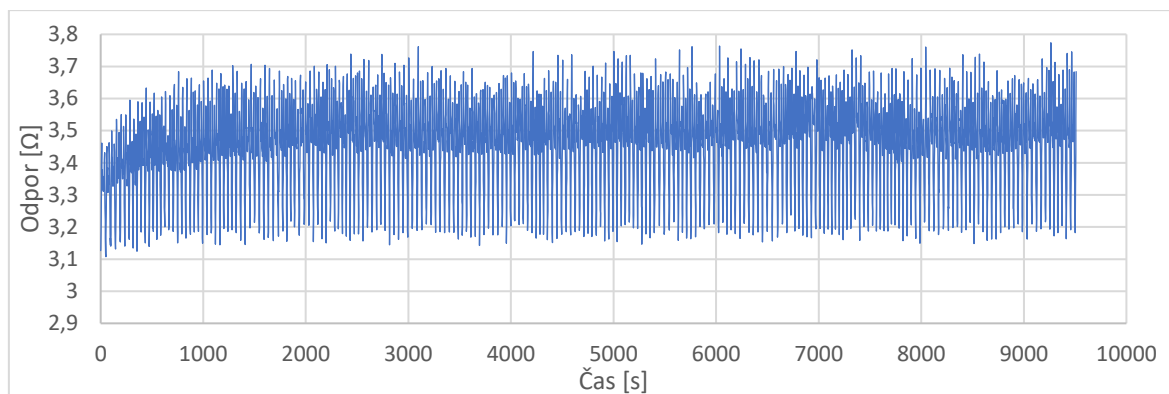
Obr. 29 Naměřené hodnoty odporu vzorku A3 pro 1000 napívacích cyklů



Obr. 30 Naměřené hodnoty odporu vzorku A3 pro 1001 až 2000 napívacích cyklů



Obr. 31 Naměřené hodnoty odporu vzorku A3 pro 2001 až 5000 napívacích cyklů



Obr. 32 Naměřené hodnoty odporu vzorku A3 pro 5001 až 10000 napívacích cyklů

Tab. 10 Hodnoty odporu naměřené čtyřbodovou metodou na textilním vzorku A3

Počet natahovacích cyklů	0	1 000	2 000	5 000	10 000
Odpor [Ω]	2,62	2,64	2,66	2,67	2,68

6.4 Zhodnocení výsledků měření

V následujících podkapitolách jsou zhodnoceny jednotlivé typy pletenin z hlediska odolnosti vůči praní v automatické pračce, sušení v sušičce, ohýbání, natahování, ale také z hlediska vhodnosti použití pro smart textilní aplikace, jakými jsou demonstrační účely vyhřívání e-textilií i užívání v praxi.

6.4.1 Zhodnocení vzorků pleteniny typu A

U vzorku A1 byla počáteční teplota vyhřívacích pruhů mezi 54 °C a 60 °C a její rozložení bylo v rámci celého vyhřívacího motivu velmi rovnoměrné. Po třiceti pracích a sušících cyklech došlo u tohoto vzorku ke zvýšení odporu o pouhých 2,01 Ω a teplota vyhřívacích pruhů i její rozložení bylo stále velmi srovnatelné s počátečními hodnotami. Při pracích cyklech ovšem u této pleteniny došlo k problému s ohýbáním okrajů textilie, jenž je popsán v podkapitole 5.5.2. Pletenina typu A se tedy projevila jako značně odolná vůči praní a sušení z hlediska elektrických a vyhřívacích vlastností, nikoliv však z hlediska zachování tvaru.

Na základě zachování elektrických a tepelných vlastností po pracích testech u vzorku A1 byly vyrobeny identické vzorky s označením „A2“ a „A3“, na kterých byly provedeny testy na odolnost vůči cyklickému ohýbání a natahování. Tyto vzorky byly navíc opatřeny lisovacími druky pro spolehlivější propojení s napájecí jednotkou, díky čemuž by

bylo snazší užití vzorků v praxi k vyhřívání bederní oblasti zad. Navíc se během měření povrchu textilií ukázalo, že v místě připojení přírodních vodičů ke vzorku dochází u druků k mnohem menšímu ohřívání, než je tomu při použití krokosvorek, což je pravděpodobně způsobeno větším povrchem a silou kontaktu druků s vodivými nitmi sběrné elektrody (vodivé stuhy). Na vzorku A2 bylo provedeno deset tisíc ohýbacích cyklů, po kterých byl naměřen nárůst odporu o pouhé tři setiny ohmu a na vzorku A3 byl po deseti tisících natahovacích cyklech zaznamenán nárůst o šest setin ohmu. Tudíž i vůči tomuto mechanickému namáhání se jeví *pletěnina typu A* jako značně odolná.

Teplota vzorků *pletěniny typu A* byla na nejvýkonnější režim napájecí jednotky (režim „100 %“) vhodná pro demonstraci výhřevnosti e-textilie zjišťovanou krátkodobým přiložením dlaně, aniž by hrozilo popálení pokožky, za předpokladu, že je textilie v narovnaném stavu. Ani při praktickém používání na lidském těle by v narovnaném stavu nemělo bezprostředně hrozit riziko popálení, pokud by byl v řádu desítek sekund zvolen vyhřívací režim „100 %“. Pro dlouhodobé praktické používání lze zvolit některý z prvních dvou režimů napájecí jednotky, kdy při použití režimu „25 %“ se teplota vyhřívacích pruhů pohybovala mezi 27 °C a 34 °C a při použití režimu „50 %“ to byly teploty v rozmezí 37 °C až 45 °C. Riziko ovšem nastává při přehnutí textilie, kdy může dojít k vzájemnému vodivému propojení jednotlivých pruhů, což může vést k nadměrnému lokálnímu navýšení teploty textilie, které by mohlo způsobit popáleniny. Textilie s těmito parametry je tedy vhodná pro demonstrační účely za předpokladu, že je používána v narovnaném stavu. Pro vyhřívání bederní oblasti lidského těla by bylo vhodné tuto textilií používat pouze za předpokladu, že by bylo zabráněno náhodnému vzájemnému propojení vodivých pruhů, což by bylo možné například překrytím pletěniny nevodivou nití z obou stran. Použití této textilie ve smart textilních aplikacích bude tedy možné až po zvládnutí zmíněného rizika.

6.4.2 Zhodnocení vzorků pletěniny typu B

U vzorků B1 a B2 se již od začátku projevovalo nerovnoměrné rozložení teploty v rámci celého motivu i jednotlivých vyhřívacích pruhů (viz *podkapitola 6.1*). Navíc u těchto vzorků docházelo s přibývajícím počtem pracích cyklů ke zvyšování odporu v rámci jednotek ohmů, kdy po třicátém vyprání a usušení byl již odpor vyšší oproti prvnímu měření u vzorku B1 o 37,92 Ω a u vzorku B2 o 27,32 Ω. Se zvyšujícím odporem také docházelo k rapidnímu snižování teploty vyhřívacích pruhů. Příčinou této degenerace mohou být

vlastnosti materiálů použitých ve vodivých vláknech. *Pletenina typu B* obsahuje polyamidová vlákna chemicky ovrstvená stříbrem, jejichž vlastnosti jsou značně rozdílné. Zejména může být problém, že polyamid je pružný, zatímco stříbro rigidní. Také adheze stříbra k vláknu je omezená a s každým pracím cyklem se stříbro z vlákna postupně uvolňuje. *Pletenina typu B* se tedy prokázala jako zcela nevhodná pro praní v automatické pračce a sušení v sušičce. Jelikož se jednalo o klíčový parametr, který si tato práce kladla za cíl, nebyla již *pletenina typu B* podrobována dalším testům.

Na nejvíce výkonný napájecí režim (režim „100 %“) dosahovala před praním teplota vyhřívacích pruhů *vzorku B1* až 80 °C, při které by pro krátký dotek dlaně nemělo hrozit popálení, jelikož je teplota dotykem rychle odvedena. Na nejméně výkonný režim (režim „25 %“) byla teplota přibližně 45 °C, takže by bylo možné ji po omezenou dobu na tento režim použít pro vyhřívání bederní oblasti zad, ovšem při náhodném přepnutí režimu nebo přehnutí textilie by se objevilo riziko popálení pokožky. Pokud by se tedy tento vzorek nepral a bylo zabráněno náhodnému vodivému kontaktu vyhřívacích pruhů, bylo by možné ho použít pro demonstrační i praktické využití, ale z důvodu nerovnoměrného rozložení teploty a riziku popálení ho nelze označit pro tyto účely jako vhodný.

U *vzorku B2* před praním procházel na nejvyšší napájecí úroveň jednotkou příliš vysoký proud, který po několika sekundách aktivoval nadproudovou ochranu. Během té doby stihla teplota nejteplejších míst vyhřívacích pruhů stoupnout přes 100 °C, kdy tedy při kontaktu s pokožkou může reálně hrozit popálení. Na nejnižší napájecí úroveň (režim „25 %“) byla teplota nejteplejších částí okolo 60 °C, což by bylo možné použít pro demonstrační účely, ale nikoliv praktické využití. S ohledem na všechny uvedené skutečnosti pro oba vzorky byla *pletenina typu B* vyhodnocena jako nevhodná pro použití jako vyhřívací e-textilie ve smart textilních aplikacích.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat elektricky vyhřívanou textilií s důrazem na její odolnost vůči mechanickému namáhání způsobenému ohýbáním, natahováním, praním nebo sušením textilie. Tato textilie měla být navržena pro účely demonstrace vyhřívaných e-textilií i možnosti použití v praxi.

Součástí této práce bylo seznámení se s problematikou tepelného komfortu, smart textilií, možnostmi realizace elektricky vodivých prvků v procesech výroby textilií a možnostmi jejich propojování. Také byla provedena literární rešerše vyhřívaných e-textilií a seznámení se současnou situací na trhu v této oblasti.

V praktické části práce byl proveden návrh třech motivů vyhřívaných e-textilních vzorků pro dva textilní substráty. Prvním substrátem byla pletenina obsahující hybridní vodivou nit s postříbřenými měděnými mikrodrátky (uváděná v textu jako *pletenina typu A*) a druhým byla pletenina obsahující postříbřená polyamidová vlákna (v textu uváděná jako *pletenina typu B*). Jako zdroj energie pro vyhřívací vzorky byla zvolena napájecí jednotka s akumulátorem značky *30seven* a jako vhodná oblast lidského těla pro použití navržených e-textilií byla zvolena bederní část zad. Na základě navržených motivů bylo vyrobeno pět vzorků, z čehož na třech byly provedeny testy odolnosti vůči třiceti pracím a sušícím cyklům v pračce a sušičce, na jednom test odolnosti vůči deseti tisícům ohýbacích cyklů a na jednom test odolnosti vůči deseti tisícům natahovacích cyklů. Na základě těchto testů byly e-textilní vzorky kriticky zhodnoceny. Stěžejním parametrem pro navrhované textilie byla odolnost vůči pracím cyklům, ve kterých neobstála *pletenina typu B*, tudíž už nebyla dalším testům podrobována. *Pletenina typu A* obstála ve všech testech z hlediska zachování elektrických a vyhřívacích vlastností, ovšem vyskytl se u ní problém s ohýbáním okrajů textilie po pracích testech.

Během testování se prokázaly vzorky opatřené lisovacími druky pro propojení s napájecí jednotkou jako vhodnější pro praktické využití než krokosvorky použité u ostatních vzorků. Výhoda použití druků spočívá v menším ohřívání kontaktního místa, pevnějším propojením kabelu s textilií a spolehlivějším vodivém kontaktu. Další výhodou je, že druky jsou běžnou součástí již používaných textilních produktů.

Největším nedostatkem vyrobených vzorků se jeví riziko náhodného vodivého propojení vyhřívacích pruhů, které může vést k náhlému lokálnímu nárůstu teploty e-textilie, což by mohlo způsobit při styku s pokožkou popáleniny. K odstranění tohoto rizika by bylo vhodné vytvořit e-textilii, která bude z obou stran izolovaná, čímž by se mohly zabývat další výzkumné práce. Pokud by textilie byla navrhována pouze pro užití v praxi, bylo by vhodnější zvolit vodivou nit s mírně vyšším odporem nebo navrhnout motiv s jinou sérioparalelní kombinací, která by měla na nejvyšší vyhřívací úroveň napájecí jednotky nižší teplotu, než vzorky *pletiny typu A* v této práci.

Všeobecnému masovému rozšíření elektricky vyhřívaných smart textilií v současnosti brání zejména cena a omezování komfortu uživatele současnými technologiemi. Tato omezení jsou způsobena používáním rigidních akumulátorů s nezanedbatelnými rozměry, potřebou častého dobíjení těchto akumulátorů, potřebou jejich odpojování při praní textilie, ale také malou rozšířeností vyhřívaných e-textilních produktů s vodivými nitěmi.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MATTILA, H. R. *Intelligent Textiles and Clothing* [online]. 2006. ISBN 9781845690052. Dostupné z: doi:10.1533/9781845691622
- [2] TROJAN, Stanislav. *Lékařská fyziologie*. Grada, 2003. ISBN 80-247-0512-5.
- [3] CENTNEROVÁ, Lada. Tepelná pohoda a nepohoda. *Vytápění větrání instalace* [online]. 2000 [vid. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>
- [4] RUBINOVÁ, Olga. Přednáška - Tepelná pohoda a tepelná rovnováha člověka. [online]. Brno. 2013 [vid. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/tp02.pdf>
- [5] JIRÁK, Zdeněk a MATHAUSEROVÁ, Zuzana. *Výměna tepla - rovnice tepelné bilance* [online]. 2013 [vid. 2018-11-18]. Dostupné z: http://www.khshk.cz/e-learning/kurs3/23_vmna_tepla__rovnice_tepeln_bilance.html
- [6] CIHELKA, Jaromír. *Vytápění a větrání*. Praha: SNTL, 1975.
- [7] TAO, Xiaoming et al. *Smart Fibres, Fabrics and Clothing* [online]. 2001. ISBN 0849311721. Dostupné z: doi:10.1533/9781855737600
- [8] SANTAMOURIS, Matheos. *Solar thermal technologies for buildings : the state of the art*. James & James (Science Publishers) Ltd, 2003. ISBN 1902916476.
- [9] NEW-LEARN.INFO. Subjective measures. *Comfortable low energy architecture* [online]. [vid. 2018-10-30]. Dostupné z: <https://www.new-learn.info/packages/clear/thermal/people/surveying/clomet.html>
- [10] FRIEDL, František. *Integrovaný systém v budově - Rekonstrukce existujícího rodinného domu*. 2012. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [11] TAO, Xiaoming. *Handbook of smart textiles* [online]. 2015. ISBN 9789814451451. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-4451-45-1
- [12] KONCAR, Vladan. Introduction to smart textiles and their applications. *Smart Textiles and Their Applications* [online]. 2016. ISSN 09738622. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100574-3.00001-1
- [13] VAN LANGENHOVE, Lieva *Smart textiles for medicine and healthcare* [online]. Woodhead Publishing Limited, 2007. ISBN 978-1-84569-027-4. Dostupné z: doi:10.1533/9781845692933
- [14] SCOTT, Richard A., VAN LANGENHOVE, Lieva, PUERS, Robert, MATTHYS, Dirk. Intelligent textiles for protection. *Textiles for Protection* [online]. 2005, 176–195 [vid. 2018-10-09]. Dostupné z: doi:10.1533/9781845690977.1.176
- [15] REFERENCE.COM. *What Are Smart Textiles? | Reference.com* [online]. [vid. 2018-10-10]. Dostupné z: <https://www.reference.com/beauty-fashion/smart-textiles-d7ff8fb58a817a26>
- [16] SYDUZZAMAN, Md., PATWARY, Sarif Ullah, FARHANA, Kaniz a AHMED, Sharif. Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview. *Journal of Textile Science & Engineering* [online]. 2015, 05(01), 1–7 [vid. 2018-10-10]. ISSN 21658064. Dostupné z: doi:10.4172/2165-8064.1000181
- [17] WANG, Faming a LEE, Hansup. Evaluation of the performances of electrically heated clothing [online]. 2010 [vid. 2019-02-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Faming_Wang5/publication/202772247_Evaluation_of_the_performances_of_Electrically_heated_clothing/links/02faf4f6c557ec79ea000000.pdf

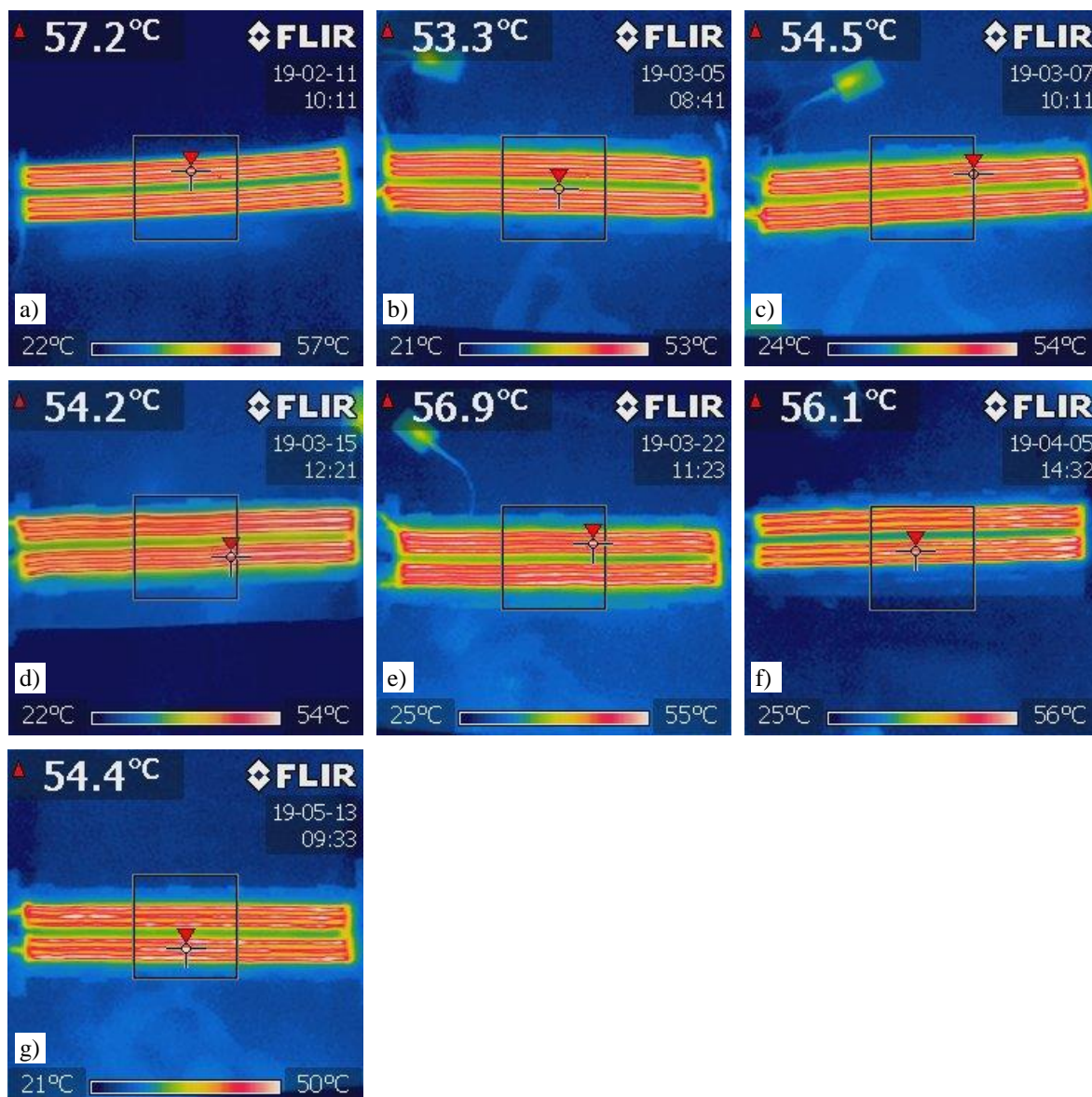
- [18] MBISE, Ekael, DIAS, Tilak a HURLEY, William. Design and manufacture of heated textiles. *Electronic Textiles* [online]. 2015, 117–132 [vid. 2019-02-19].
Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100201-8.00007-2
- [19] JADAL.CZ. *Makita Aku vyhřívání bunda včetně adaptéru* [online]. [vid. 2018-11-21].
Dostupné z: https://www.jadal.cz/cz-detail-660164-aku-vyhřívání-bunda-makita-dcj200zxl-velikost-xl-včetně-adapteru-pro-14-4-a-18-v-li-ion-ak.html?gclid=EAIaIQobChMImtSL--rj3gIVZZPtCh2LXw44EAQYFCABEGLy1_D_BwE
- [20] DEWALT.COM. *Heated Gear | Heated Jackets & Hoodies | DEWALT* [online]. [vid. 2018-11-21].
Dostupné z: <https://www.dewalt.com/products/gear-and-equipment/safety-and-protective-workwear/heated-gear>
- [21] CPOMILWAUKEE.COM. *Milwaukee Heated Jackets | Milwaukee Heated Gear | Milwaukee Heated Hoodies* [online]. [vid. 2018-11-21].
Dostupné z: <https://www.cpomilwaukee.com/milwaukee-heated-jackets/milwaukee-heated-jackets,default,sc.html?start=0&sz=36>
- [22] OROROWEAR.COM. *Men's Collection – ORORO* [online]. [vid. 2018-11-21].
Dostupné z: <https://www.ororowear.com/collections/mens>
- [23] GOBIHEAT.COM. *Gobi Heat* [online]. [vid. 2018-11-25].
Dostupné z: <https://gobiheat.com/collections/shop>
- [24] VENTUREHEAT.COM. *Heated Clothing - Battery Heated Jackets - Venture Heat* [online]. [vid. 2018-11-25].
Dostupné z: <https://www.ventureheat.com/heated-clothing.html>
- [25] THEWARMINGSTORE.COM. *Heated Motorcycle Jackets* [online]. [vid. 2018-11-20].
Dostupné z: <https://www.thewarmingstore.com/heated-motorcycle-jackets.html>
- [26] THEWARMINGSTORE.COM. *Milwaukee Leather Men's Vented Scooter Jacket with Heated Technology - 12V Motorcycle* [online]. [vid. 2018-11-20].
Dostupné z: <https://www.thewarmingstore.com/milwaukee-leather-mens-vented-scooter-jacket-with-heated-technology.html>
- [27] VOLTHEAT.COM. *PATENTED HEATING TECHNOLOGY - Volt Heat* [online]. [vid. 2018-11-25].
Dostupné z: <https://voltheat.com/pages/technology>
- [28] 30SEVEN.EU. *How to use | 30seven heated clothing* [online]. [vid. 2018-11-25].
Dostupné z: <https://30seven.eu/en/how-to-use/>
- [29] KASA.CZ. *Vyhřívací prostěradlo Lanaform Heating Blanket S2 bílý* [online]. [vid. 2018-11-19].
Dostupné z: https://www.kasa.cz/vyhřívací-prostěradlo-lanaform-heating-blanket-s2-bílý/?recommender_box_placement=productpage_similar&recommender_box=quarticon
- [30] KASA.CZ. *Manuál k výrobku Heating Blanket S2* [online]. [vid. 2018-11-19].
Dostupné z: https://www.kasa.cz/document/6/3/6/doc_2317636.pdf
- [31] NEELLA, Nagarjuna, GADDAM, Venkateswarlu, RAJANNA, K. a NAYAK, M. M. Low cost, disposable and wearable body warmer using RGO sheets coated on cloth substrate as heating element. V: *2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS 2017* [online]. 2017. ISBN 9781509030590.
Dostupné z: doi:10.1109/NEMS.2017.8017000
- [32] HAO, Liu, YI, Zhang, LI, Chen, LI, Xiaojie, YUXIU Wang a YAN, Gao. Development and characterization of flexible heating fabric based on conductive filaments. *Measurement* [online]. 2012, 45(7), 1855–1865 [vid. 2019-02-20]. ISSN 0263-2241.
Dostupné z: doi:10.1016/J.MEASUREMENT.2012.03.032
- [33] BAHADIR, Senem Kursun, ATALAY, Ozgur, KALAOGLU, Fatma, VASSILIADIS, Savvas a POTIRAKIS, Stelios. Performance evaluation of welded knitted e-fabrics for electrical resistance heating. V: *Lecture Notes in Electrical Engineering* [online]. 2016. ISBN 9789812879868.
Dostupné z: doi:10.1007/978-981-287-988-2_35

- [34] HAMDANI, Syed Talha Ali, FERNANDO, Anura, MAQSOOD, Muhammad. Thermo-mechanical behavior of stainless steel knitted structures. *Heat and Mass Transfer* [online]. 2016, 52(9), 1861–1870 [vid. 2019-02-21]. ISSN 0947-7411. Dostupné z: doi:10.1007/s00231-015-1707-z
- [35] TEXTILEWORLD.COM. *E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies* [online]. [vid. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2010/04/e-textiles-for-wearability-review-of-integration-technologies/>
- [36] KADOGLU, Huseyin. Conductive Yarns And Their Use In Technical Textiles. *TechnicalTextile.net* [online]. [vid. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.technicaltextile.net/articles/conductive-yarns-and-their-use-in-technical-textiles-3739>
- [37] SKOLATEXTILU.CZ. *Použití vláken - souhrn vlastností* [online]. [vid. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/469/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Pouziti-vlaken-souhrn-vlastnosti.html>
- [38] R-STAT.FR. *R.STAT* [online]. [vid. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.r-stat.fr/uk/business-history.php>
- [39] IMBUT.DE. *Special Threads: imbut GmbH - Veredlung von Kleinmengen, Produktion textiler Flächen und Spezialfäden* [online]. [vid. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.imbut.de/en/special-threads/>
- [40] CT24.CESKATELEVIZE.CZ. *Chytré oblečení možná zlevní. Čeští vědci vytvořili hybridní nit, kterou se elektronika všije do oděvu — ČT24 — Česká televize* [online]. [vid. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2595664-chytre-obleceni-mozna-zlevni-cesti-vedci-vytvorili-hybridni-nit-kterou-se-elektronika>
- [41] CLEVERTEX.CZ. *Elektricky vodivé hybridní nitě* [online]. [vid. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.clevertex.cz/vodive-nite/elektricky-vodive-hybridni-nite-detail-761>
- [42] ELEKTRISOLA.COM. *Conductor Materials* [online]. [vid. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.elektrisola.com/conductor-materials.html>
- [43] KIM, Yongsang, KIM, Hyejung a YOO, Hoi Jun. Electrical characterization of screen-printed circuits on the fabric. *IEEE Transactions on Advanced Packaging* [online]. 2010, 33(1), 196–205. ISSN 15213323. Dostupné z: doi:10.1109/TADVP.2009.2034536
- [44] SKOLATEXTILU.CZ. *Technologie tkaní* [online]. [vid. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/412/zaklady-textilnich-technologiei/technologie-tkani/Princip-vyroby-tkaniny.html>
- [45] URBANOVÁ, Kristýna. *Textilnictví v prehistorii*. [online]. [vid. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://uprav.ff.cuni.cz/?q=system/files/technologie.pdf>
- [46] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2009. ISBN 9788086960296.
- [47] SYROVÁTKOVÁ, Martina. *Historie pletení* [online]. Dostupné z: <https://static2.flercdn.net/upfiles/d1/5/7/9/2/79272/5/historie-pleteni.pdf>
- [48] SKOLATEXTILU.CZ. *Technologie pletení* [online]. [vid. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/277/zaklady-textilnich-technologiei/technologie-pleteni/Uvod.html>
- [49] N-I-S.CZ. *Pleteniny* [online]. [vid. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/pleteniny/page/456/>
- [50] SCHNEEGASS, Stefan a AMFT, Oliver. *Smart Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction* [online]. 2017. ISBN 978-3-319-50124-6. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrobp.2008.06.1923

- [51] *Propojování v elektronice - elektrické spoje* [online]. [vid. 2019-01-30].
Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf
- [52] LOCHER, I. a SEFAR, A.G.. Joining technologies for smart textiles. *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers* [online]. 2013, 285–305 [vid. 2019-01-30].
Dostupné z: doi:10.1533/9780857093530.2.285
- [53] LEHN, David I., NEELY, Craig W., SCHOONOVER, K., MARTIN, T. L. a JONES, M. T. *e-TAGs: e-Textile Attached Gadgets* [online]. [vid. 2019-01-30].
Dostupné z:
<https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/80538/MartinETags2004.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [54] DHAWAN, Anuj, SEYAM, Abdelfattah M., GHOSH, Tushar K. a MUTH, John F. Woven Fabric-Based Electrical Circuits: Part I: Evaluating Interconnect Methods. *Textile Research Journal* [online]. 2004. ISSN 00405175.
Dostupné z: doi:10.1177/004051750407401011
- [55] *Ultrazvukové svařování-41* [online]. [vid. 2019-02-01].
Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/2-06-41.pdf>
- [56] LINZ, Torsten. *Analysis of failure mechanisms of machine embroidered electrical contacts and solutions for improved reliability*. 2011.
- [57] KALLMAYER, Christine a SIMON, Erik. Large area sensor integration in textiles. V: *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices* [online]. IEEE, 2012, s. 1–5 [vid. 2019-02-04]. ISBN 978-1-4673-1591-3.
Dostupné z: doi:10.1109/SSD.2012.6198112
- [58] SIMON, Erik P, KALLMAYER, Christine, SCHNEIDER-RAMELOW, Martin a LANG, K. D. Development of a multi-terminal crimp package for smart textile integration. *2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference*. 2012, 1–6.
- [59] ŘEŘIČHA, Tomáš. *Technologie elektroniky - 3. cvičení*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.
- [60] *Hodnocení teploty horkých povrchů přístupných dotyku* [online]. [vid. 2019-04-08].
Dostupné z: http://www.khshk.cz/e-learning/kurs3/57hodnocen_teploty_horkch_povrch_pstupnch_dotyku.html
- [61] *Popáleniny a opařeniny | První pomoc* [online]. [vid. 2019-04-08].
Dostupné z: <http://www.prvni-pomoc.com/popaleniny-opareniny>
- [62] *Modal | Gina* [online]. [vid. 2019-03-07].
Dostupné z: <https://www.gina.cz/Informace-o-zbozi/Materialy/Modal.aspx>
- [63] *Polypropylene Fiber and Its Manufacturing Process, Properties, Advantages, Disadvantages and Applications of Polypropylene Fiber - Textile Learner* [online]. [vid. 2019-04-14].
Dostupné z: <https://textilelearner.blogspot.com/2013/01/polypropylene-fiber-and-its.html>
- [64] *Work li-ion battery for base layer or jacket | WORK | SHOP | 30seven heated clothing* [online]. [vid. 2019-03-08].
Dostupné z: <https://30seven.eu/en/shop/work/325/work-li-ion-battery-for-base-layer-or-jacket>
- [65] *Kelvin (4-wire) Resistance Measurement | DC Metering Circuits | Electronics Textbook* [online]. [vid. 2019-03-18].
Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/kelvin-resistance-measurement/>
- [66] *FLIR i-Series Point-and-Shoot Thermal Imaging Cameras* [online]. [vid. 2019-03-18].
Dostupné z: <https://www.termokamera-flir.cz/wp-content/uploads/2013/09/i-Series-Brochure.pdf>

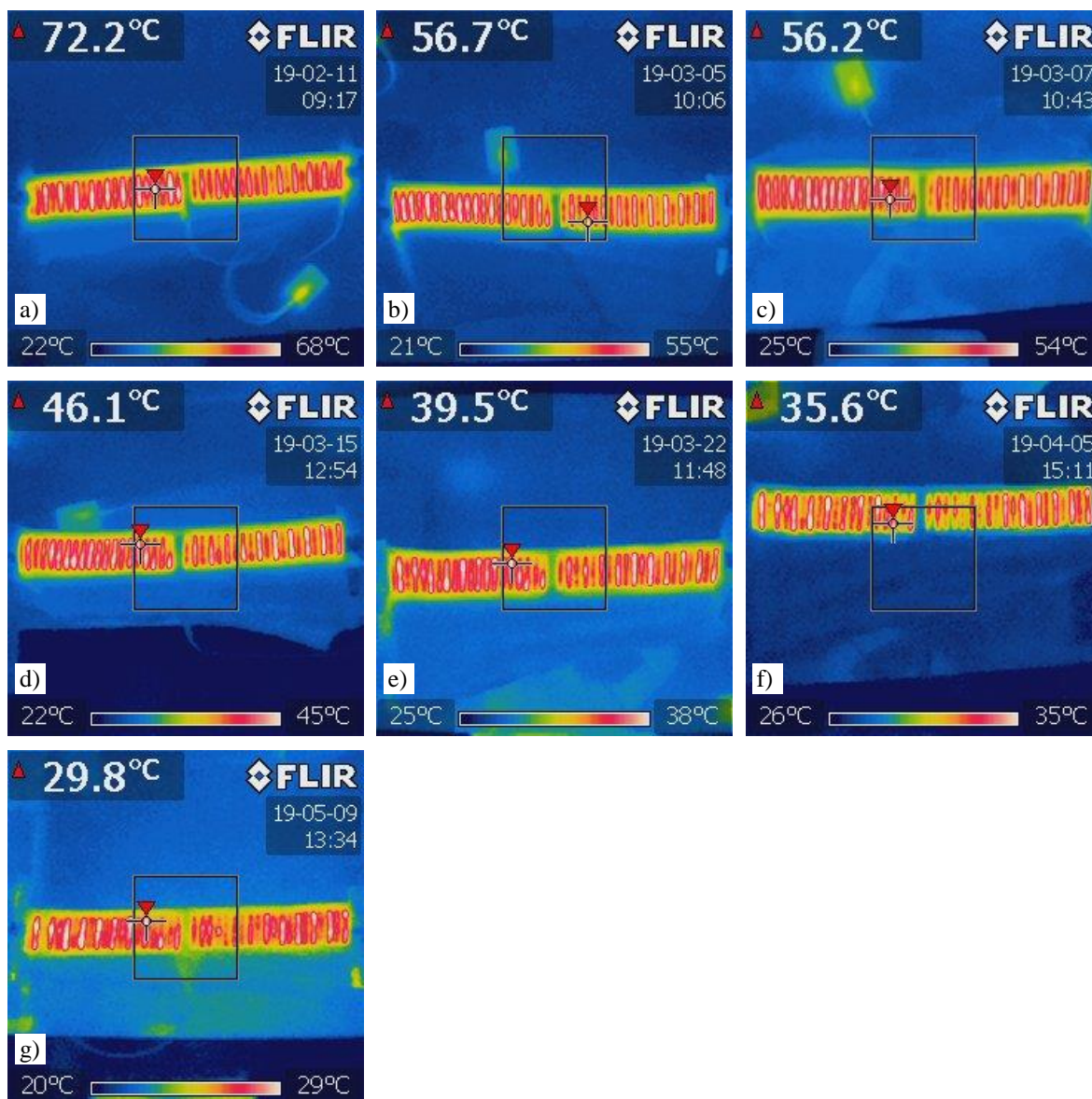
Přílohy

Příloha A – Snímky z termokamery – Vzorek A1



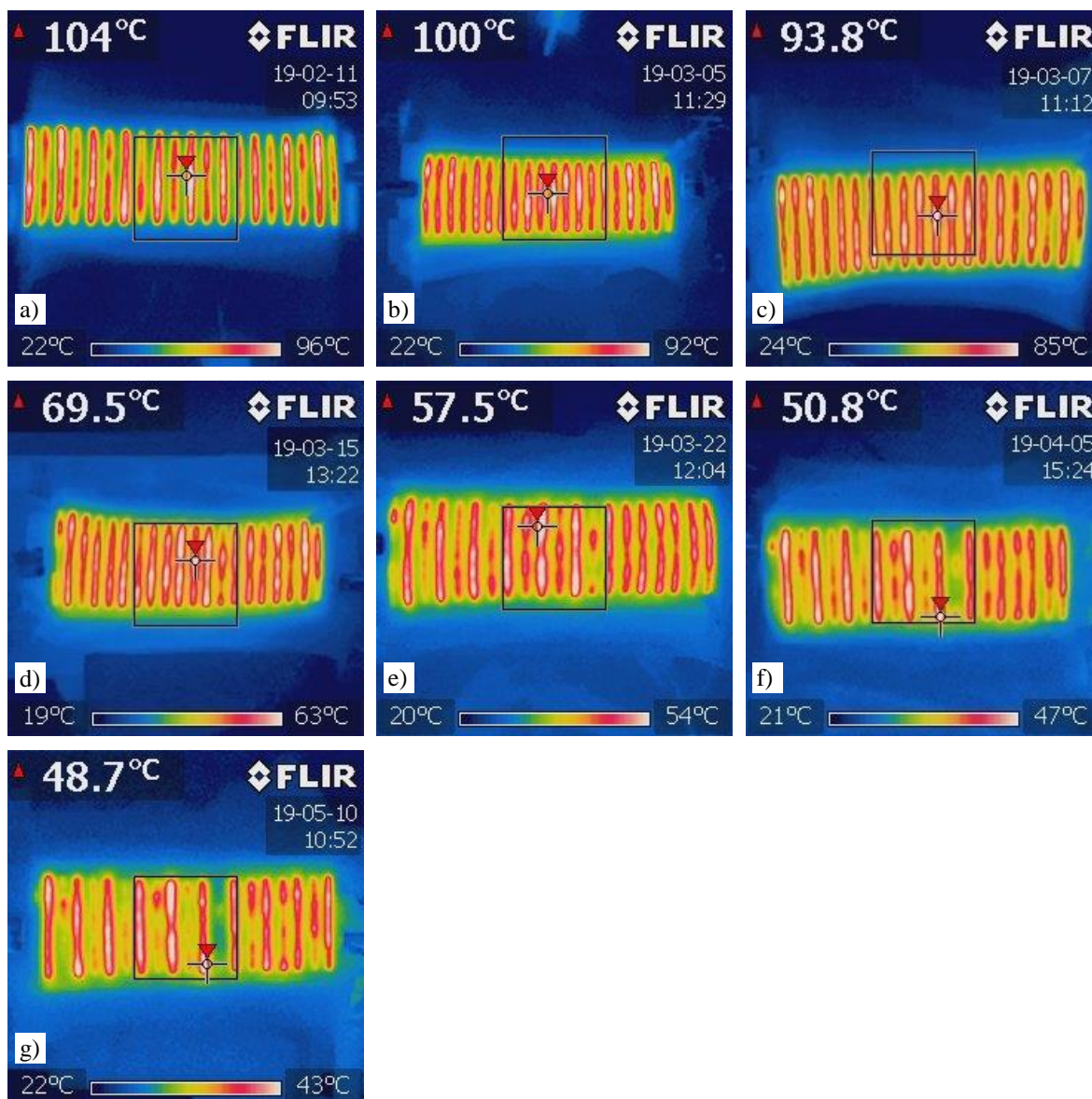
Obr. 33 Vzorek A1 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou: a) před vypráním, b) po jednom vyprání a usušení, c) po dvou vyprání a usušení, d) po pěti vyprání a usušení, e) po deseti vyprání a usušení, f) po dvaceti vyprání a usušení, g) po třiceti vyprání a usušení

Příloha B – Snímky z termokamery – Vzorek B1



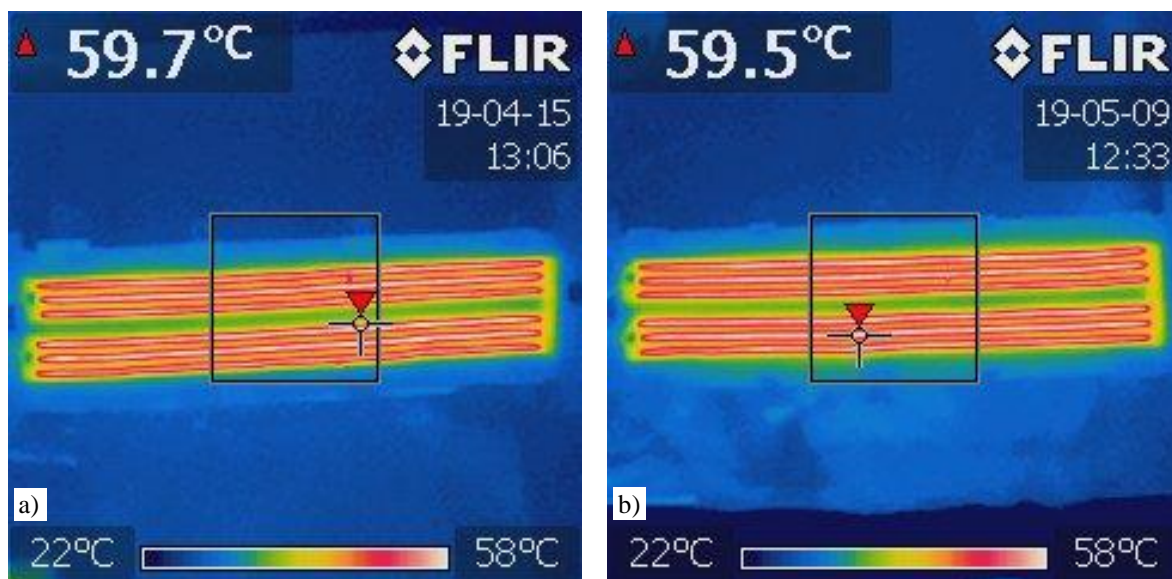
Obr. 34 Vzorek B1 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou: a) před vypráním, b) po jednom vyprání a usušení, c) po dvou vyprání a usušení, d) po pěti vyprání a usušení, e) po deseti vyprání a usušení, f) po dvaceti vyprání a usušení, g) po třiceti vyprání a usušení

Příloha C – Snímky z termokamery – Vzorek B2

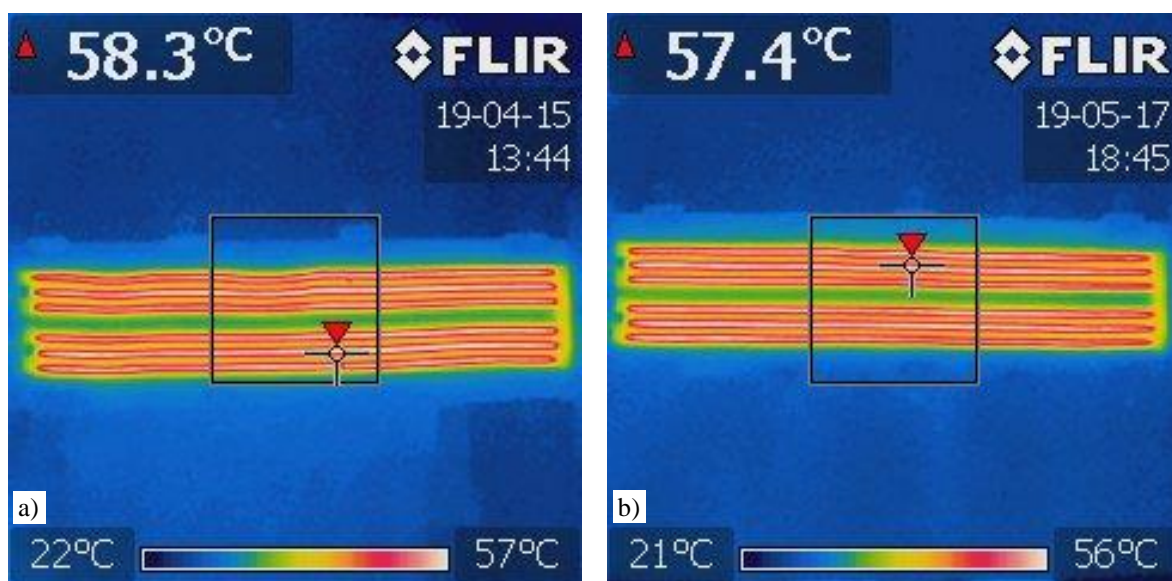


Obr. 35 Vzorek B2 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou:
a) před vypráním (po 20 sekundách od zapnutí napájení), b) po jednom vyprání a usušení,
c) po dvou vyprání a usušení, d) po pěti vyprání a usušení, e) po deseti vyprání a usušení,
f) po dvaceti vyprání a usušení, g) po třiceti vyprání a usušení

Příloha D – Snímky z termokamery – Vzorky A2 a A3



Obr. 36 Vzorok A2 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou:
a) před ohýbáním, b) po deseti tisících ohýbacích cyklech



Obr. 37 Vzorok A3 napájený jednotkou od 30seven focený termokamerou:
a) před natahováním, b) po deseti tisících natahovacích cyklech