

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv údržby na elektrické parametry vyhřívaných textilií**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vladimír JEŽEK**  
Osobní číslo: **E19N0048P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Téma práce: **Vliv údržby na elektrické parametry vyhřívaných textilií**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

### Zásady pro vypracování

1. Popište problematiku smart textilií se zaměřením na vyhřívané textilie.
2. Navrhněte a realizujte vhodné vzorky vyhřívaných textilií pro testování údržby.
3. Navrhněte metodiku testování údržby a provedte testování.
4. Zhodnoťte výsledky testování a proveďte doporučení pro praxi.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené 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. 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 materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



---

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



---

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

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na zkoumání vlivu údržby na elektrické parametry vyhřívaných textilií. V první kapitole je obecně představena problematika oblasti e-textilií a popsány způsoby realizace vodivých cest a elektrických kontaktů. Navazující druhá kapitola se již více soustředí na vyhřívané textilie, kterých se týká také praktická část této diplomové práce. Následuje návrh vzorků vyhřívaných textilií a návrh vhodné metodiky testování, která bude simulovat údržbu reálně využívaných e-textilií v průběhu jejich životnosti. V praktické části jsou navržené vzorky realizovány a podrobeny testování. Získané hodnoty jsou pak prezentovány a zhodnoceny v poslední části, kde je také na základě těchto poznatků vyvozeno doporučení pro praxi.

## **Klíčová slova**

Vyhřívané textilie, smart textilie, e-textilie, elektricky vodivá nit, kontaktování, hybridní vodivá nit, vyhřívaná pletená textilie

**Abstract**

The presented diploma thesis is focused on the influence of maintenance on the electrical parameters of heated textiles. The first chapter introduces the issue of smart textiles. Following chapter focuses directly on heated textiles, which are the main subject for the practical part of this thesis. The design of heated textile samples and the design of suitable testing methodology that will simulate the maintenance of e-textiles used in practical conditions. In the practical part, the proposed samples are implemented and tested. The obtained values are then presented and evaluated in the last part. At the end there are mentioned some recommendations for practice based on the findings.

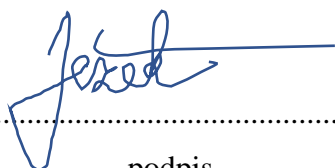
**Key words**

Heated fabrics, smart textiles, e-textiles, electrically conductive thread, interconnections, hybrid conductive thread, heated knitted fabric

## **Prohlášení**

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

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



.....  
podpis

V Plzni dne 25.5.2021

Vladimír Ježek

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Radku Soukupovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Mé poděkování patří také Ing. Janu Kalčíkovi za spolupráci při realizaci praktické části této práce.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 SMART TEXTILIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 DEFINICE SMART TEXTILIÍ A E-TEXTILIÍ.....	11
1.2 VYTVÁŘENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH CEST .....	16
1.3 KONTAKTOVÁNÍ.....	24
<b>2 VYHŘÍVANÉ TEXTILIE</b> .....	<b>31</b>
2.1 TECHNOLOGIE VYHŘÍVANÝCH TEXTILIÍ.....	32
2.2 SOUČASNÝ STAV VYHŘÍVANÝCH TEXTILIÍ.....	37
2.3 ZÁKLADNÍ STRUKTURY VYHŘÍVACÍCH ELEMENTŮ .....	43
<b>3 NÁVRH VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ ÚDRŽBY</b> .....	<b>46</b>
3.1 VÝBĚR MATERIÁLŮ A METOD PRO VYTVOŘENÍ VODIVÝCH CEST.....	47
3.2 VÝBĚR VHODNÝCH METOD PRO VYTVOŘENÍ KONTAKTŮ .....	53
<b>4 NÁVRH METODIKY TESTOVÁNÍ REALIZOVANÝCH VZORKŮ</b> .....	<b>54</b>
4.1 VOLBA MĚŘENÝCH PARAMETRŮ .....	54
4.2 PŘEHLED METOD PRO SIMULACI VLIVU ÚDRŽBY .....	55
4.3 VYTVOŘENÍ PLÁNU A METODIKY TESTOVÁNÍ .....	60
4.4 OČEKÁVANÉ VÝSLEDKY.....	63
<b>5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ</b> .....	<b>64</b>
5.1 VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ PRANÍM A SUŠENÍM.....	64
5.2 VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ V ŠOKOVÉ KOMOŘE A NA BEND TESTERU .....	70
5.3 SHRUTÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ.....	71
5.4 DISKUSE NAMĚŘENÝCH HODNOT A POROVNÁNÍ S PŘEDPOKLADY .....	74
5.5 DOPORUČENÍ PRO PRAXI.....	75
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>76</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>78</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
PŘÍLOHA A – SNÍMKY VZORKŮ ZE SKUPINY A.....	1
PŘÍLOHA B – SNÍMKY VZORKŮ ZE SKUPINY B .....	3
PŘÍLOHA C – DETAILNÍ SNÍMKY STRUKTURY MATERIÁLŮ.....	4
PŘÍLOHA D – SNÍMKY STAVU VODIVÝCH CEST PO TESTOVÁNÍ PRANÍM .....	6



## Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na zjištění vlivu údržby na elektrické parametry vyhříváných textilií. Tuto údržbu, představuje především praní v automatické pračce a následné sušení v automatické sušičce. Tyto úkony s sebou přináší jeden z hlavních problémů současných e-textilií, kterým je nezanedbatelná změna elektrických parametrů. K této změně parametrů dochází na vodivých částech, neoddělitelně spojených s textilním podkladem, vlivem postupné degradace materiálu během prací a vysoušecích cyklů.

V první kapitole této práce je popsána problematika chytrých textilií, které v posledních několika letech nabírají na popularitě. I když výzkum implementace elektroniky do textilu v současné podobě probíhá již několik desetiletí. Popularitu a rozmach komerčně nabízených produktů zažíváme až v několika posledních letech. A to zejména v důsledku pokroku technologií, které nově umožňují nejrůznější funkce při zachování komfortu pro uživatele a přijatelné spolehlivosti. V této úvodní části jsou definovány e-textilie a popsány technologie, kterými v současnosti lze na textilním podkladu vytvářet elektricky vodivé cesty a elektrické kontakty. Na první kapitolu navazuje kapitola druhá, která se již soustředí přímo na vyhřívání textilií. Ty pravděpodobně ještě budou muset projít jistou evolucí, než bude dosaženo dlouhodobé spolehlivosti v kombinaci s možností provádět běžnou údržbu. Navzdory těmto nedostatkům, lze již dnes na trhu najít komerčně nabízené produkty v různých cenových kategoriích podle, které se liší podle využití technologie. Pro představu o současném stavu v této oblasti jsou ve druhé kapitole představeny některé z těchto produktů.

V dalších kapitolách práce přechází k návrhu vzorků a výběru metodiky testování realizovaných vzorků. Tyto kapitoly jsou stěžejní z hlediska praktické části této práce, jejíž hlavním cílem je získání představy o schopnostech různých typů textilií odolávat běžným typům namáhání, kterým je nositelný textil v průběhu své životnosti vystaven. Následuje popis měření a prezentace naměřených hodnot. Získané výsledky jsou v poslední části zhodnoceny a na jejichž základě je vyvozeno doporučení pro praxi v oblasti realizace vyhříváných textilií vzhledem k jejich odolnosti při údržbě.

## Seznam symbolů a zkratk

zkratka	česky	anglicky
Ag	Stříbro	Silver
Cu	Měď	Copper
FR4	Tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí	Flame retardant 4 (glass-reinforced epoxy laminate material)
Ni	Nikl	Nickel
PCM	Materiál s proměnnou fází	Phase change material
PEDOT	Poly(3,4-ethylenedioxythiolen)	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)
PES	Polyesterové vlákno	Polyester fiber
RGO	Oxid redukovaného grafenu	Reduced graphene oxide

# 1 Smart textilie

V posledních letech došlo k přechodu z běžného textilu na funkční, který umožňuje např. odvádět vlhkost od těla a zároveň nepropouštět vodu v opačném směru nebo mít antibakteriální či antistatické vlastnosti. Za další krok v evoluci textilu, se dají považovat inteligentní textilie, tedy tzv. smart textilie, které díky implementaci elektroniky přímo do textilu otvírají zcela nové možnosti využití jinak běžně využívaného oblečení. Myšlenka byla i taková, že by se realizovalo oblečení, které by obsahovalo jakýsi přenosný počítač, který by řídil jeho funkci. Důraz zde ale musí být na pohodlí uživatele tzv. uživatelský komfort, který nesmí být obětován na úkor funkčnosti. [1]

Výzkum chytrých textilií začal zhruba před dvěma dekádami. Za smart textilie můžeme označit takové textilie, které díky integrovaným vodivým nitím, sensorům a dalším elektronickým prvkům poskytují jejich uživatelům nejrůznější funkce. Díky tomu vznikla nová odvětví možných aplikací těchto textilií, dokonce i v neoděvních oblastech. Upravené textilie mohou posloužit jako bariéry proti magnetickým nebo elektrickým polím, inteligentní filtry či separátory. Ve zdravotnictví mohou podle stavu pacienta zajistit dávkování léků. Smart textilie nalézají využití především v oblastech s požadavkem na snímání životních funkcí. Může se tedy jednat o pacienty v nemocnici, záchranáře, hasiče, piloty či bezpečnostní a vojenské složky. Hlavní výhodou integrování sensorů přímo do oděvů či uniforem je především uživatelsky pohodlné snímání fyzikálních a fyziologických veličin. Právě komfort uživatele je hlavní výhodou smart textilií oproti běžným metodám získávání dat o zdravotním stavu z povrchu lidského těla. [1]

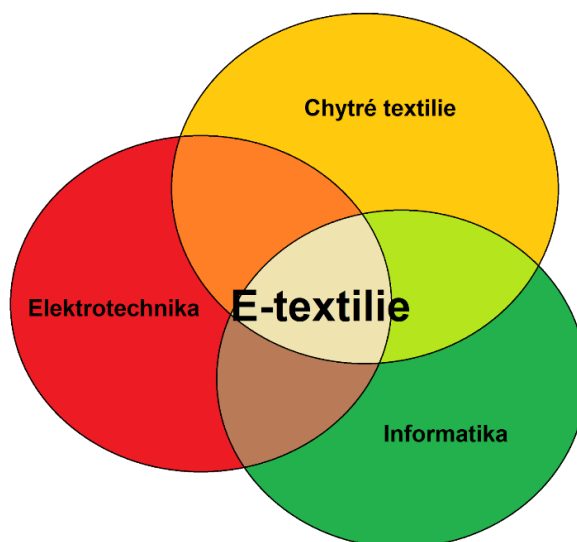
## 1.1 Definice smart textilií a e-textilií

Jedním z problémů vyplývajících z relativně rychlého rozvoje v oblasti chytrých textilií je neexistence pevně daných norem, které by udávaly standardy, které se v jiných oborech běžně využívají k zajištění kvality výroby a poskytují finálnímu spotřebiteli záruku očekávané kvality a funkčnosti. Jedním z náznaků o standardizaci v tomto odvětví je projekt „Standardization of smart textiles and wearable intelligence“ vědecké instituce CENTEXBEL z roku 2016. Cílem tohoto projektu bylo vytvořit standardy pro textilie, které kromě pro textil běžných funkcí nabízejí další možnosti využití díky integrované elektronice. Průnikem třech odvětví, kterými jsou chytré textilie, elektrotechnika a informatika vzniká nové odvětví e-textilií (Obr. 1).

Chytré textilie v tomto případě představují textilní materiály, které detekují nebo reagují na vnější podněty. Příkladem mohou být textilie reagující na teplo, světlo, tlak, elektrické pole nebo textilie obsahující membránu, která brání průniku vody z vnější strany, ale zároveň umožňuje dostatečnou prodyšnost k odvodu tělesné vlhkosti. Jako další příklad chytrých textilií, lze zmínit materiály s tvarovou pamětí, které mohou umožňovat např. funkci vrácení deformovaného materiálu do původního tvaru pomocí elektrického pole. [3]

Odvětví elektrotechniky a informatiky e-textiliím propůjčuje technologie spojené s nositelnou elektronikou a nositelnými počítači. To představuje převážně speciálně přizpůsobené komponenty, které umožňují připevnění a spolehlivou funkci při jejich zakomponování do textilu. Tyto komponenty mohou být např. senzory a miniaturní počítače zpracovávající získané hodnoty v kombinaci s vodivými cestami zajišťujícími napájení, přenos signálů nebo vyhřívání. [3]

- **Chytrá textilie/Inteligentní textilie:** Je definována jako funkční textilní materiál, který aktivně reaguje na změnu prostředí tzn. přizpůsobuje se změnám v prostředí, ve kterém se nalézá. [3]
- **Chytrý textilní systém:** Je schopen zamýšlené a využitelné změny svých vlastností na základě změny v prostředí nebo externího signálu. [3]
- **E-textilie:** Obecně lze konstatovat, že každá e-textilie je vlastně chytrou textilií. Která vzhledem k tomu, že obsahuje nejrůznější elektroniku a využívá nejen technologií z oblasti chytrých textilií, ale také technologie z oblastí informatiky a elektrotechniky.



Obr. 1: E-textilie jako průnik tří hlavních odvětví [3]

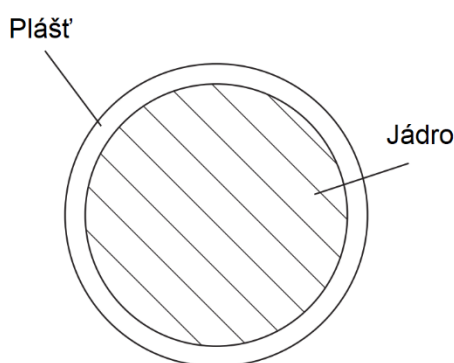
- **Úrovně integrace elektroniky do e-textilie:** Popisují, jakým způsobem jsou elektronické součásti spojeny s textilním materiálem. Složitější e-textilie samozřejmě mohou obsahovat několik zařízení nebo komponentů s různými úrovněmi integrace elektroniky na/do textilního materiálu. [3]
  - 1. úroveň (odnímatelná) elektronické části jsou k textilu připojeny tak, aby se dali bez poškození zařízení či textilu odejmout a poté zpětně zase připojit např. pomocí kapes, suchých zipů nebo druků.
  - 2. úroveň (pevně spojená) elektronické součásti jsou neodnímatelně připevněny na textili tak, že je není možné odpojit bez toho, aby došlo k poškození. Spojení je realizováno např. lepením, sešíváním nebo navařením.
  - 3. úroveň (kombinovaná) elektronika se skládá z části neoddělitelně spojené s textilem (např. vodivá dráha vetkaná do látky) a oddělitelné části (např. LED svítidlo).
  - 4. úroveň (zcela integrovaná) všechny elektronické součásti jsou integrovány přímo do textilu. [3]

Tato diplomová práce se zabývá především vyhřívanými textiliemi, které dle tohoto rozdělení patří do 3. úrovně integrace elektroniky do e-textilie. Část neoddělitelně spojená s textilem je zpravidla vodivá dráha, jejíž odpor je vyšší než v případě běžných vodivých drah, které mají za úkol jen vytvořit elektricky vodivé spojení a vykazovat co nejmenší ztráty. Vyšší odpor vodivých drah v oblasti vyhřívaných textilií je vyžadován z hlediska zvýšení Joulových ztrát (vydáváného tepla) při průchodu proudu vyhřívaným motivem o požadované velikosti.

### **Smart textilie s proměnnou fází**

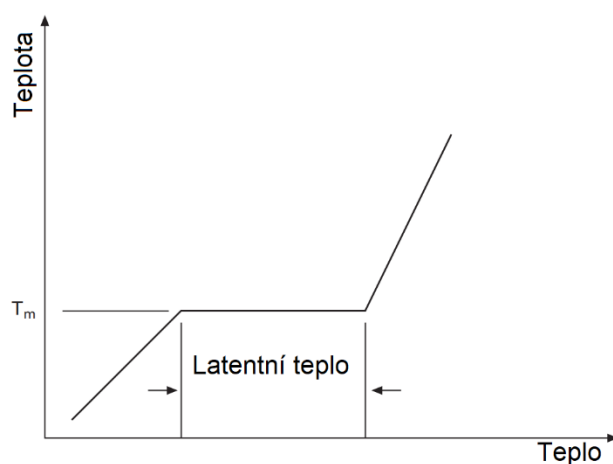
Pojem textilie s proměnnou fází (PCM) pojmenovává textilní materiály využívané k regulaci teplotních výkyvů. Úkolem těchto materiálů je zajistit pohodlí jejich uživatele i přes měnící se teplotu okolí. Této vlastnosti PCM dosahují díky schopnosti absorbovat, uložit a následně uvolnit poměrně velké množství energie ve formě tepla ve chvíli, kdy je to zapotřebí, tedy v poměrně úzkém teplotním rozsahu. To se děje díky integrovaným mikrokapslím (Obr. 2), které jsou schopné absorbovat tepla (funkční látka v mikrokapsli v tuto chvíli taje) a ve chvíli, kdy je to zapotřebí naopak energii ve formě tepla vydávat (funkční látka při tom tuhne). Tato vlastnosti je výhodná např. v situacích, kdy člověk v chladném

prostředí provádí nějakou fyzicky náročnou činnost, při které produkuje nadměrné množství tepla. Přebytečné teplo je možné v určité míře akumulovat (zbylé přebytečné teplo je nutné odvádět do okolí) a následně využít ve chvíli ukončení fyzické aktivity. Právě při přestávkách ve fyzické aktivitě v chladném prostředí je tělo náchylné na podchlazení. Textile s technologií změny fáze jsou v takových situacích vhodným řešením k zamezení diskomfortu nebo prochladnutí. Samotné mikrokapsle jsou aplikovány na povrch textilie, buď přímo pomocí např. polyuretanu, polyakrylonitrilu nebo ve formě polyuretanových matric, které se na textil pomocí laminace nainstalují. Mikrokapsle se používají z důvodů zajištění rovnoměrného rozprostření aktivní látky během kapalného stavu, jejíž plášť tvoří tenká a pružná vrstva polymeru. Struktura kapsle je znázorněna na Obr. 2.



Obr. 2: Struktura PCM mikrokapsle. (převzato z [1])

Ke změně fáze a přechodu z pevného skupenství na kapalně dochází v okamžiku, kdy je dosaženo teploty tání ( $T_m$ ), která je dána konkrétním typem použitého PCM ( $T_m$  na Obr. 3). Během celého procesu tání, kdy se teplo absorbuje a ukládá, zůstává teplota téměř konstantní. V průběhu ochlazování PCM se uložené teplo uvolňuje a mění se skupenství aktivní látky z kapalně na pevnou. Na Obr. 3, je znázorněna charakteristika přechodu mezi jednotlivými fázemi v závislosti na teplotě.



Obr. 3: Charakteristika přenosu tepla PCM v závislosti na teplotě. (převzato z [1])

## E-textilie

V oblasti e-textilií je dlouhotrvající výzvou vyřešit rovnováhu mezi komfortem a robustností při měření a současně zachovávat vlastnosti konvenční textilie. Důraz není za každou cenu kladen na přesnost, ale spíše na bezproblémovost běžného užívání, včetně provádění nezbytné údržby, která z dlouhodobějšího hlediska výrazně ovlivňuje životnost a spolehlivost zařízení. Klasické praní s postupem času ničí senzory a elektricky vodivé cesty. Proto se zkoumá, kolik pracích cyklů je daná textilie schopna vydržet. Další výzvou je využití technologií, které zajistí vyrobení co nejvíce kusů při co nejnižších nákladech, což je obecně trend dnešní doby. To může představovat problém, především z hlediska široké škály možností využití takových textilií. Pro výrobce pak může být náročné dosažení zisku z důvodu individuálního vývoje a výroby každého produktu. Při výrobě v malých sériích pak vzniká problém s tím jak „rozmělnit“ tyto náklady do výsledné ceny produktu tak, aby výsledná cena produktu zůstala na trhu konkurenceschopná a pro výsledného zákazníka přijatelná. [1]

Nedílnou součástí e-textilií jsou senzory, díky kterým mohou akční členy reagovat na vnější podněty buď autonomně nebo díky řídicí jednotce. V této oblasti nachází využití široká škála typů sensorů: tlakové senzory, RFID senzory, dotykové senzory, senzory vlhkosti, termočlánky sloužící k monitoringu teploty lidského těla nebo senzory pro měření EKG a mnoho dalších. Pro to, aby mohly tyto senzory spolu s akčními členy fungovat, je zapotřebí externího zdroje elektrické energie. V současnosti je prakticky jednou možností přenosu energie galvanické propojení jednotlivých elementů pomocí vodivých drah na textilním substrátu. V blízké budoucnosti však pro energeticky nenáročné aplikace bude pravděpodobně možné využít bezdrátového (indukčního) přenosu energie, kterým se eliminuje náchylnost vodivých cest k mechanickému poškození. Jelikož textilie při nošení mění svůj tvar, je výhodné využít piezoelektrické elementy, které při změně svého tvaru generují napětí. Akční členy bychom mohli kategorizovat do 2 skupin – vstupní a zobrazovací část. Mezi vstupní mohou spadat tkaniny citlivé na změnu tvaru (stlačení, ohyb) nebo kapacitní plochy, které reprezentují tlačítka. Do zobrazovací části spadají luminiscenční členy nebo např. příze, které umí vibrovat. [4]

## Současný stav e-textilií

Nositelné e-textilie čelí v dnešní době exponenciálnímu růstu. Každým dnem přibývají na trh nové textilie s novými funkcemi, mezi které patří například regulace tepla, osvětlení a citlivost na dotyk. Využití mají široké, například v oblasti herního průmyslu, zdravotnictví, sportu nebo i průzkumu vesmíru. Trend miniaturizace veškeré elektroniky umožňuje plynulý přechod nových funkcionalit do textilií a vyhnout se tak potenciálnímu bionickému stigma. Potenciál nositelné elektroniky vnímají samozřejmě i velké technologické společnosti jako je například Google, který se začal zabývat výzkumem dotykových textilií v rámci projektu Google Jacquard. Tento projekt vytváří jakýsi koncept nositelného počítače, který uživateli provádí činnosti jako je měření tlaku, teploty nebo umožňuje např. přijímání hovorů. Všechny procesy by měli probíhat takovým způsobem, aby uživatel nemusel přerušovat či omezovat svou aktuální činnost. Dále v této se v této oblasti v posledních letech velmi rozšířila nejrůznější nositelná elektronika. V dnešní době je na trhu široká nabídka komerčně dostupných produktů, mezi které patří např. fitness náramky a sporttestery. Velké oblíbenosti dosahují také chytré hodinky, které lidem ulehčují každodenní život či umožňují monitorovat sportovní aktivity. Nevýhodou však je to, že uživatel musí neustále myslet na to, aby si tato zařízení na sebe každý den nasadil, či si ho na konci dne sundal. Jedním z hlavních směrů nositelných e-textilií jsou vyhřívané textilie, kterými jsou např. vyhřívané bundy, termoprádlo nebo ponožky. Tento směr e-textilií s funkcí vyhřívání je detailněji představen v následujících kapitolách. [1]

### 1.2 Vytváření elektricky vodivých cest

Vytvářet elektricky vodivé cesty na textiliích lze několika technologickými postupy. Jednou z možností je využití vodivých past na bázi mikročástic stříbra, které se nanosí na textilní materiál pomocí sítotisku, dávkování jehlou nebo šablonovým tiskem. Tento způsob je velmi podobný postupu, jakým se aplikuje běžný potisk na textil, jen s tím rozdílem, že se místo barevné pasty využije zmíněná vodivá pasta. [5]

Druhou metodou vytváření vodivých cest v textilu je vyšívání elektricky vodivou nití. Tyto dnes již běžně dostupné speciální vodivé nitě obsahují kromě běžných textilních vláken i tenká vodivá kovová mikrovlákna vyrobená z mosazi, nerezové oceli nebo mědi. V případě, že od vodivého vlákna požadujeme propojení elektronických prvků, jsou využívány nitě s co nejvyšší elektrickou vodivostí. Naopak v aplikacích, kde je žádoucí přeměnit elektrickou energii na teplo (vyhřívané textilie), jsou využívány vodivé nitě s nižší



vodivosti (vyšší rezistivitou). To je výhodné jak z hlediska Joulových ztrát, tak především z hlediska podoby vyhřívaného motivu, u kterého z důvodu spolehlivosti preferujeme více kratších paralelních větví místo menšího počtu dlouhých větví. [5]

Existují i další možnosti, jak realizovat v textilu vodivé cesty, např. vytvářením vodivé tkaniny či pleteniny na tkacích strojích. Těmito způsoby je možné vytvořit velmi pružné a prodyšné e-textilie, které si zachovávají vysoký komfort pro uživatele, což je nezbytné např. při výrobě vyhřívaných ponožek nebo spodních vrstev prádla.

### **Vodivé nitě a příze:**

Vodivá textilní nit vzniká skrutem vláken do tzv. pramenů. Funkci vodiče elektrického proudu zajišťují vlákna kovová a nevodivá textilní vlákna zpravidla zajišťují ostatní vlastnosti (především mechanickou pevnost), které jsou od textilní nitě vyžadovány. Vodivé nitě jsou využívány především pro vyšívání, najdou však své uplatnění také v případě pletených nebo tkaných textiliích. Naopak vodivé příze, které jsou tvořeny několika vlákny spojenými tzv. skaním, (seskáním několika přízí dohromady, čímž vznikne jedna pevnější příze) se k šití nepoužívají, ale lze je úspěšně využívat k pletení nebo tkaní. Vlákna obecně se dají dělit do dvou skupin na tzv. nekonečná vlákna a na vlákna staplová. Mezi nekonečná vlákna patří pokovená a kovová vlákna s nevodivým obalem. Staplová vlákna jsou většinou tvořena z krátkými střížemi z vodivého materiálu (např. kovové příze).

### **Příze tvořená opřádáním textilního vlákna kovovým drátkem**

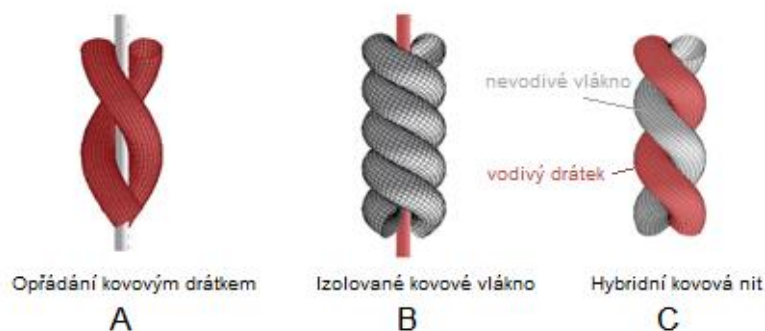
Textilní vodivé vlákno tvoří jádro příze a je opřádáno jedním nebo více vodivými drátky (Obr. 4 A). Tato metoda však není v e-textiliích rozšířena, jelikož při tomto uspořádání je vlákno velmi náchylné k polámání vodivých drátků, což by znamenalo nefunkčnost zařízení. Využití tedy tato metoda nachází především v textiliích využívající kovová vlákna pro dekorační účely.

### **Izolované kovové vlákno**

Tyto příze mají jádro tvořené tenkým kovovým drátkem, který je opředen nevodivými textilními vlákny (Obr. 4 B). Textilní vlákna zajišťují ochranu kovového jádra a zvyšují odolnost příze vůči mechanickému namáhání. Pokud je používána tato nit, je třeba při kontaktování nejprve narušit nevodivou vrstvu a teprve poté je možné provést kontaktování například pomocí svařování, cínování nebo krimpování.

### Hybridní vodivé nitě

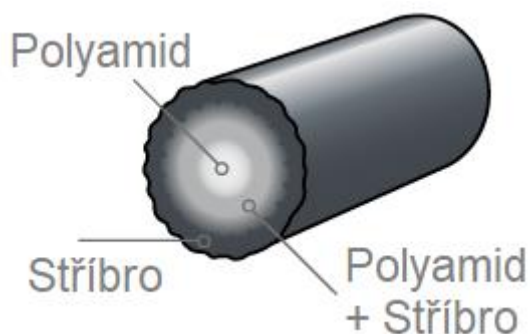
Hybridní vodivé nitě jsou realizovány seskáním kovového mikrodrátku (nejčastěji měděný nebo postříbřený měděný drátek) spolu s nevodivým textilním vláknem (nejčastěji polyesterovými multifilamentními vlákny). Jak je patrné z Obr. 4 C, tato příze nemá jádro a plášť, ale je tvořena seskáním dvou vláken dohromady.



Obr. 4: Struktura kovových přízí (převzato z [6])

### Postříbřené polyamidové vlákno SilveR.STAT

Jedno z nejvíce používaných vodivých vláken je vyráběné francouzskou firmou R.Stat, která se již přes 40 let zabývá především výrobou vodivých vláken. Jeho struktura je tvořena na základě polyamidového vlákna, které je na povrchu postříbřeno (Obr. 5). Tato konstrukce je výhodná zejména z hlediska vynikající elektrické vodivosti, antibakteriálních vlastností a vysoké elasticity při téměř konstantním odporu. Nevýhodou pak je především to, že při mechanickém namáhání postupně dochází k odlupování stříbra, což vede k postupnému zhoršování elektrické vodivosti. Vrstva stříbra je tak tenká (řádově desítky nanometrů), že si vlákno zachovává své původní textilní vlastnosti, a to dle stránek výrobce dokonce i po více než padesáti pracích cyklech a tisíci hodinách v peci vyhřáté na 60 °C při 70 % relativní vlhkosti. Vlákno vykazuje lineární vodivost s hodnotou odporu kolem 10  $\Omega$ /cm. [7]



Obr. 5: Struktura vlákna SilveR.STAT (převzato z [7])

### Staplové vodivé vlákno

Staplové vlákno narozdíl od nekonečných vláken je tvořeno stříží, jejíž délka zpravidla nepřesahuje 6,4 cm. Nosnou část tvoří polyesterová nevodivá vlákna, která slouží k zajištění pevnosti a mechanické odolnosti. Vodivá vlákna bývají z nerezové oceli a jsou propletena mezi nevodivými vlákny. Pokud staplové vlákno napneme dojde k přiblížení vodivých vláken blíže k sobě, což se projeví snížením elektrického odporu. [8]

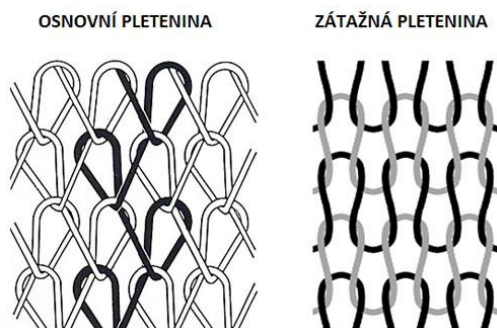
### Elektricky vodivé textilie:

#### Pletená textilie

Je plošná textilie, která se vyrábí provázáním soustav nití pomocí oček tzv. pletením. Druh soustavy nití rozhoduje o tom, jakou strukturu a vlastnosti bude výsledná pletenina mít. Jedná se o hojně používaný materiál, protože jeho výroba je díky vysoké efektivitě strojního pletení mnohem rychlejší než tkaní. Pletení se rozděluje podle použité soustavy nití na osnovní a zátažné. [9]

Osnovní pletenina se vyrábí z podélné soustavy nití, která se nazývá osnova. Osnovní nitě procházejí pleteninou ve směru sloupků a každé očko v řádku je vytvořeno z jiné nitě, proto osnovní pleteninu nelze párat. Osnovní pletenina se vyrábí na osnovních pletacích strojích. [9]

Zátažná pletenina se vyrábí z příčné soustavy nití. Jednotlivé nitě procházejí pleteninou ve směru řádku a celý řádek nebo dokonce i celá pletenina, může být vyrobena z jedné nitě a dá se tedy snadno párat. Zátažná pletenina se používá více než osnovní, a to především kvůli jednoduchosti pletacích strojů na kterých se vyrábí. Zátažnou pleteninu jejíž strukturu znázorňuje Obr. 6, lze vyrábět dokonce i ručně (pomocí pletacích jehlic). [9]



Obr. 6: Struktura osnovní a zátažné pletenin (převzato z [10])

Poměrně širokou nabídku vodivých pletenin mohou reprezentovat pleteniny Shieldex R od firmy Statex. Pleteniny Shieldex jsou nabízeny v mnoha hmotnostech a strukturách, včetně úpletů s jedním nebo obousměrným roztažením. Použité nitě jsou vodivé díky pokovení tenkou vrstvou ryzího stříbra, aby se zabránilo mechanickému poškození tenké této vrstvy je povrch opatřen ještě ochrannou vrstvou. [11]

Na Obr. 7 je vodivá pletenina Shieldex® Techniktex P130+B (78 % polyamid, 22 % elastomer, pokovení 99 % stříbro). Tato textilie je vhodná pro aplikace, kde je vyžadováno elektromagnetické stínění, sledování životních funkcí nebo svalová a nervová stimulace. Velkou výhodou posříbřených materiálů jsou kromě vysoké elektrické vodivosti také antibakteriální vlastnosti, které textilií propůjčuje stříbro.



Obr. 7: Pletenina Shieldex® Techniktex P130+B (převzato z [11])

### **Netkaná textilie**

Netkaná textilie je útvar spojených textilních vláken, filamentů (nekonečných vláken) nebo staplových přízí, u kterých spojení není provedeno běžnými technikami pletení, tkaní, paličkování, splétání nebo všívání. Jednotlivé elementy tohoto materiálu jsou spojovány dohromady tepelným, chemickým nebo mechanickým provázáním. Používají se díky své odolnosti vůči vlivům vnějšího prostředí především v oblasti ochranných oděvů, izolací, geotextilií, filtrů a hojně jsou také používány v automobilovém průmyslu.

### **Vytváření vodivých motivů:**

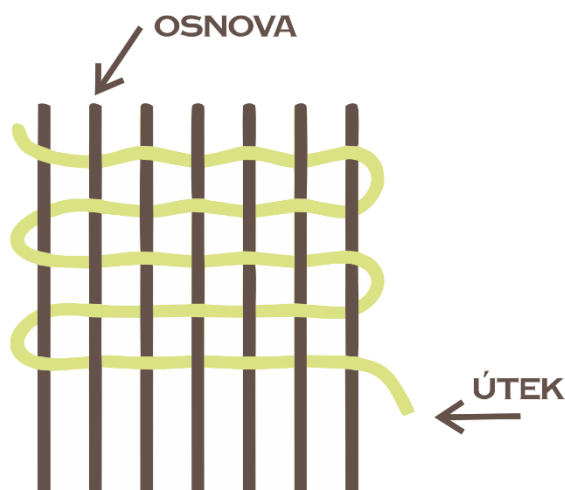
#### **Vyšívání**

Vyšívání je tradiční metodou, která se používá k vytváření dekorativních motivů na textiliích. Vyšívání elektricky vodivou nití však umožňuje vytváření vodivých vzorů na jinak nevodivé textilní látce. Nítě, které se používají k vyšívání obsahují kromě běžných např. polyesterových vláken i kovová mikrovlákna, která mohou být z různých materiálů

(postříbřená měď, nerezová ocel nebo mosaz). Právě materiál kovového vlákna určuje vodivost konkrétní nitě, která je v daném případě použita. Pro vyhřívané textilie jsou vhodné nitě s nižší elektrickou vodivostí, jelikož při průchodu proudu mají větší tepelné ztráty a vyšší odpor je také výhodný z hlediska návrhu struktury vyhřívaného motivu. Samotné vyšívání motivu na substrát lze provádět i ručně, rychlejší je však vyšívání pomocí speciálních vyšívacích strojů (výrobce např. Tajima, Bernina nebo Brother). Před začátkem vyšívání je nutné základní substrát pevně uchytit do rámu, který jej udržuje rovnoměrně napnutý a poté je možné začít vyšívat jehlou na kterou je navlečená vodivá nit. Velikou výhodou této metody vytváření vodivých cest je to, že umožňuje vytvářet motivy jakéhokoliv tvaru a není třeba hledět na strukturu základního substrátu. Jelikož během vyšívání dochází k poměrně velkému zatěžování nitě třením a pnutím, bývá používán lubrikant na bázi silikonu nebo parafínu, který tření omezuje. Omezení všech nežádoucích vlivů, které by mohly způsobit přetržení vodivé nitě je zcela zásadní, protože pokud by došlo k defektu bude to znamenat nefunkčnost celé vodivé dráhy. [12]

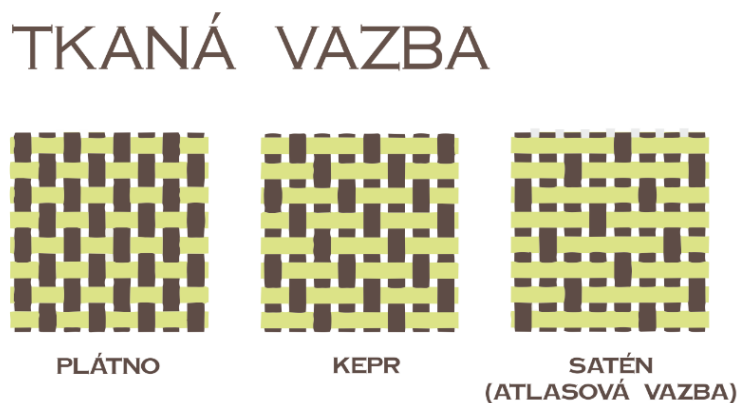
### Tkaní

Při vytváření vodivých cest při tkaní jsou do struktury nevodivých vláken vetkaná i vlákna vodivá, která mohou sloužit k vytvoření elektrického obvodu. Samotný proces tkaní probíhá na tkacím stroji, vytvářením dvou vzájemně kolmých soustav nití, které nazýváme osnovou a útkem. Podélná soustava (osnova) a příčná soustava (útek) jsou vzájemně provázány, tak jak je znázorněno na Obr. 8.

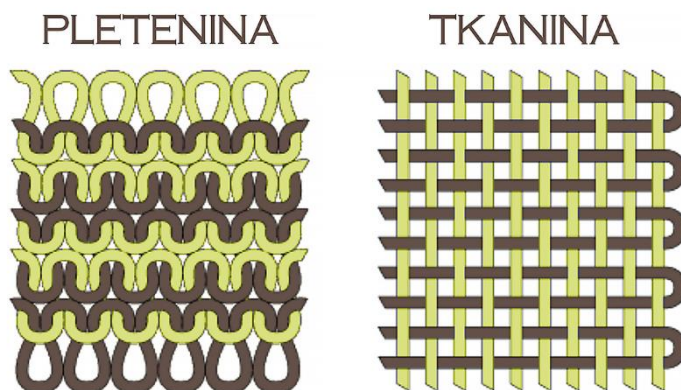


Obr. 8: Struktura tkané textilie (převzato z [13])

Tkané textilie využívající vodivé nitě se využívají především k odvádění elektrostatického náboje z povrchu textilního produktu, kterým může být např. pracovní oděv pro práci v nebezpečném prostředí. Nevýhodou této metody je omezení z hlediska tvaru vytvářeného motivu, protože kvůli nutnosti držet se směru vláken je možné vytvářet jen čtvercové, resp. obdélníkové motivy, což může být nevýhodné především z hlediska zbytečné délky vodivých cest. Tuto metodou lze použít i pro vyhřívané textilie, v takovém případě jsou vodivé nitě zpravidla jen v osnově, kde jsou poměrně málo mechanicky namáhány. Tato skutečnost je z hlediska vyhřívaných textilií zásadní, jelikož pokud dojde k porušení nitě, znamená to zpravidla nefunkčnost celé větve. Právě malé mechanické namáhání nitě je hlavní výhodou tkaní oproti šití, při kterém naopak dochází k velkému mechanickému namáhání nití. [9]



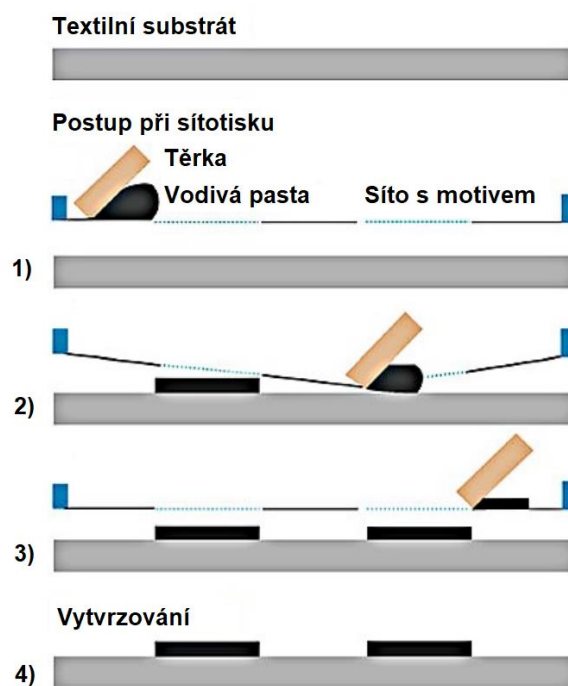
Obr. 9: Základní typy vazeb tkaných textilií, ze kterých se odvozují další typy (převzato z [13])



Obr. 10: Znáornění struktury pletené a tkané textilie (převzato z [13])

## Sítotisk

Sítotisk je v elektrotechnickém průmyslu hojně využívaná metoda pro vytváření složitých elektronických obvodů na deskách plošných spojů. Mezi jeho přednosti patří především možnost realizovat jakkoli složitý obvod jednoduše, levně a opakovatelně. I když je tato metoda rozšířena především pro již zmiňované desky plošných spojů, lze ji použít i k vytváření vodivých motivů v oblasti e-textilií. Vodivé cesty se v tomto případě realizují nanášením vodivých past v požadovaném vzoru na textilní podklad, na kterém již musí být nanesen tzv. primer. Na se aplikuje vodivá pasta a následně dojde k zapouzdření, tak aby byla zajištěna ochrana před mechanickým poškozením. Tyto pasty jsou tvořené základní polymerní matricí, která materiálu propůjčuje pružnost a množstvím miniaturních částic kovů jako je stříbro, měď nebo zlato. Tyto částice se v matrici navzájem dotýkají a zajišťují tak elektrickou vodivost pasty. Při vytváření vodivého motivu touto metodou se nejprve připraví textilní substrát, na který se aplikuje primer a následně se položí síto s požadovaným motivem. Na toto síto se nanese vodivá pasta a v místech požadovaného motivu se protlačí skrz síto pomocí těrky (celý postup je znázorněn na Obr. 11). Tak je přenesen motiv na textilní substrát a následuje vytvrzovací proces, který probíhá při teplotě okolo 150 °C po dobu zhruba 25 minut tak, aby bylo zajištěno neporušení textilního substrátu. Nevýhodou této metody je špatná mechanická odolnost, obzvláště během praní může poměrně snadno dojít k porušení tištěného motivu, které následně vede k nefunkčnosti celé větve konkrétního zařízení. [14]



Obr. 11: Proces vytváření vodivých cest pomocí sítotisku (převzato z [14])

### 1.3 Kontaktování

Při realizaci elektrických kontaktů nejen v oblastí e-textilií, ale i v ostatních elektrotechnických oblastech většinou rozlišujeme dva typy kontaktů. Použitý způsob kontaktování volíme na základě toho, co se od konkrétního elektrického propojení očekává. Pokud je cílem bezpečné propojení dvou vodivých částí, které z principu funkce daného zařízení není v průběhu používání třeba rozpojovat. Bývá v takovém případě propojení zpravidla provedeno pevným kontaktem, který zaručuje vysokou odolnost a poměrně snadno dosažitelný nízký přechodový odpor. Nevýhodou pevného spojení je nepřekvapivě náročnější realizace rozpojení spojená s destrukcí tohoto kontaktu. Pokud je třeba takový spoj rozdělit (například v důsledku výměny části zařízení), nevyhneme se zničení kontaktu a následně jeho opětovnému vytvoření. V případech, kde lze předpokládat časté rozpojování přicházejí na řadu odnímatelné elektrické kontakty. Ty umožňují v případě potřeby danou část zařízení snadno odpojit a následně zase jednoduše připojit. To je zvláště výhodné v případě e-textilií, protože některé hlavní části je třeba před údržbou odpojit. Zařízením, které je vhodné připojit pomocí rozebíratelného kontaktu bývá zpravidla napájecí zdroj. Tomu nejenže hrozí poškození během údržby, ale také z uživatelského hlediska je příjemné mít možnost baterii snadno odpojit a provést její výměnu.

#### **Nerozebíratelná spojení:**

##### **Pájení**

Pájení je metoda kontaktování, při které dochází k vodivému spojení materiálů za pomoci přídavného materiálu (pájky). Základní vlastností pájky je nízká teplota tavení (oproti spojovaným materiálům). Této vlastnosti se využívá tak, že se roztavená pájka nanese na místo námi vytvářeného elektrického kontaktu, kde dojde k difuzi atomů pájky se spojovanými materiály. V elektronice jsou zpravidla používány pájky na bázi cínu, stříbra a mědi (SAC) s nízkou teplotou tavení z důvodu ochrany elektronických součástek citlivých na teplo. V oblasti e-textilií však kvůli riziku poškození textilního materiálu vlivem vysoké teploty, jsou využívány materiály s ještě nižší teplotou tavení. Těmi jsou např. nízkoteplotní pasty na bázi bismutu a cínu s přídavkem stříbra (kvůli zlepšení vodivosti a smáčivosti). Jejich hlavní nevýhodou bohužel je, že jsou poměrně křehké. Právě v oblasti e-textilií však křehkost spoje způsobuje problémy zejména při praní a sušení textilu. [15]



Příklady pájek s nízkou teplotou tání: [16]

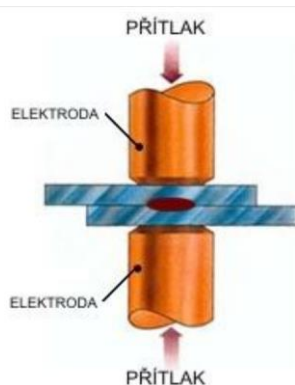
- pájka typu SAC (Sn 96,5 %, Ag 3 % a Cu 0,5 %) - teplota tání 219 °C
- pájecí pasta Bi-Sn-Ag (Bi 57 %, Sn 42 % a Ag 1 %) - teplota tání 139 °C



Obr. 12: Pájené kontakty na vodivé textilií (převzato z [17])

### Odporové svařování

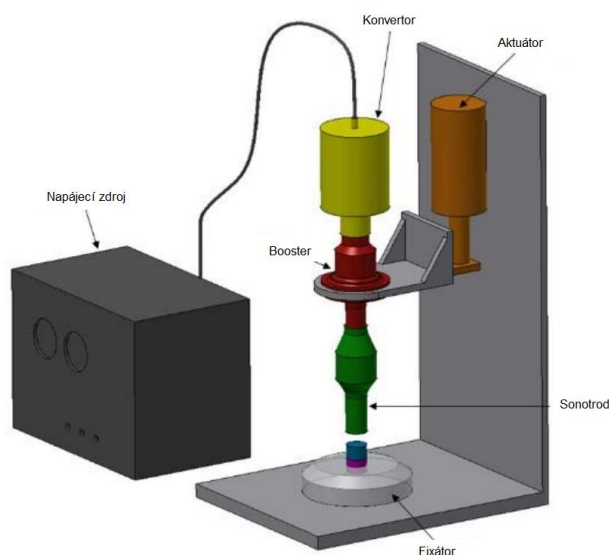
Tato metoda vytváření kontaktů se používá ke spojení dvou kovů. Odporové svařování realizujeme tak, že kovy, které chceme svařit umístíme mezi svařovací elektrody v místě námi požadovaného sváru a za současného působení přítláčné síly a tepla vzniklého průchodem proudu svařovanými materiály mezi elektrodami dosáhneme pevného nerozebíratelného spojení obou materiálů. Výhodou odporového svařování je to, že již na začátku svařování vlivem vysoké teploty dojde k odstranění izolace vodičů a následně se čistá vlákna bez problému nakontaktují. [18]



Obr. 13: Princip odporového svařování (převzato z [18])

## Ultrazvukové svařování

Tato metoda svařování využívá vysokofrekvenční vibrace, které zapříčiňují ohřev a následné spojení dvou na sebe doléhajících částí, z nichž jedna je pevně zafixována. Vysokofrekvenční vibrace většinou z hlediska frekvence překračují hranici lidského sluchu (20 Hz - 20 kHz). Při ultrazvukovém svařování se obvykle používají vibrace o frekvencích od 15 kHz do 75 kHz. Mezi hlavní výhody tohoto způsobu svařování patří nízké svařovací časy, absence jiskření a nižší tepelné ovlivnění svařovaných materiálů než u tavných metod. Zajímavostí této metody je to, že umožňuje svařovat kovové materiály s nekovovými (např. navařit hliník na sklo). Využití tato metoda nalézá také při svařování termoplastických dílů. Za nevýhodu lze považovat to, že je možné svařovat jen poměrně malé díly a pro každý spoj je nutné na míru nakonfigurovat svářecí zařízení. [19]



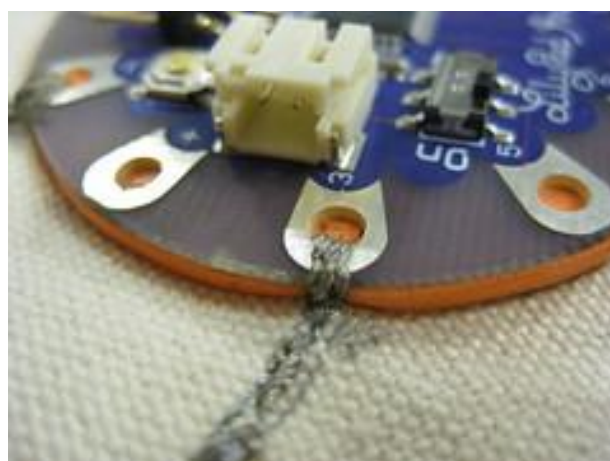
Obr. 14: Schéma zařízení pro ultrazvukové svařování (převzato z [19])

## Přešití

Přešití je jedním ze způsobů vytvoření nerozebíratelného spojení mezi tvrdým (pevným) vodičem a měkkým vodičem (např. hybridní vodivá nit). Přešití se realizuje tak, že holé pevné vodiče přeshijeme vodivou neizolovanou nití, čímž vznikne vodivé spojení těchto dvou vodičů (Obr. 15). Při přešívání je třeba zajistit velmi těsné a pevné obepnutí obšivaného vodiče, aby se zamezilo jeho pohybu nebo uvolnění. Další možnost využití této metody je kontaktování součástek určených k aplikaci na e-textilie, které mají připravená pokovená očka, která se přešíjí (Obr. 16). Nevýhodou této metody je nestabilní elektrický odpor spojení. Naopak výhodou je jednoduchost provedení, velmi nízká cena a v případě použití součástek, které jsou pro tento typ spojení navrženy také dobrá mechanická odolnost. [20]



Obr. 15: Přešití odizolovaných vodičů plochého kabelu vodivou nití zig-zag stehem (převzato z [20])



Obr. 16: Kontaktování Lilypad Arduino pomocí přešití pokovených oček vodivou nití (převzato z [20])

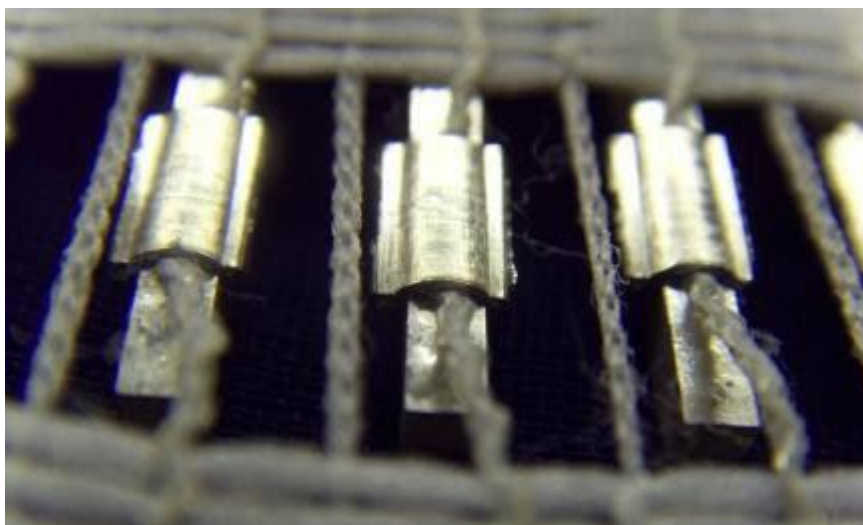
## Lepení

V současnosti se k vytváření vodivého spoje lepením využívá široká škála lepidel, která v zásadě můžeme rozdělit na izotropní vodivá lepidla, anizotropní vodivá lepidla a nevodivá lepidla [21]. Hlavním rozdílem mezi nimi je, že anizotropní lepidla jsou vodivá pouze v jedné ose. Izotropní lepidla pak vykazují stejnou vodivost ve všech směrech a jsou většinou na bázi dvousložkové epoxidové pryskyřice ve které vodivost zajišťují částice stříbra, které tvoří 80-90 % objemu. Vysoký podíl stříbra sice zajišťuje dobrou vodivost, nevýhodou však může být poměrně vysoká cena. Vytvrzování lepidla se obvykle provádí při 150 °C a může trvat několik minut nebo i hodin v závislosti na tom, jaké parametry výsledného spoje požadujeme. Vytvrzováním při vyšší teplotě po delší dobu můžeme docílit vyšší vodivosti, která je však vykoupena tím, že je výsledný spoj křehčí. [21]

## Rozebíratelná spojení:

### Krimpování

Krimpování je hojně využívaná technologie propojení, při které dochází k pevnému nerozebíratelnému spojení kontaktů při pokojové teplotě. Vzhledem k tomu, že se při této metodě nepracuje s vysokými teplotami, jeví se jako vhodná pro vytváření elektrických kontaktů na textiliích. Princip je založen na mechanické deformaci tzv. krimpů (na Obr. 17), čímž dojde ke slisování vodičů (např. vodivých nití) a vytvoření plynotěsného elektrického kontaktu. Působením mechanické síly potřebné k deformaci krimpů, ve většině případů dojde také k porušení izolační vrstvy spojovaných materiálu, takže se není třeba zabývat odizolováváním vodičů. [22]



Obr. 17: Detail krimpovaných kontaktů snímače tlaku v sedačce (převzato z [22])

Reprezentativním příkladem krimpů může být kontakt Crimpflex nabízený firmou Nicomatic, který pomocí ostrých jazýčků propíchne v šesti bodech textilií v části, ve které se nacházejí vodivá vlákna. Kontakty jsou nabízeny ve dvou standardních roztečích 2,54 mm a 1,27 mm. Crimpflex je vhodný pro aplikaci na textilie na bázi polyesteru, FR4, PTFE nebo polyimidu. Dle informací výrobce je schopen spolehlivě plnit svou funkci v rozmezí teplot od  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nevýhodou krimpování je poměrně vysoká cena a také nezanedbatelné riziko, že při pokusu o nakontaktování nakonec nedojde ke správnému vodivému spojení. [23]



Obr. 18: Crimpflex od společnosti Nicomatic (převzato z [23])

### Vodivý suchý zip

Vodivý suchý zip je jednou z možností realizace rozebíratelného spojení, která původně byla využívána v oblasti antistatických pracovních oděvů, ale uplatnění nachází také v oblasti integrace elektroniky na textil. Princip zůstává stejný jako u běžného suchého zipu. Tedy dva protilehlé pásky, jeden má na povrchu háčky a druhý smyčky. Přiložením těchto ploch k sobě se háčky zaháknou do smyček a vytvoří tak poměrně pevné spojení těchto dvou částí, které je možné s použitím větší síly opětovně bez poškození rozpojit. Aby bylo docíleno požadované vodivosti mezi oběma částmi je materiál háčků a smyček postříbřen. Výhodou vodivého suchého zipu je především velmi rychlá a snadná možnost rozpojení nebo spojení obvodu a jednoduchá výroba ze které plyne i nízká cena. Za nevýhodu lze považovat to, že se při častém rozpojování dochází k opotřebení a postupné ztrátě funkce. Další nevýhodou je, že se při praní zanáší, což také postupně vede ke zhoršení funkčnosti.



Obr. 19: Vodivý suchý zip (převzato z [24])

### Kovové nýtovací druky

Kontaktování pomocí kovových nýtků nazývaných také jako druky je další metoda, kterou lze realizovat rozebíratelné elektrické spojení. Princip spočívá v připevnění jedné části druku k textilií buď přišitím nebo nýtováním za pomoci nýtovacích kleští nebo kladívka. K této části druku (pevně spojené s textilií) pak nacvaknutím připojíme druhou část, čímž nám vznikne rozebíratelné vodivé spojení. Tato metoda se hodí především k zajištění napájení e-textilie pomocí baterie. Jelikož většina chytrých textilií vyžaduje před praním odpojení baterie. Pokud máme baterii připojenou pomocí druku, před praním ji jednoduše odepneme a po provedené údržbě opět snadno připojíme. Často používané pro elektrody EKG nebo uzemnění antistatických pracovních oděvů. Jedny z nejpoužívanějších typů dрукů jsou Rolland, WUK a AUTO-MOTO. Ve většině e-textilií nejlépe fungují druky typu WUK. Jejich nevýhodou však je to, že nejsou vhodné pro aplikaci na pletené textilie.



Obr. 20: Druk (snap connector) k připojení 9V baterie (převzato z [25])

## 2 Vyhřívání textílie

Vyhřívání textílie, využívající elektrickou energii k zajištění tepelného komfortu jejich nositelů se poprvé objevily již za druhé světové války, kdy je využívali posádky hloubkových bombardérů. Intenzivnější výzkum a vývoj však probíhá především v posledních dvaceti letech, kdy byly vyvíjeny nejrůznější metody vhodného pájení či vytváření vodivých cest. Díky tomuto vývoji je již možné zajistit dostatečně funkční a spolehlivý vyhřívání e-textil, který nalézá uplatnění v nejrůznějších odvětvích.

Samotný tepelný komfort představuje pocit člověka, vzhledem k teplotě okolí v daném prostředí. Pokud je dosaženo vyváženého odvodu člověkem vyprodukovaného tepla do okolního prostoru, je dosaženo tzv. tepelné pohody. Člověk tedy nepocituje ani zimu ani přehřátí z důvodu nedostatečného odvodu tepla např. v důsledku vysoké okolní teploty nebo fyzické aktivity zvyšující nároky na odvod tepla od těla. Tento pocit ovlivňuje několik faktorů, které můžeme rozdělit na dvě skupiny subjektivní a objektivní.

- Subjektivní faktory ovlivňující pocit tepelného komfortu v prostředí jsou především fyzický a psychický stav konkrétního člověka, schopnost aklimatizace (míra přizpůsobení se venkovním podmínkám), věk a podobné neovlivnitelné interní faktory daného jedince. [26]
- Mezi objektivní faktory, které mají vliv na pocit tepelného komfortu jsou především teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a rychlostí proudění vzduchu. [26]

Tepelnou rovnováhu člověka lze popsat rovnicí: [26]

$$M - W = C_{\text{res}} + E_{\text{res}} + K + C + R + E + S$$

kde:

M ..... Energetický výdej

W ..... Mechanická práce

$C_{\text{res}}$  ..... Výměna tepla konvekcí v dýchacích cestách

$E_{\text{res}}$  ..... Výměna tepla v dýchacích cestách evaporací

K, C, R ..... Výměna tepla kondukcí, konvekcí a evaporací na povrchu kůže

S ..... Teplo kumulované v těle

Veličiny představují tepelný výkon na jednotku plochy povrchu těla, jejich základní jednotkou tedy je tedy  $W/m^2$ .

Tělo produkuje teplo převážně na základě dvou procesů: [26]

- Bazální metabolismus, u kterého teplo vzniká na základě biologických procesů z chemické energie potravy.
- Svalový metabolismus, zde teplo vzniká jako vedlejší produkt při fyzické práci člověka.

Nejběžnějším a nejpohodlnějším nástrojem k zajištění tepelné pohody člověka je od nepaměti oblečení. Kvůli nedostatečné přirozené izolaci povrchu našeho těla tvoří oblečení ve většině případů hlavní prvek ovlivňující míru odvodu tepla z našeho organismu.

## 2.1 Technologie vyhříváných textilií

Váhové koeficienty pro Tab. 1 porovnávaných parametrů metod vytváření vodivých cest pro vyhřívání textilií (1-5, kde 5 značí nejvyšší prioritu):

Tab. 1: Porovnání metod vytváření vodivých cest pro vyhřívání textilií

	Odolnost při praní a sušení	Mechanická odolnost	Náročnost integrace	Komfort z hlediska uživatele	Homogenita rozložení teploty	Celkové vážené hodnocení
Vyšívané vyhřívací textilie s hybridními vodivými nitěmi	4	4	5	3	4	66
Vyšívané vyhřívací textilie s pokovenými polyamidovými vlákny	3	3	5	3	3	56
Vyšívané vyhřívací textilie se svazky vodivých mikrodrátů	2	3	4	2	4	47



Tkané vyhřívací textilie	4	5	3	3	3	59
Pletené vyhřívací textilie s hybridními nitěmi	5	5	3	5	5	72
Pletené vyhřívací textilie s pokovenými polyamidovými vlákny	4	5	3	5	4	65
Vyhřívané textilie vytvořené nanesením flexibilních vodivých past	3	3	2	3	3	44
Vyhřívané textilie s motivem vytvořeným pomocí obšívání	1	2	3	2	2	31

- Odolnost při praní a sušení 5
- Mechanická odolnost 3
- Náročnost integrace 4
- Komfort z hlediska uživatele 2
- Homogenita rozložení teploty 2

Z Tab. 1 je patrné, že při orientaci na odolnost vůči praní a sušení jako nejvýhodnější pro vytváření vodivých cest, resp. vyhřívacích elementů vycházejí hybridní vodivé nitě, a to jak při jejich použití v pletené textilii, tak při vytváření vodivého motivu pomocí vyšívání. Hlavní výhodou hybridních nití je jejich mechanická odolnost, která je důležitá především z hlediska životnosti a spolehlivé funkce finální e-textilie. Díky své odolnosti v kombinaci s poddajností srovnatelnou s běžnými textilními nitěmi nacházejí tyto hybridní nitě v oblasti e-textilií široké spektrum využití. Naopak nejhůře z hodnocení vychází metoda obšívání

vodivého drátu, která dosahuje nízkého finálního výsledku především kvůli nízké odolnosti při praní a sušení. Obšívání má však i další negativní vlastnosti, mezi které patří nízký komfort pro uživatele z důvodu tvrdosti vodiče. Špatná je i homogenita rozložení teploty plynoucí z toho, že obšívání vodiče nelze umístit příliš blízko sebe.

Tab. 2: Porovnání metod vytváření elektrických kontaktů ve vyhříváných textiliích

	Odolnost při praní a sušení	Odolnost mech. namáhání	Náročnost integrace	Komfort z hlediska uživatele	Kontaktní odpor	Celkové vážené hodnocení
Pájení	2	2	1	2	5	40
Svařování (odporové)	3	4	4	4	5	66
Svařování (ultrazvukové)	4	4	3	5	5	70
Šití	2	3	5	5	1	50
Krimpování	3	3	5	1	5	59
Lepení	3	3	4	4	3	56
Rozebíratelné spojení (druk)	3	4	5	3	3	61

Váhové koeficienty pro Tab. 2 porovnávaných parametrů metod vytváření elektrických kontaktů (1-5, kde 5 značí nejvyšší prioritu):

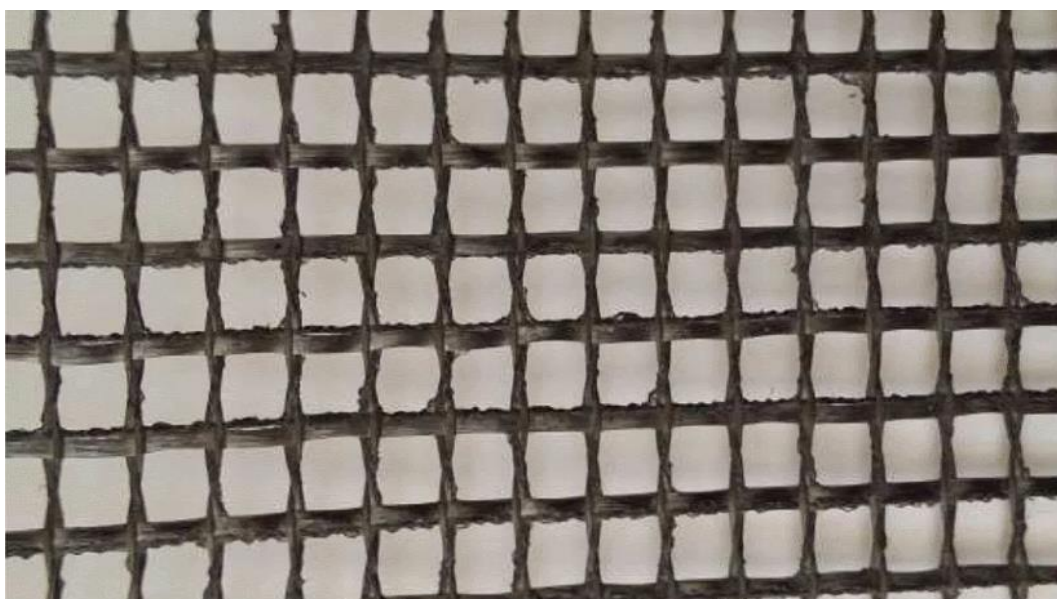
- Odolnost při praní a sušení 5
- Odolnost mechanickému namáhání 4
- Náročnost integrace 3
- Komfort z hlediska uživatele 2
- Kontaktní odpor 3

Z Tab. 2 je patrné, že nejvýhodnějšími metodami pro vytváření kontaktů je ultrazvukové a odporové svařování. Důvodem je především nízký kontaktní odpor, vysoký komfort pro uživatele a dostatečná mechanická odolnost. Je nutné brát v potaz, že hodnocení je orientované na e-textilie s předpokladem častého praní jako jsou spodní vrstvy oblečení, ponožky atd. Proto je při hodnocení parametrů odolnosti při praní a sušení zvolen nejvyšší koeficient. Důvodem je zaměření této práce na zkoumání vlivu údržby na elektrické parametry vyhříváných textilií. To mimo jiné plyne z faktu, že podstatná část ze všech aktuálně komerčně nabízených e-textilií jsou právě vyhříváné textilie. Jedním z největších problémů dnešních vyhříváných textilií je právě údržba. To je patrné z nabídky komerčních produktů, u kterých z velké části praní v automatické pračce není vůbec možné (vyhřívací elementy tvořené uhlíkovými vlákny). Případně pokud je praní dovoleno dochází při něm postupně ke ztrátě funkce vlivem výskytu různě závažných poškození na vodivých částech. Z tohoto hodnocení vcelku dobře vyhází vytváření spojení pomocí krimpů. Je však třeba brát v potaz nízký komfort pro uživatele a nebezpečí možného prodirání textilie. Jednoznačně nejhůře pak vychází kontaktování pájením. Důvodem je náročná integrace a nízká odolnost spoje především při praní a mechanickém namáhání.

Vývoj elektricky vodivých textilních materiálů umožnil nové aplikace v oblasti nositelné elektroniky, kromě oblastí elektromagnetického stínění či antén také elektricky vyhříváné textilie. Jednou z možností, jak vyhřívát textilie je technologie propagovaná společností Gerster TechTex, která vyrábí osnově pletené textilie s implementovanými uhlíkovými vlákny, které slouží jako elektrický vodič a při průchodu proudu požadované teplo. Naopak vlákno Bekinox používá jemné drátky nerezové oceli, které mohou být vsíté do nevodivého textilního materiálu a zajistit tak vyhřívání.

Pro srovnání schopností elektricky vyhříváných materiálů, byly vybrány tři různé technologie. Dva vzorky jsou z hybridní příze, která obsahuje tzv. stínící vrstvu obsahující nerezovou ocel a směs tkaného textilního materiálu tvořenou směsí vodivých a polyesterových vláken. Třetí vzorek využívá jako vodivý element poměděná polyesterová vlákna. Materiály se vyznačují různými vlastnostmi, které určují jejich použitelnost. Tkaná textilie se vyznačuje tím, že je antibakteriální a hypoalergenní. Ochranná vrstva je chemicky stabilní, avšak bez antibakteriálních účinků podobně jako poměděná polyesterová vlákna. Chemická stabilita je vyžadována především kvůli procesu praní a působení potu na textilní materiál. Antibakteriální vlastnosti jsou zase výhodné z dermatologického hlediska

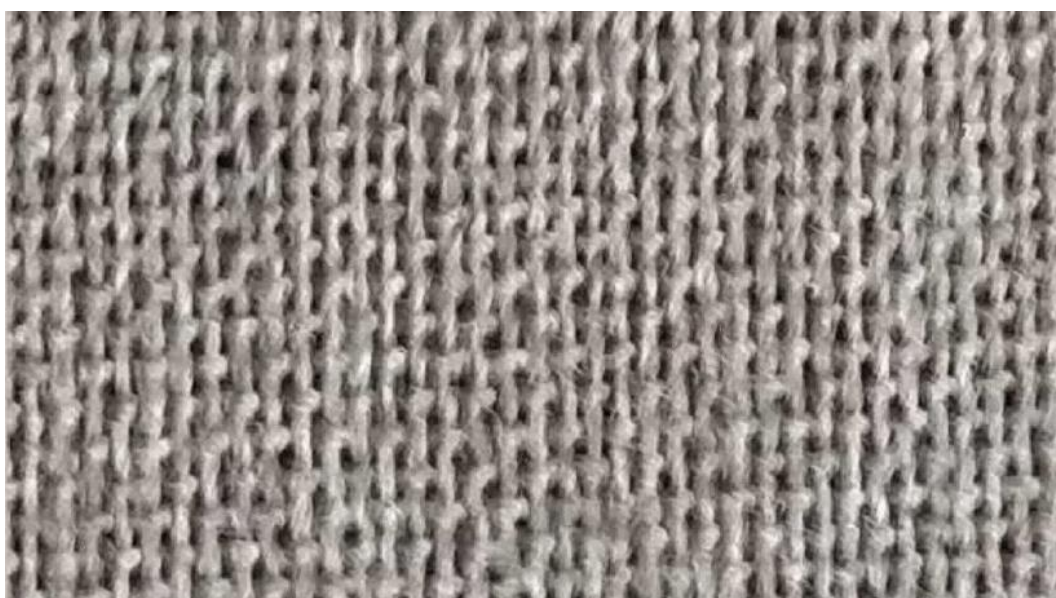
a schopnosti eliminace zápachu. Vzorky porovnávané v článku [27] jsou zhruba ve stejné velikosti, a to téměř v rozměru typické postele tedy 1,8 x 1 m. Tloušťka všech třech vzorů je řádově desetina milimetru. Ochrannou vrstvu tvoří síť s rozměrem 5 mm. Příze prvního vzorku (na Obr. 21) je tvořena směsí sklolaminátu jako nosného materiálu a nerezové oceli, která slouží jako vodič. Vzorek tkané textilie na bázi polyesteru potaženého vrstvou mědi, která slouží k zajištění vodivosti je na Obr. 22. Třetí vzorek na Obr. 23 je opět tkaná textilie, tentokrát tvořena kombinací materiálů Shieldex a PES v útku. Osnova je tvořena nití se složením 30 % SilverStat, 30 % Shieldex a 40 % PES.



*Obr. 21: Detail vodivé vrstvy z nerezové oceli (převzato z [27])*



Obr. 22: Tkanina na bázi poměděných polyesterových vláken (převzato z [27])



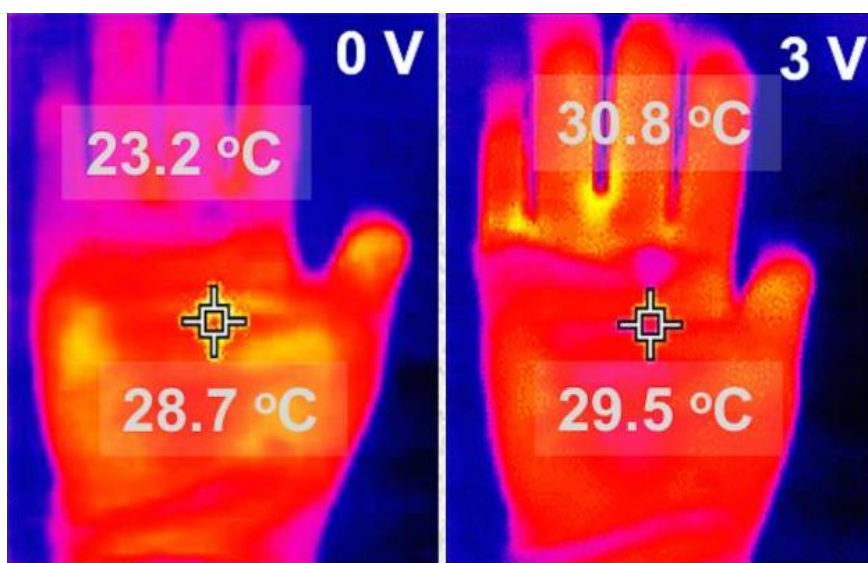
Obr. 23: Obrázek tkaného textilního materiálu (převzato z [27])

## 2.2 Současný stav vyhřívaných textilií

V současnosti je již na trhu nabízen poměrně široký sortiment vyhřívaných textilií od několika výrobců. Nejčastěji se jedná o vyhřívané deky, ponožky, rukavice, podvlekové prádlo nebo bundy. Elektricky vyhřívané oblečení je schopné nahradit a předčít objemné konvenční oblečení, které podstatně omezuje pohyblivost uživatele a také neumožňuje snadnou regulaci teploty, která je zapotřebí při střídavé fyzické aktivitě, jakou může být například lyžování.

### Experimentální třívrstvá rukavice

Rukavice vyvinutá Trishou Andrew obsahuje (prostřední) vrstvu potaženou vodivým polymerem PEDOT (poly 3,4-ethylendioxytiofen), ten je napájen z malé knoflíkové baterie o hmotnosti 1,8 gramu. Díky této technologii si rukavice zachovávají svou lehkost, prodyšnost a schopnost přizpůsobit se ruce uživatele. Zajímavostí je především použití „chemické depozice z plynné fáze“, která prozatím v tomto odvětví není rozšířena především z důvodů vysoké technické náročnosti. Při zkouškách odolnosti textilie potažené PEDOTem proti praskání, zvrásnění nebo jiným změnám v důsledku zahřátí bylo nejprve připojeno napětí 4,5 V, které vygenerovalo teplotu na povrchu rukavice 28 °C. Následoval test napětím 6 V, při kterém teplota na povrchu textilie dosahovala 45 °C. Ani při jednom z testů nenastaly dramatické morfologické změny, které by vylučovaly využití tohoto materiálu, jakožto topného článku pro vyhřívání e-textilie. Demonstrační rukavice, byla schopná pomocí miniaturní knoflíkové baterie udržet teplotu dlaně shodnou s teplotou na konečcích prstů po dobu až osmi hodin. [28]



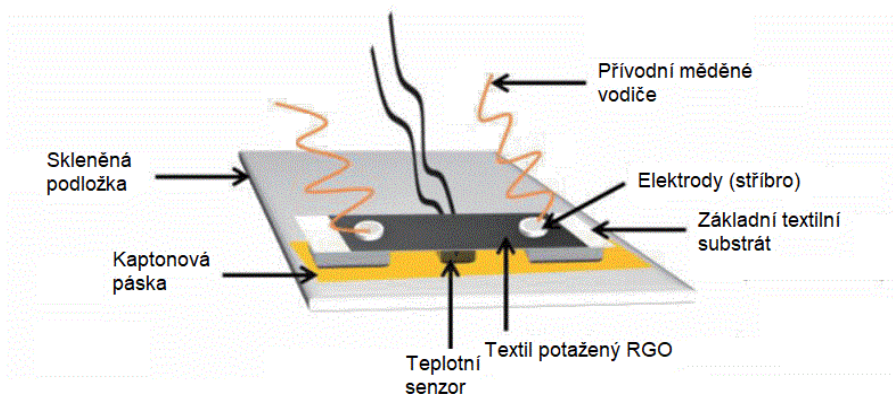
Obr. 24: Termovizní obrázek třívrstvé vyhřívání rukavice vyvinuté Trishou Andrews (převzato z [28])

Celý systém je založený na běžné bavlněné rukavici, u které je oblast prstů potažena nano vrstvou vodivého polymeru, který umožňuje průchod malému množství proudu (řádově nanoampéry), který je však dostačující k dosažení příjemné teploty a zároveň neohrožuje uživatele ani při ponoření rukavice do vody. Rukavice byla pro demonstraci této technologie využita z důvodů prokázání spolehlivé funkčnosti při vysoké pružnosti, která je u rukavic nezbytná k volnému pohybu prstů. Kromě tepelných testů, bylo také provedeno několik testů na kontrolu namáhání, praní, trhání, oprav a dlouhodobého provozu. [28]

K dosažení větší praktičnosti, však bude nutné běžnou knoflíkovou baterií v budoucnu nahradit dobíjecím akumulátorem, jelikož využívání jednorázových baterií v podobných aplikacích není uživatelsky praktické ani ekonomické. I když se v článku [28] zmiňuje testování odolnosti při opakovaném praní, nejsou zde zmíněny konkrétní počty cyklů, a dokonce ani jednoznačné zhodnocení stavu a parametrů po těchto testech. Právě prateľnost bývá slabinou materiálu PEDOT, který byl v tomto případě použit a lze si ho představit jako vodivý průhledný inkoust.

### Jednorázová experimentální vyhřívaná textilie

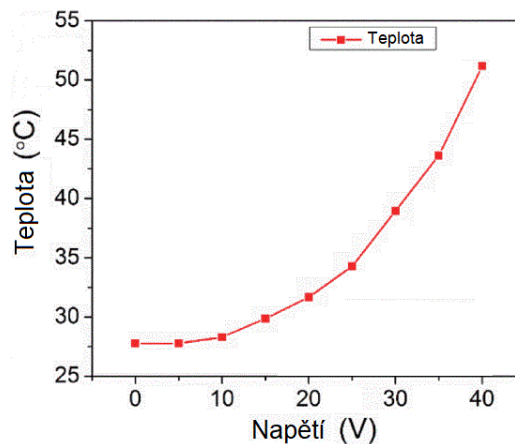
Vyhřívaná textilie na bázi RGO (reduced graphene oxide) naneseného na látkovém substrátu nabízí levnou alternativu k dražším vyhřívaným textiliím. Předváděcí vzorek navržený v [29] využívá směs inkoustu a RGO nanočástic, do které byla bavlněná látka ponořena. Následně bylo provedeno žihání, které vedlo k odstranění rozpouštědla a přeskupení atomů RGO na látkovém podkladu. Tím došlo k vytvoření tenkého vodivého filmu grafenu o tloušťce cca 200  $\mu\text{m}$ . Následně dalším žiháním bylo dosaženo vytvrzení elektrických kontaktů a zpevnění všech vodivých částí.



Obr. 25: Schéma RGO naneseného na bavlněnou látku za účelem vyhřívání [29]

Obr. 25 schematicky naznačuje bavlněný hadřík o velikosti přibližně 18 x 6 mm, na kterém jsou nanášeny nanočástice grafenu, které tvoří vodivou cestu a slouží k vyhřívání. Ke grafenu jsou pomocí pasty na bázi stříbra připájeny měděné vodiče, které zajišťují napájení z baterie, která již není na schématickém obrázku zobrazena. Po přivedení napětí se teplota na povrchu vodivé vrstvy pomalu zvyšuje. Zhruba po jedné minutě dochází k jejímu ustálení. Při připojení k napětí o velikosti 40 V, se po jedné minutě teplota vzorku ustálila na hodnotě 52  $^{\circ}\text{C}$  (při odebíraném výkonu 480 mW). [29] V článku však není jasně

uvedeno, co bylo tímto testem sledováno. Z hlediska bezpečnosti při praktického využití je totiž napětí o velikosti 40 V už dosti vysoké.



Obr. 26: Závislost teploty (ustálené) na velikosti napětí [29]

Zkoumaný materiál vykazuje negativní teplotní koeficient odporu (při zahřátí odpor klesá), což lze popsat vzorcem:

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + \alpha \Delta T)$$

kde:

$\alpha$ ..... Teplotní součinitel elektrického odporu

$R(T)$ ..... Odpor při teplotě

$R(T_0)$ ..... Odpor při počáteční teplotě

$\Delta T$ ..... Změna teploty

Textilie vyhřívána pomocí technologie RGO představuje inovativní řešení v oboru e-textilií. Jako hlavní výhody se jeví nízká hmotnost, odolnost vůči korozi a chemická stabilita. Otázkou zůstává, zda si tato technologie najde uplatnění v praxi. Velikou výhodou se jeví poměrně nízká cena, která je však vykoupena tím, že případné zařízení na této bázi, bude mít velmi omezenou životnost vzhledem k nemožnosti údržby. [29]

### Vyhřívání termoprádla Glovii GX

Komerčně nabízený produkt sady vyhřívání termoprádla Glovii GX využívá karbonových vláken k vyhřívání v oblasti zad, břicha, beder a kolen. Dle prodejce [30] uhlíková vlákna zajišťují rovnoměrnou distribuci tepla a disponují dlouhou životností s vysokou spolehlivostí provozu. Napájení je provedeno dvěma lithiovými bateriemi umístěnými ve speciálních kapsách, které by měly být schopny poskytnout dostatek energie pro nepřetržitý ohřev po dobu až šesti hodin při nejnižší intenzitě vyhřívání. Napájení má



každá část (kalhoty a triko) samostatně, takže jednotlivé části lze používat i odděleně. K zajištění tepelného komfortu při různých venkovních podmínkách slouží tlačítko, kterým lze volit mezi třemi intenzitami vyhřívání. Při nejvyšší intenzitě je povrch textilie vyhříván na zhruba 44 °C, při této intenzitě vydrží vyhřívání zhruba 2 hodiny. Naopak při zvolené nejnižší intenzitě, při které je teplota textilu zhruba 34 °C by měla výdrž na baterii dosahovat výrobcem udávaných 6 hodin. Následné nabíjení Li-Ion baterie na plnou kapacitu 2600 mAh by pak nemělo trvat déle než 6 hodin. Výkon topných těles realizovaných karbonovými vlákny je 10 W (horní díl) a 11,5 W (spodní díl). Stejně jako velká část jiných komerčně nabízených vyhříváných textilií, není tento produkt vhodný pro praní v pračce. V případě nutnosti údržby je doporučeno použít vlhký hadřík s malým množstvím čistícího prostředku, vždy však s odpojenou baterií a zaizolovaným napájecím kabelem. Cena tohoto setu se na začátku roku 2021 pohybuje kolem 4 000 Kč. [30]



Obr. 27: Set vyhříváného termoprádla Glovii GX (převzato z [30])

### Vyhřívané rukavice W-TEC Boubin

Tyto komerčně nabízené vyhřívané rukavice patří do nižší cenové kategorie vyhříváných textilií. Napájení každé rukavice zajišťují tři běžné tužkové baterie typu AA, které by dle prodejce [30], měli zajistit vyhřívání po dobu 6-7 hodin. Vyhřívání zajišťují uhlíková vlákna, která se nacházejí na prstech a vrchní straně rukavice. Nevýhodou rukavic je nemožnost nastavení intenzity vyhřívání, která je sice zpočátku poměrně velká, ale postupně znatelně klesá kvůli snižujícímu se napětí baterií. Jmenovitý výkon je 2,5 W a teplota uvnitř rukavice zpočátku dosahuje až 55 °C. Výrobek nelze prát v pračce, sušit v automatické sušičce ani ždímat kroucením. Cena se na začátku roku 2021 pohybuje kolem 850 Kč. [30]



Obr. 28: Vyhříváné rukavice W-TEC Boubin (převzato z [30])

### Vyhříváné textilie WarmX

Komerčně nabízené produkty od společnosti WarmX narozdíl od výše zmíněných produktů nevyužívají k vyhřívání uhlíková vlákna, ale postříbřené polyamidové nitě vpletené do spodní vrstvy oděvu. Velkou výhodou této technologie je to, že tyto produkty lze prát v pračce při 30 °C a pracím cyklu určeném pro vlnu. Mezi další výhody patří nízká hmotnost, vysoký komfort používání a dlouhá doba výhřevu na jedno nabití. Postříbřené vodivé nitě také mohou být v přímém kontaktu s pokožkou a není tedy potřeba prohřívát žádnou ochrannou vrstvu. O napájení se stará lithium-iontová baterie s výstupním napětím 12 V. Ta má kapacitu 1250 mAh a dle výrobce je schopna zajistit funkci vyhřívání po dobu až šesti hodin. Samozřejmostí této úrovně vyhříváných textilií je ochrana proti zkratu a možnost nastavení výhřevu ve třech úrovních. Nabídka v podstatě představuje několik typů triček a kalhot termoprádla, ve kterých jsou vyhřívány především oblasti ramen, šije, ledvin a v případě spodního dílu pak oblasti kolen, stehen a chodidel.



Obr. 29: Vyhříváné textilie WarmX (převzato z [31])

### 2.3 Základní struktury vyhřívacích elementů

Elektrický odpor vyhřívaného motivu je nejdůležitějším parametrem při návrhu vyhřívaných textilií. Jeho velikost je dána především materiálem topných vodivých nití, dále pak způsobem realizace sběrných elektrod a vliv má také zvolená metoda kontaktování. Velikost odporu je přímo úměrná délce motivu vyhřívacího elementu a délce sběrných elektrod, naopak nepřímo úměrná počtu použitých paralelních větví. Velikost celkového odporu určuje také způsob zapojení vyhřívacích elementů. Pokud je naším cílem vytváření rozměrově větších a složitějších vyhřívacích ploch je nezbytné smysluplně vytvářet sériové a paralelní kombinace dílčích vodivých nití/vláken, které ve schématickém návrhu reprezentují rezistory.

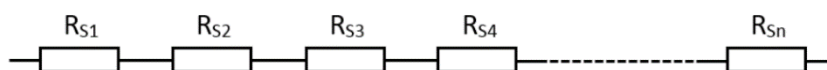
#### Odporová smyčka (sériové zapojení)

Při sériovém řazení se připojené napětí rozdělí mezi jednotlivé odpory a všemi rezistory teče stejný proud jehož velikost je dána Ohmovým zákonem:

$$I = \frac{U}{R_C}$$

Celkový odpor vyhřívacího elementu, ze kterého v tomto případě určujeme proud, který prochází všemi rezistory spočítáme jednoduše sečtením odporů všech dílčích sériově řazených elementů:

$$R_C = R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} + R_{S4} + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$



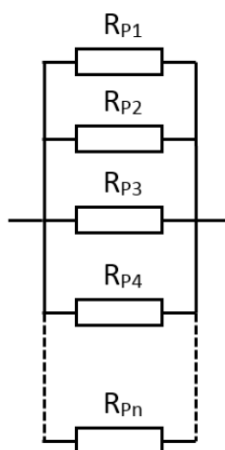
Obr. 30: Sériové řazení dílčích vyhřívacích elementů

Pokud chceme realizovat sériovou kombinaci vyhřívacích nití nebo vláken nejsnazším řešením je vytvoření tzv. meandrové struktury. To znamená spojení jednotlivých vyhřívacích elementů za sebe tak, že rovnoměrně vyplní celou plochu, kterou si přejeme vyhřívát. Výsledkem je relativně homogenní ohřev i v případě geometricky komplikovanějších tvarů. Nevýhodou pak je především to, že pokud dojde k přerušení vodivé nitě nebo vlákna např. vlivem mechanického namáhání, stává se vyhřívací element nefunkční na celé své ploše.

### Paralelní zapojení

Paralelní řazení vyhřívacích elementů zajišťuje, že na všech paralelně řazených odporech je stejné napětí, ale proud se dělí mezi jednotlivými odpory dle Ohmova zákona. Výsledný celkový odpor tedy lze spočítat součtem admitancí (převrácených hodnot odporů) jednotlivých paralelně řazených odporů:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{p1}} + \frac{1}{R_{p2}} + \frac{1}{R_{p3}} + \frac{1}{R_{p4}} + \frac{1}{R_{pn}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

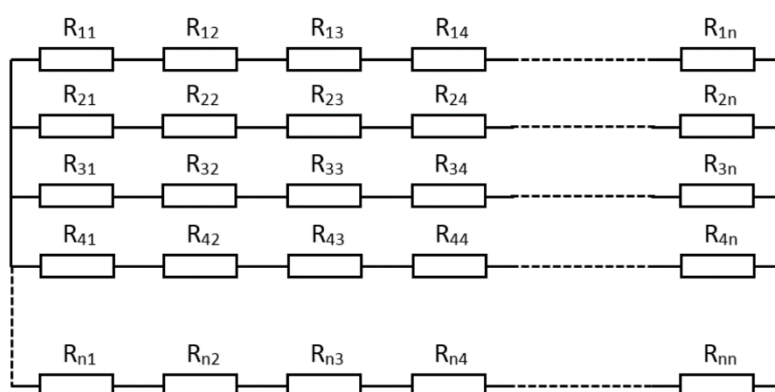


Obr. 31: Paralelní řazení dílčích vyhřívacích elementů

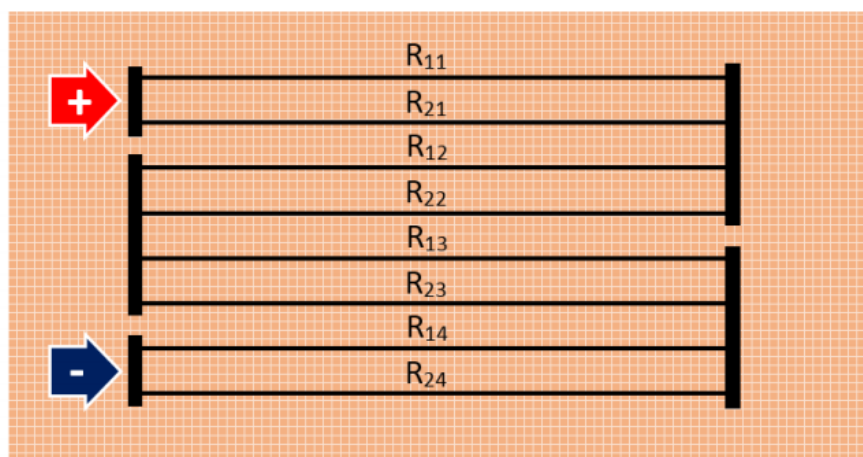
Pro vyhřívání textilií je paralelní řazení vyhřívacích nití a vláken nejjednodušší realizovat tzv. žebříkovou strukturou, kde jsou jednotlivé délkové elementy vyhřívací nitě řazené vedle sebe tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné vyplnění požadované vyhřívací plochy. Délkové vyhřívací elementy jsou řazené paralelně a propojeny pomocí sběrných elektrod. U těch se snažíme dosáhnout co nejnižšího odporu jelikož, vysoká teplota sběrných elektrod není žádoucí. Tímto způsobem zapojení lze dosáhnout homogenity ohřevu v celé ploše. Velkou výhodou např. oproti sériovému zapojení je to, že pokud dojde k porušení jednoho (nebo několika) délkového elementu, nedochází k plošné nefunkčnosti celé části zařízení, ale jen konkrétní přerušené větve. V případě přerušení jedné podélné větve se ztráta vyhřívacího elementu vykompenzuje mírným zvýšením proudu v ostatních paralelních větvích. Díky tomu zůstává topný výkon stejný a porucha má vliv jen na homogenitu vyhřívání v místě poruchy.

### Sérioparalelní zapojení

Sérioparalelní zapojení kombinuje oba způsoby zapojení, výhodou je podobně jako u paralelního zařízení to, že porucha na některém z prvků znamená sice nefunkčnost konkrétní sériové větve, ale ostatní paralelní větve jsou i nadále funkční. Sérioparalelní zapojení je velmi výhodné v případech, kdy používáme nit s vysokou vodivostí (nízkým odporem). K vytvoření požadovaného motivu by sice stačilo realizovat motiv pomocí jedné dlouhé nitě. Ovšem z hlediska spolehlivosti se jedná o nevhodné řešení, protože každé drobné poškození bude mít podstatný vliv na funkci celku.



Obr. 32: Schématické znázornění sérioparalelního zapojení dílčích elementů vyhřívané oblasti



Obr. 33: Příklad sérioparalelního řazení vyhřívacích elementů

### 3 Návrh vzorků pro testování údržby

#### Zdroj napájení pro navrhované vzorky

Nezbytným krokem při návrhu podoby vzorků pro testování je volba napájecí jednotky, která bude do topných elementů dodávat elektrickou energii. Pro vyhřívané textilie není napájení rovnou ze sítě vhodné řešení, a to hned ze dvou důvodů. Prvním je, že většina vyhřívaných textilií je navržena k využití ve venkovních podmínkách, kde není přístup k síťovému napětí. Druhým důvodem je bezpečnost z hlediska ochrany před úrazem elektrickým proudem. Proto zpravidla nejen vyhřívané textilie, ale obecně téměř všechny e-textilie využívají jako zdroj napětí dobíjecí akumulátor nebo v horším případě jednorázové baterie typu AA nebo AAA. Pro napájení vyhřívaných textilií je kromě bezpečnosti, nízké hmotnosti a velikosti důležitá především dostatečná kapacita. To plyne především z faktu, že oproti jiným e-textilním aplikacím je při této spotřebováno poměrně velké množství energie. Samozřejmě malá velikost a nízká hmotnost se příliš neslučují s vysokou kapacitou, která je taktéž nezbytná k zajištění dostatečné doby provozu ve venkovních podmínkách. Akumulátory se často umísťují do speciální kapsy, tak aby co nejméně omezovaly uživatele, ale bylo je v případě vybití možné snadno vyměnit a prodloužit tak dobu provozu.

Velikost testovacích vzorků byla zvolena tak, aby zhruba odpovídala pro využití ve vyhřívaném bederním pásu. Pro tyto aplikace se jeví jako vhodná napájecí jednotka s kódovým označením BAK-74260L od belgické společnosti Belginova NV. Ta se věnuje elektrickému vyhřívání v oděvním průmyslu již od roku 2007 a patří pod ní mimo jiné také značka 30seven®, pod kterou je tato jednotka komerčně nabízena. Základem této jednotky je lithium-iontový akumulátor s kapacitou 2600 mAh, který by měl být schopen napájet testovací vzorky po dobu až 7 hodin v závislosti na úrovni vyhřívání. Jmenovité výstupní akumulátoru napětí je 7,4 V. Dobíjení akumulátoru se provádí speciální nabíječkou stejnosměrným napětím o velikosti 8,4 V proudem až 1 A. Zdroj umožňuje volbu mezi čtyřmi úrovněmi vyhřívání. Dle Václava Plice, který v diplomové práci [32] měřil parametry tohoto zdroje, využívá tato jednotka pulsní šířkovou modulaci (PWM). Výstupní obdélníkový signál má tedy stále stejnou amplitudu, ale na základě zvolené úrovně vyhřívání se mění střída výstupního signálu. Dále je také v [32] uvedeno, že se jedná o poměrně měkký zdroj, protože při změně zátěže dochází k poměrně velké změně amplitudy výstupního napětí. Připojení zdroje ke zkoumaným vzorkům bude provedeno pomocí druků.



Obr. 34: Li-Ion baterie typ BAK-74260L značky 30seven.

### 3.1 Výběr materiálů a metod pro vytvoření vodivých cest

Pro vytváření vodivých cest, resp. vyhřívacích elementů, byly zvoleny dvě metody. První zvolenou metodou vytváření vodivých motivů na textilií je použití hybridních vodivých nití v pletené textilií. Druhá zvolená metoda je založena na vyšívání vyhřívaného motivu hybridní vodivou nití na běžném textilním substrátu. Obě tyto metody realizace vodivých cest na textilií se při použití hybridních nití jeví v oblasti e-textilií jako perspektivní, a to především díky dostatečné mechanické odolnosti a možnosti jejich praní. Použití hybridních vodivých nití je výhodné jak z hlediska jejich mechanické odolnosti, tak také kvůli možnosti volby z poměrně široké nabídky vlastností jednotlivých nití v závislosti na tom, z jakého materiálu je vytvořené vodivé vlákno. Pro vyhřívání se nejvíce hodí vodivé nitě s vyšším elektrickým odporem a tepelnou odolností. Narozdíl od většiny ostatních možností e-textilních funkcí, kde je zpravidla požadováno propojení jednotlivých součástí vodivými cestami s co nejnižším odporem. Pro experimenty realizované v rámci této práce byly vybrány speciálně vyvinuté hybridní šicí vodivé nitě od společnosti VÚB a.s. z Ústí nad Orlicí. Tyto nitě jsou chráněny užitným vzorem, který spoluvlastní ZČU. Níže v Tab. 3 jsou uvedeny parametry hybridních nití, ze kterých jsou tvořeny vyhřívací elementy v navržených vzorcích. Tyto vzorky budou v praktické části této práce podrobeny testování vlivu praní, sušení a skokové změny teploty na jejich elektrické parametry.

Tab. 3: Vlastnosti použitých nití

Číslo vzorku nitě	Složení vzorku	Délková hmotnost (tex)	Elektrický odpor ( $\Omega/m$ )	Pevnost za sucha (cN/tex)	Tažnost za sucha (%)	Optický průměr (mm)
1	58%PESh/42%bronz	42	72,34	38,97	12,95	0,18
2	47%(4x 5,5 tex PESH)/53%(4x drát Cu/Ag průměr 0,03 mm)	50	6,5	31,59	14,08	0,23
3	54%PESh(61dtex)/46%(4x drát Cu/Ni průměr 0,028 mm)	49,3	210,5	34,17	13,04	0,22

Celkem byly navrženy čtyři typy vzorků, využívající tři druhy hybridních vodivých nití s využitím dvou metod vytváření vodivých cest na textiliích. V případě prvních tří vzorků se jedná o pletené textilie využívající řádky vodivých nití k vytvoření vodivých cest. V případě čtvrtého vzorku byla vodivá dráha realizována vyšíváním hybridní vodivou nití na tkaném textilním substrátu. Navržené parametry jednotlivých vzorků jsou popsány níže.

### Vzorky pletených textilií

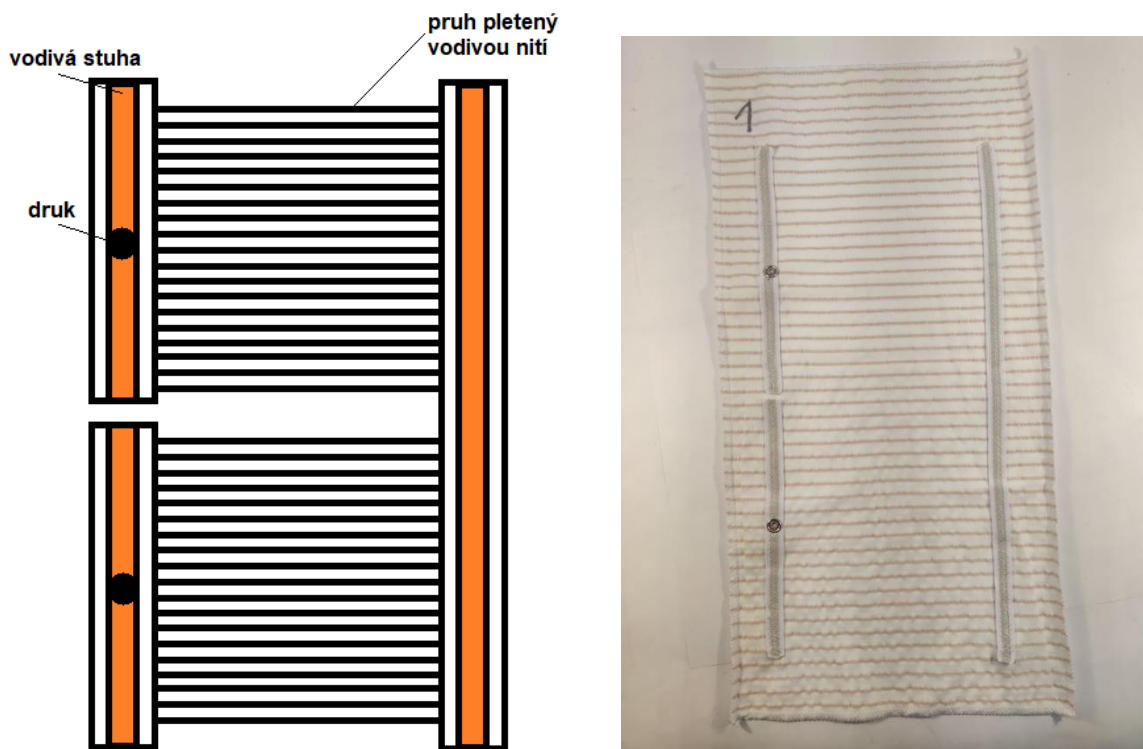
Tyto vzorky budou vytvořeny ze tří pletených textilií, které se liší použitým vodivým materiálem, který je na bázi hybridní nití s různými metalickými mikrodrátky. V těchto pleteninách jsou vodivé cesty realizovány vodivými pruhy, které jsou tvořené pěti řádky vodivé nitě uspořádaných vedle sebe. Mezi jednotlivými vodivými pruhy, které jsou široké cca 2 mm se pak nachází asi 7 mm široký pruh tvořený nevodivou nití. Návrh jednotlivých vzorků byl proveden tak, aby bylo dosaženo výsledného odporu co nejbližší k požadované hodnotě 2,7  $\Omega$ . Obdržený 25 cm dlouhý vzorek vodivé stuhy vykazoval elektrický odpor 0,1  $\Omega$ , což je na hranici rozpoznávací úrovně použitého měřicího přístroje. Na základě tohoto měření je odhadováno, že se elektrický odpor vodivé stuhy pohybuje maximálně v řádu několika desetin ohmu na metr délky. V porovnání s odporem ostatních vodivých částí je tedy natolik nízký, že jej lze při tomto návrhu zanedbat.



Obr. 35: Detail pletené textilie s vodivými pruhy

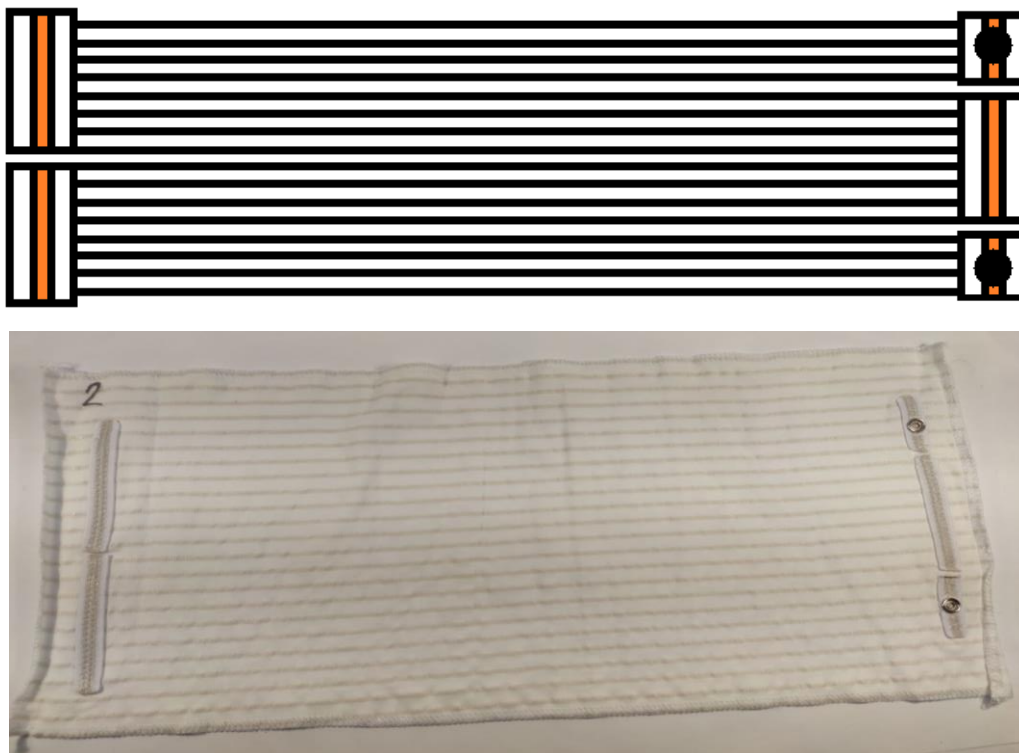


První vzorek pleteniny (vodivé pruhy jsou tvořeny hybridní vodivou nití č. 1, jejíž parametry jsou popsány v Tab. 3) je tvořen z patnáct centimetrů dlouhých pruhů (na základě měření je předpokládáno, že každý pruh by měl mít elektrický odpor cca  $25,6 \Omega$ ) a to tak, že jsou sériově řazeny dvě skupiny pruhů, z nichž každá obsahuje 19 paralelních pruhů. Pro lepší představu je na Obr. 36 schématické znázornění a reálná podoba.



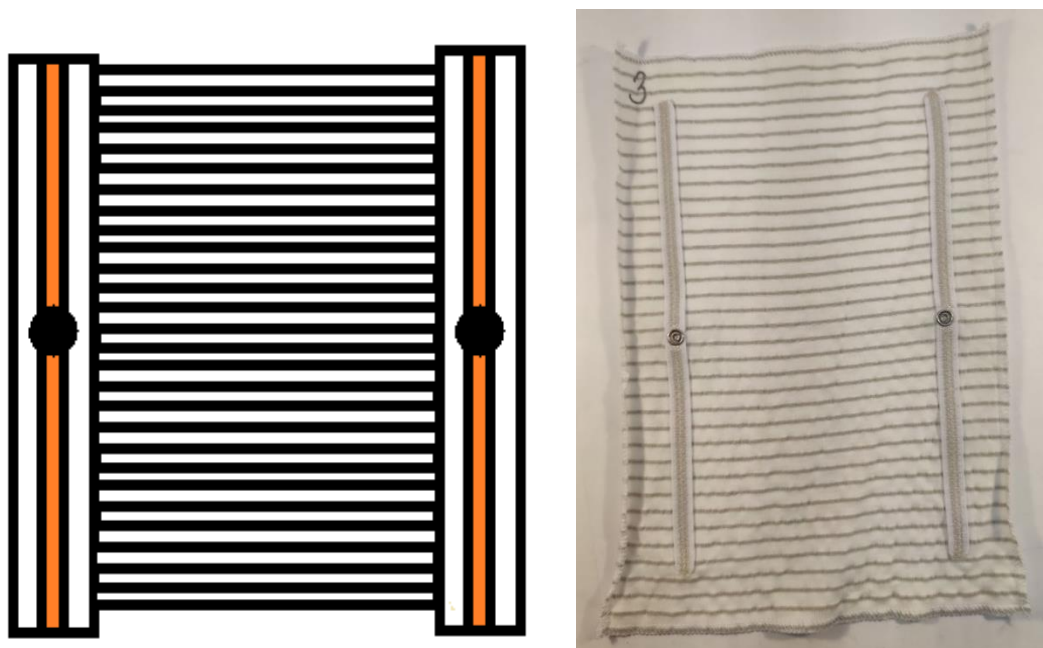
Obr. 36: Schématické znázornění 1. návrhu vzorku (vlevo) a reálná podoba (vpravo)

Ve druhém návrhu vzorku pleteniny je použita hybridní vodivá nit č. 2 ve které vodivost zajišťují posříbřené měděné drátky o průměru 0,03 mm. Uspořádání je znázorněno na Obr. 37, ze kterého je patrné, že návrh za pomoci vodivé stuhy sériově spojuje čtyři skupiny pruhů, kde každá skupina je tvořena čtyřmi paralelními vodivými pruhy o délce 40 cm. Jednotlivé pruhy (o délce 40 cm) při měření vykazovaly v průměru odpor  $2,6 \Omega$ , takže výsledný odpor návrhu by měl být zhruba požadovaných  $2,7 \Omega$ .



Obr. 37: Schematický návrh 2. pleteniny (nahore) a jeho reálná podoba (dole)

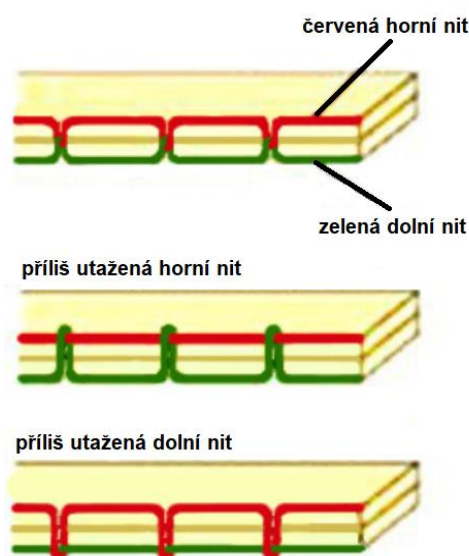
Ve třetí pletenině, ze které byly realizovány testovací vzorky byla použita hybridní vodivá nit č. 3, ve které vodivost zajišťují konstantanové drátky o průměru 0,028mm. Při měření vodivých pruhů byl průměrný naměřený odpor cca 500  $\Omega$ /m. Na základě této hodnoty byl navržen testovací vzorek, který tvoří paralelní spojení 28 vodivých pruhů o délce 15 cm. Výsledný odpor tohoto návrhu by měl splňovat požadavek na výsledný odpor cca 2,7  $\Omega$ .



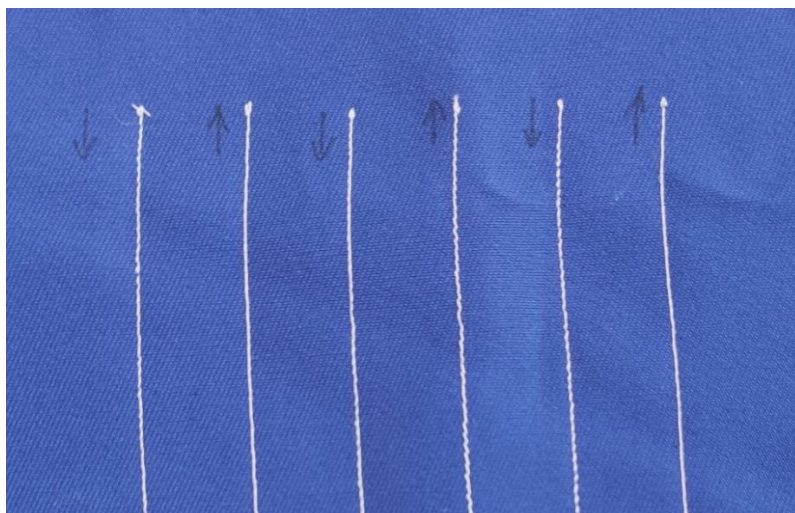
Obr. 38: Schématické znázornění 3. návrhu vzorku pleteniny (vlevo) a reálná podoba vzorku

#### Vzorek č. 4 vyšívání

Pro první vzorek byla zvolena metoda vyšívání vodivé cesty hybridní vodivou nití č. 2, jejíž složení je uvedeno v Tab. 3. Tato nit by podle dat výrobce měla vykazovat odpor  $6,5 \Omega/\text{m}$ . Při praktickém měření na několika rovných 20 cm dlouhých vyšitých vzorech byl průměrný naměřený odpor  $1,2 \Omega$ , což by odpovídalo lineárnímu odporu o velikosti  $7 \Omega/\text{m}$ . Je však nutné vzít v potaz, že délka navrženého motivu je vždy kratší než reálná vyšitá délka nitě, kterou je vzor vytvořen, jelikož jsou vedeny stehy i v „zetové“ ose substrátu. Proto bylo provedeno vypárání 10 cm nitě z testovacích vzorků, za účelem zjištění reálné délky nitě. Po vypárání navíc bylo zjištěno, že skutečná délka použité nitě se navíc liší i podle toho, kterým směrem je vyšívání provedeno. Skutečná délka nitě z navrženého motivu o délce 10 cm byla 10,5 cm v dopředném směru a 11,5 cm ve směru zpětném. Tyto rozdíly jsou dané jednak tím, že šicí stroj v různých směrech vyšívání nedělá stejně dlouhé stehy a vliv na délku použité nitě má také to, jak moc je vodivá (v našem případě horní) nit utážená oproti spodní niti. Přesnou skutečnou délku hybridní vodivé nitě a z ní vyplývající výsledný odpor motivu tedy nelze dokonale přesně navrhnout bez realizace dodatečných experimentálních vzorků. Pro potřeby této diplomové práce však není nutné přesně splnit požadovaný výsledný elektrický odpor topné části ( $2,7 \Omega$ ). A to z toho důvodu, že ani odchylka v řádu desítek procent pravděpodobně nebude mít vliv na funkčnost vzorku ani na sledování změn způsobených náhodnými jevy nebo postupnou degradací. Cílem této práce totiž je monitorovat změny parametrů vzorků při zátěžových zkouškách a k těm bude docházet neohledně na velikost počátečního elektrického odporu vyhřívaného motivu.

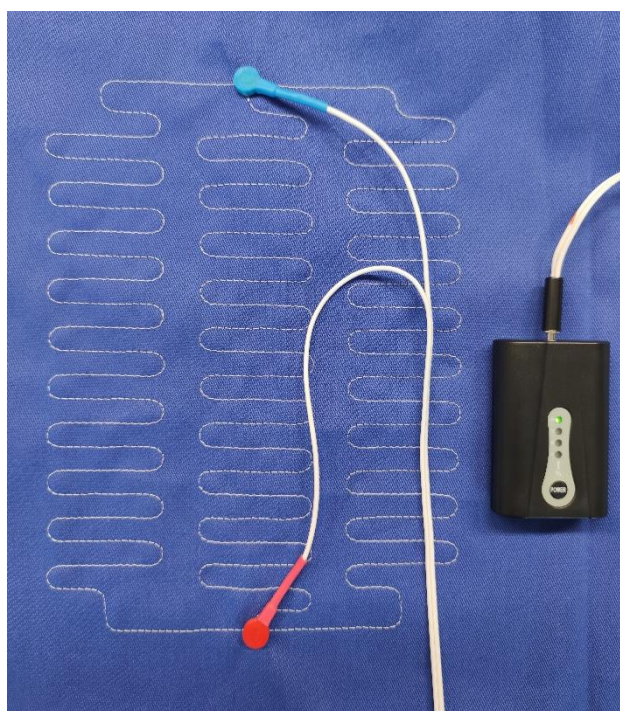
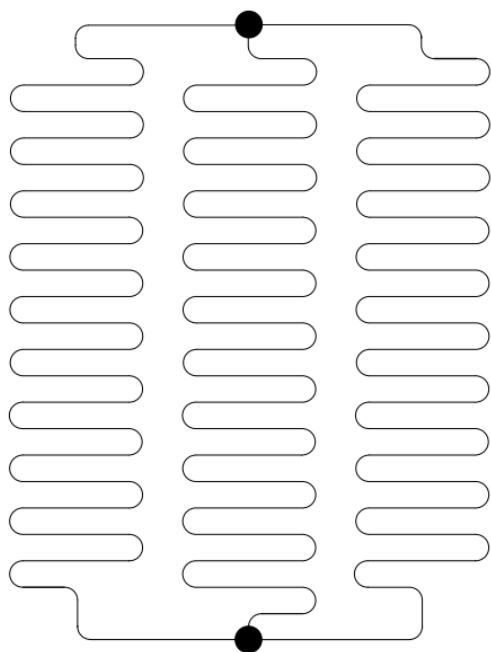


Obr. 39: Znáznornění vlivu utážení nitě



Obr. 40: Testovací vzorek k měření parametrů při vyšívání vodivou nití č. 2

Na základě naměřených hodnot odporu byl navrhnut motiv se třemi paralelními větvemi, kde každá z nich má délku cca 130 cm. Výsledný odpor náhradního schématu tohoto zapojení by měl tedy být mírně vyšší než požadovaných  $2,7 \Omega$ . Tato hodnota odporu by měla při použití námi zvoleného zdroje s výstupním napětím 7,4 V zajistit příjemnou a bezpečnou úroveň vyhřívání na teplotu blízkou teplotě lidského těla.



Obr. 41: Schématické znázornění návrhu pro vyšívání (vlevo) a reálná podoba se zdrojem 30seven (vpravo)

### 3.2 Výběr vhodných metod pro vytvoření kontaktů

#### Vyšívání

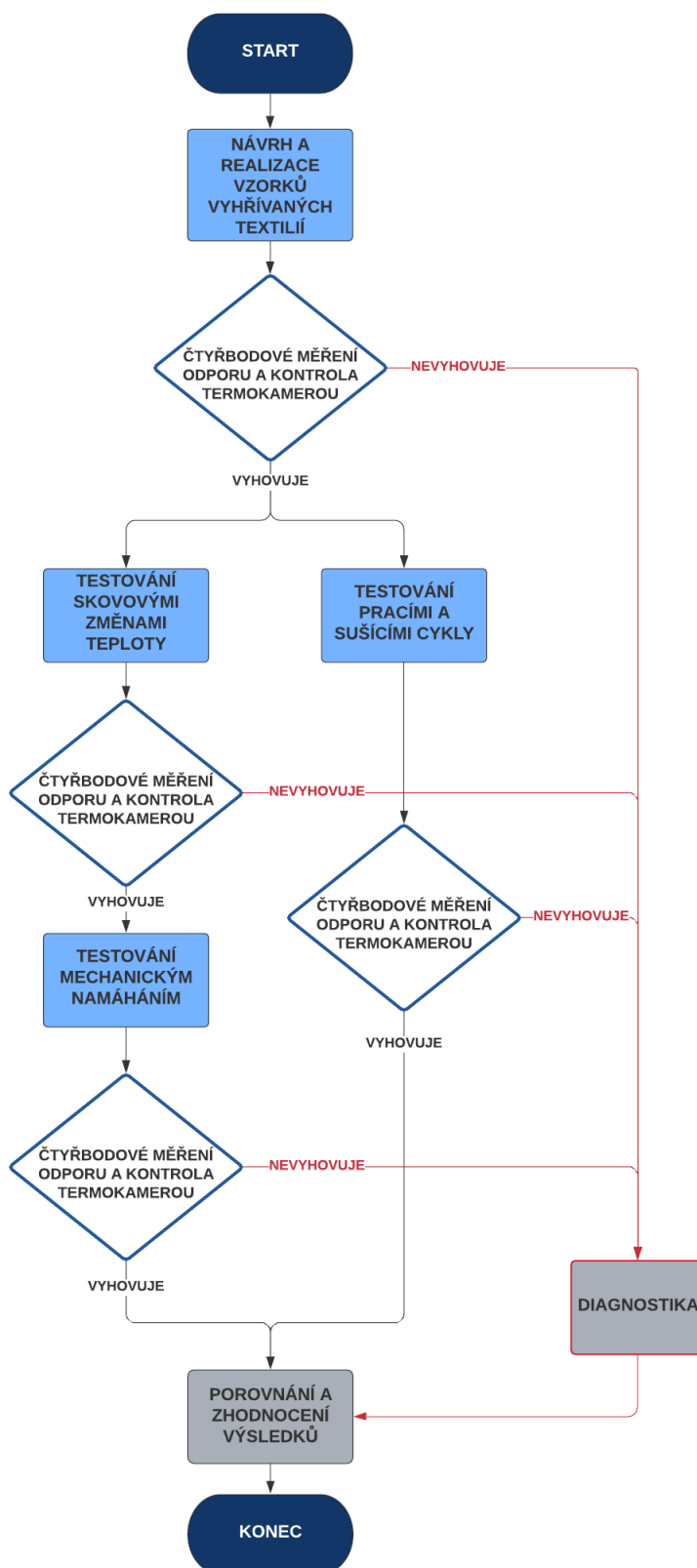
Při vyšívání bylo připojení k napájení provedeno pomocí nýtovacích dрукů, které byly integrovány na připravené vyšité plošky o průměru 10 mm x 10 mm mezi nimiž se nacházejí vodivé cesty, resp. v našem případě topné elementy vyhřívané textilie. Při výběru konkrétního typu dрукu je třeba se řídit především tím, do jak silné látky budeme dрукy lisovat. Pro velmi silné látky jako je plachtovina nebo kůže jsou určeny dрукy typu KIN DOT. Na silné až středně silné látky je vhodné použít dрукy typu AUTO-MOTO nebo WUK. Jelikož většina vzorků je tvořena pleteninou, která je náchylná k prostržení. Byly použity dрукy typu Roland, které jsou vhodné pro použití v jemných a poddajných látkách a lze je tedy bez problému využít i na vzorcích z pletené textilie. Konkrétně byly použity stiskací dрукy typu Roland o průměru 10 mm s niklovou povrchovou úpravou, která zajistí stálost povrchu a dobrou elektrickou vodivost spojení.

#### Pletená textilie

U pletených textilií byly sběrné elektrody realizované vodivou stuhou, která je k pletenině připevněna přišítkem. Samotné přišítky vodivé stuhy k textilií probíhá podobně jako vytváření vyšivaného motivu na šicím stroji. Při přišítkování stuhy k textilu se také používají dvě nitě. Jako horní nit, která je v kontaktu s vodivou stuhou je použita hybridní vodivá nit č. 2 a ze spodní strany je běžná nevodivá nit. Kontakt pro připojení napájení je proveden dрукem, který se nalisuje přes vodivou stuhu, která slouží jako sběrná elektroda. Výhodou tohoto způsobu je jednak rozebíratelnost spojení a také to, že při nalisování dрукu přes elastickou vodivou stuhu dochází ke zmáčknutí elastomeru, což zajišťuje neustálý tlak na spodní část lisovacího dрукu. Působení neustálého tlaku znamená, že mezi oběma materiály je zajištěno spolehlivé a dobře vodivé elektrické spojení.

## 4 Návrh metodiky testování realizovaných vzorků

### 4.1 Volba měřených parametrů



Obr. 42: Vývojový diagram průběhu testování

Na Obr. 42 je pomocí vývojového diagramu znázorněn průběh testování. Hlavními pozorovanými parametry bude elektrický odpor a povrchová teplota vzorku. Přesná hodnota elektrického odporu na vzorcích bude měřena pomocí čtyřbodové metody přístrojem Keithley 2612B. Konkrétní hodnota elektrického odporu zobrazovaná přístrojem je vypočítávaná z úbytku napětí na vzorku, které je měřeno jedním párem svorek, při průchodu proudem o velikosti jednoho ampéru, přiváděného pomocí druhého páru svorek. Velikost tohoto proudu byla zvolena tak, aby při měření již docházelo k mírnému vyhřívání a teplota povrchu textilie byla vyšší než teplota okolního vzduchu. Jelikož doba ustálení teploty se v závislosti na typu textilie podstatně lišila, byla hodnota odporu odečítána z přístroje odečítána po jedné minutě od připojení ke zdroji proudu. Teplota a její rozložení na povrchu textilií byla monitorována pomocí termokamery Flir i7. Při tomto měření byly vzorky upevněny na okrajích tak, aby se vyhřívána část nacházela volně ve vzduchu. Vzorky byly připojeny k regulovanému zdroji a napájeny stejnosměrným proudem o velikosti 2,5 A. Z tohoto proudu a napětí mezi druky byl orientačně vypočten aktuální elektrický odpor a dodávaný elektrický výkon. Následně byl pořízen snímek termokamerou, který dává představu o rozložení teploty na vzorku a zobrazuje nejvyšší aktuální teplotu v pozorované oblasti.

## 4.2 Přehled metod pro simulaci vlivu údržby

### Normalizace v oblasti praní a sušení textilií

V praktické části této diplomové práce bylo nutné stanovit jednoznačný průběh prací a sušících cyklů na základě některého ze standardů pro praní a sušení textilu. Vzhledem k tomu, že zamýšlený způsob využívání navrhovaných vyhříváných textilií je obdobný jako v případě běžných konfekčních textilií. Byla jako standard pro testování vlivu údržby na parametry vyhříváných textilií, vybrána norma ČSN EN ISO 6330:2012. Tato norma standardizuje postupy domácího praní a sušení pro zkoušení běžných textilií. Jedná se o harmonizovanou evropskou normu z roku 2012, která nahrazuje předchozí verzi z roku 2001. Nová verze se v zásadě podstatně neliší od předcházející verze, jen parametry praček, sušiček a čistících prostředků byly upraveny tak, aby odpovídaly aktuálnímu stavu. Norma stanovuje postupy domácího praní a sušení, které jsou určeny ke zkoušení textilií. A to takovým způsobem, aby byly vhodné pro oděvy, plošné textilie i jiné textilní produkty, které běžně podstupují praní a sušení v domácích podmínkách. Každá úplná zkouška je tvořena postupem pro praní a sušení.

Norma rozděluje postupy praní do tří hlavních skupin podle typu pračky (vodorovná osa s plněním zepředu, svislá osa s plněním shora a svislá osa s plněním shora). Každá skupina obsahuje několik různých postupů praní pro konkrétní typy domácího praní. Dále tato norma rozeznává šest způsobů sušení (v závěsu, v závěsu odkapáním, v rozprostřeném stavu, v rozprostřeném stavu odkapáním, plochým lisem, v bubnové sušičce). Během objektivního testování je tedy nezbytné se řídit normou ČSN ISO 6330:2012 a brát v potaz také normy pro jakost vod ISO 6059 (stanovení sumy vápníku a hořčíku) a ISO 139, která definuje parametry ovzduší pro zkoušení textilií.

Při plánování zkoušení dle ISO 6330 je nutné nejprve stanovit a zajistit:

- Výběr typu automatické pračky
- Výběr typu bubnové sušičky nebo jiné metody sušení
- Struktura a množství doplňkových textilií (dosažení předepsané hmotnosti prádla)
- Stanovení referenčního detergentu (pracího prostředku)
- Tvrdost vody nižší než 0,7 mmol/l (dle ISO 6059)
- Tlak vody na vstupu do pračky (vyšší než 150 kPa)
- Teplota vody na vstupu do pračky (rozmezí 15-25 stupňů celsia)
- Ovzduší pro klimatizování zkušebních vzorků dle ISO 139
- Počet zkušebních vzorků, dle účelu zkoušeného materiálu
- Postup praní
- Postup sušení

Protokol o zkoušce prováděné dle ISO 6330 musí obsahovat tyto údaje:

- Odkaz na tuto mezinárodní normu
- Typ přístroje a zvolený postup pro praní
- Typ přístroje a zvolený postup pro sušení
- Typ použitého detergentu
- Celková (suchá) hmotnost testovaného vzorků včetně doplňkových textilií
- Detailní informace o všech odchylkách od standardních postupů
- Typ a poměr použitého doplňkového textilu



### Test pracími a sušícími cykly

Navržené vzorky vyhříváných textilií byly podrobeny testování vlivu praní v automatické pračce a sušení v automatické sušičce z důvodu zjištění vlivu této údržby na jejich elektrické parametry a celkovou spolehlivost. Vzorky byly postupně podrobeny dvaceti pracími cykly s tím, že vždy po určitém počtu cyklů dojde k sušení a následně bude čtyřbodovou metodou změřen elektrický odpor. Po připojení napájení bude termokamerou provedena kontrola homogenity rozložení teploty. Postupně bylo provedeno šest měření, a to v následujícím pořadí: po prvním, druhém, pátém, desátém, patnáctém a dvacátém cyklu tak, aby bylo možné monitorovat postupnou degradaci materiálů. Současně s pozorováním eventuálního vzniku náhodných jevů, které by měly zásadnější vliv na elektrické parametry testovaných vzorků. Tato předpokládaná změna parametrů bude výsledkem poměrně širokého spektra namáhání (mechanické, chemické, tepelné), kterému je textil běžně při praní a sušení vystaven. Toto namáhání má samozřejmě podstatný vliv na elektrické parametry a životnost všech e-textilních produktů u kterých se předpokládá údržba. Aby bylo testování provedeno v souladu s normou ISO 6330:2012 byl do bubnu pračky kromě testovaných vzorků doplněn další textil tak, aby před praním obsahoval celkem 2 kg prádla. Množství detergentu, které vychází z množství vody použité při praní bylo stanoveno na 15 g. Použita bude poloprofesionální pračka WHIRLPOOL AWG 812 PRO (vpravo na Obr. 43) určená pro použití např. v hotelech, restauracích apod. Z hlediska povahy testovaných vzorků byl pro praní zvolen režim na jemné prádlo, program trvající 1 hodinu při teplotě vodní lázně 40 °C a 400 ot/min při odstředování. Pro sušení byla použita bubnová sušička WHIRLPOOL AWZ8CD PRO (vlevo na Obr. 43) v režimu pro sušení jemného prádla po dobu jedné hodiny při teplotě cca 60 °C.



Obr. 43: Pračka WHIRLPOOL AWG 812 (vpravo) a sušička WHIRLPOOL AWZ8CD PRO (vlevo)

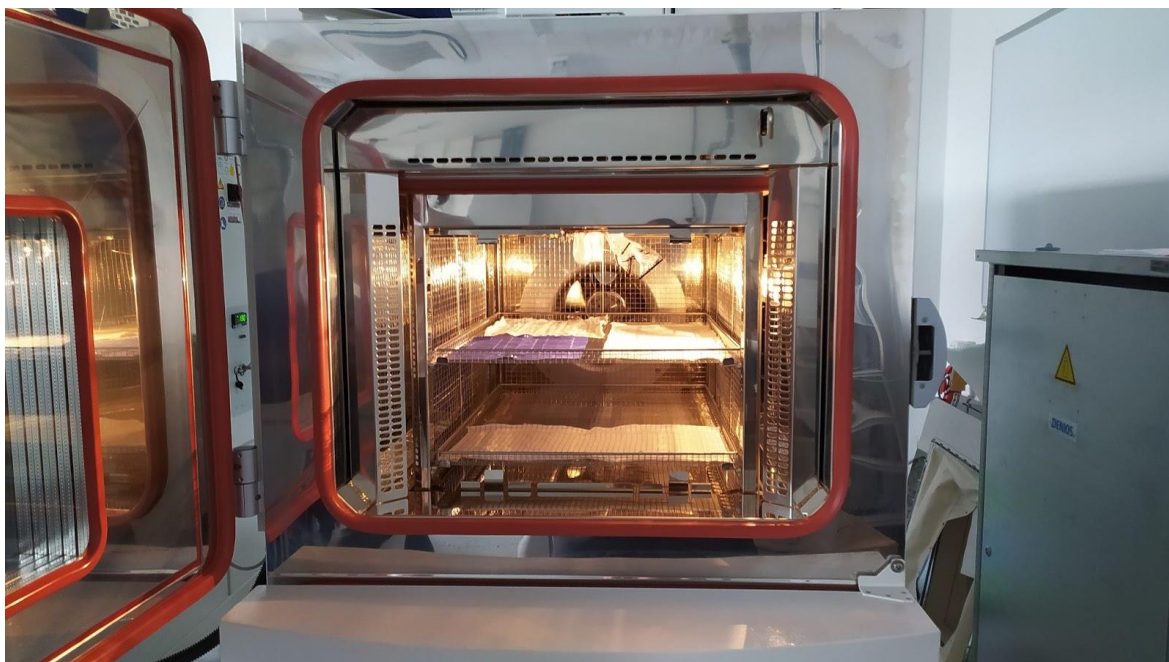
### Test skokovou změnou teploty

Vzorky určené k testování budou podrobeny také testu vlivu rychlých změn teploty v šokové komoře. Tento test může simulovat např. opakující se přechody mezi vytápěnou místností a velmi chladným venkovním prostředím, ale také zjistit jinak přehlédnutelná slabá místa navrženého vzorku ve kterých vlivem tepelné roztažnosti a následnému smrštění dojde k nárůstu odporu nebo úplnému přerušení obvodu. Pro testování byla použita šoková komora od firmy Vötsch Industrietechnik konkrétně typ VT<sup>3</sup> S2 (na Obr. 44), kterým disponuje FEL ZČU a umožňuje testování skokových změn teploty v rozsahu od -80 °C do 220 °C s časem přemístění testovaného vzorku mezi komorami kratším než 10 vteřin. Délka pobytu vzorku v každé z komor je dána především vlastnostmi testovaného materiálu. V našem případě jsou vzorky z textilního materiálu a postačí doba 10 minut v každé komoře. Parametry komory byly nastaveny podle doporučení normy pro „Zkoušení vlivu prostředí - část 2: Zkoušky - Zkouška N: Změna teploty“ ČSN EN 60068-2-14.

Konkrétně test skládal ze 100 cyklů, kdy jeden cyklus představoval 10 minut ohřevu a 10 minut chlazení. Celková doba testu tedy byla cca 33 hodin. Parametry šokové komory byly nastaveny na +85 °C a -25 °C (tyto hodnoty představují ustálené teploty). Před přejezdem je vždy volná komora předchlazena resp. předehřátá o 15 °C (100 °C a -40 °C) a hned po přejetí vzorků dojde k přepnutí na nastavené teploty (85 °C a -25 °C).



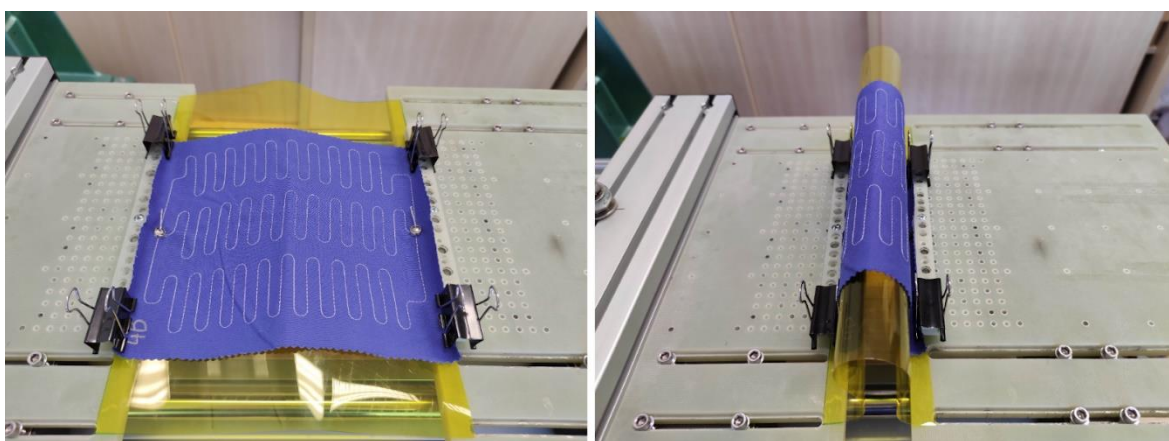
Obr. 44: Šoková komora VT<sup>3</sup> S2 od Vötsch Industrietechnik (převzato z [33])



*Obr. 45: Vzorky skupiny B v šokové komoře*

### **Test mechanickým namáháním**

Testování vlivu mechanického namáhání na elektrické parametry testovaných vzorků byl proveden na tzv. bend testeru. Testovaný vzorek s vyšíváním vodivým motivem byl jako jediný podroben testu ohybem (Obr. 46), ostatní vzorky tvořené pletenou textilií byly podrobeny cyklickému natahování. Pletené textilní vzorky byly natahovány ve směru vodivých pruhů na délku 110 % jejich běžné délky, námi použité pleteniny nelze výrazně více natáhnout, na rozdíl např. od pletenin s přídavkem elastomerů, které mohou být velmi elastické.



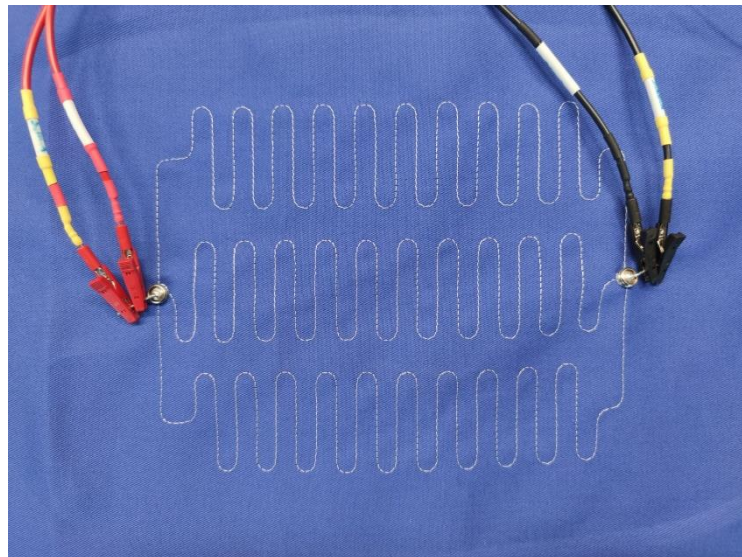
*Obr. 46: Vzorek 4B v mezních polohách na tzv. bend testeru při testu ohybem*

### 4.3 Vytvoření plánu a metodiky testování

Při měření parametrů byl zdroj značky 30seven, na který byly textilní vzorky navrhovány z praktických důvodů nahrazen regulovaným zdrojem. Díky regulovanému zdroji bylo možné pozorovat chování všech vzorků při stejné velikosti napájecího napětí a proudu bez ohledu na to, jak se v danou chvíli vlivem teploty změnil elektrický odpor konkrétního vzorku nebo v jakém stavu se nachází baterie. V průběhu všech měření se teplota vzduchu pohybovala v rozmezí od 20 °C do 22 °C při relativní vlhkosti vzduchu mezi 40 % až 60 %.

#### Čtyřbodové měření odporu

Měření odporu bylo prováděno pomocí měřicího laboratorního měřicího přístroje Keithley 2612B v režimu pro měření odporu. Přístroj byl nastaven tak, aby se choval jako zdroj konstantního proudu o velikosti jednoho ampéru, který byl přiváděn pomocí jednoho páru svorek. Druhým párem měřících svorek byla snímána velikost napětí mezi druhy, ze kterého pak vychází zobrazovaný elektrický odpor. Tento postup je vhodný pro přesné měření menších odporů, protože je při něm eliminováno zanesení chyby v důsledku vlastního elektrického odporu přívodních vodičů. Vzorky při měření čtyřbodovou metodou volně ležely na izolační podložce a hodnota odporu z přístroje byla odečtena vždy po jedné minutě, tak aby bylo zajištěno ustálení teploty vzorku.



Obr. 47: Čtyřbodové měření odporu vzorku 1A

## Měření teploty

Měření teploty povrchu vyhříváných textilních vzorků, připojených k regulovanému zdroji bylo prováděno pomocí termokamery Flir i7 (na Obr. 48). Tato kamera disponuje senzorem s rozlišením 140 x 140 pixelů s teplotní citlivostí 0,1 °C (při 25 °C) a přesností měření teploty  $\pm 2\%$  nebo  $\pm 2\text{ °C}$ . Rozsah měřitelných teplot je od -20 °C do +250 °C a je tedy pro potřeby měření textilních vzorků zcela dostatečný. Při měření teploty byly textilní vzorky napájeny z regulovaného zdroje a uchyceny po stranách tak, aby vyhřívána část byla mírně napnuta ve vzduchu. Snímek teploty byl vždy pořizován minimálně po 15 vteřinách napájení požadovanou velikostí napětí nebo proudu tak, aby došlo k ustálení teploty na povrchu textilie. Emisivita povrchu  $\epsilon$ , která představuje schopnost tělesa vyzařovat teplo byla nastavena na hodnotu 0,8.



Obr. 48: Termokamera Flir i7 (převzato z [34])

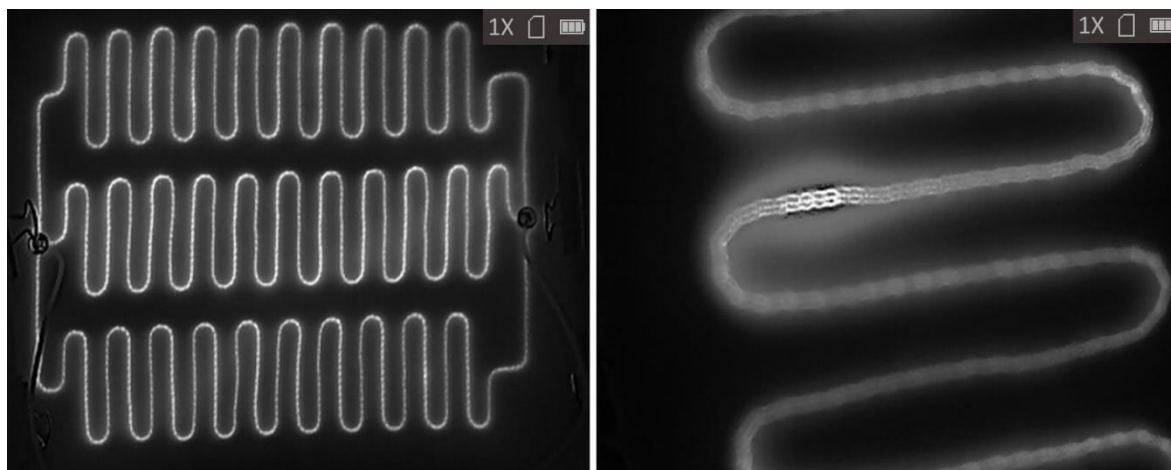


Obr. 49: Snímek z měření vyhříváné textilie

K pozorování detailů v místě přehřívání byla použita termokamera Hikmicro Lynx PRO LH19. Ta díky rozlišení senzoru 384 x 288 pixelů a možnosti optického ostření, byla schopna zobrazit detailnější struktury v přehřívajících se místech. Takto získaná podezřelá místa na textilních vzorcích následně byla označena a detailně prozkoumána pod mikroskopem za účelem diagnostiky konkrétní poruchy. Ze snímku na Obr. 51 (vpravo) je patrné, že v tomto místě dochází k viditelnému přehřívání.



Obr. 50: Termokamera Hikmicro LYNX Pro LH19 (převzato z [35])



Obr. 51: Snímek vzorku 1A před vypráním (vlevo) a přehřívajícího se místa po 2. vyprání (vpravo)

#### 4.4 Očekávané výsledky

Teoretický předpoklad naměřených hodnot a výsledku měření byl takový, že na všech vzorcích s průběhem testování bude postupně docházet k nárůstu elektrického odporu. Na základě předešlých testování vyhřívaných textilií se předpokládalo, že u některých vzorků může dojít v některém místě vlivem náhodného jevu nebo vady v materiálu k úplné nebo částečné ztrátě funkce. Tato práce by měla přispět k představě, při kterém typu namáhání a v jaké části testu nejčastěji dochází ke vzniku takových jevů, které vylučují další použití konkrétního produktu. Pro objektivní zjištění těchto hodnot by však bylo třeba provést mnohonásobně více testů s podstatně větším počtem vzorků. To však bohužel není možné, jak z hlediska omezeného rozsahu této práce, tak aktuální pandemii koronaviru, která má za následek praktickou nedostupnost některých materiálů potřebných pro realizaci dalších vzorků.

Téměř s jistotou bylo možné očekávat, že se na testovaných vzorcích bude projevovat postupné zvyšování celkového odporu vodivého motivu vlivem pozvolné degradace vodivých materiálů vlivem chemické, mechanické nebo tepelné zátěže. Vliv chemického působení na hybridní vodivé nitě se pravděpodobně nejvíce projeví po absolvování testů praním. Hlavní příčinou je detergent, který při praní slouží k dosažení co největšího čistícího účinku způsobuje chemické namáhání kovových mikrodrátků v hybridních nitích. Chemické působení při praní je ještě znásobeno tím, že při praní v bubnu pračky může docházet ke drobným poškozením na povrchu hybridní nitě, čímž dochází ke zvětšení namáhaného povrchu nebo může dojít k narušení případné ochranné vrstvy. Mechanickou odolnost vyhřívané textilie pak prověří mimo praní a sušení také tzv. stretch test, při kterém budou pletené textilie opakovaně podrobovány natahování. Protože natahování tkaniny s vyšším vzorem není prakticky možné, byl tento vzorek podroben testu cyklického ohýbání. Změnu parametrů a celkovou odolnost tepelné zátěži prověřil test v šokové komoře, kde byly testované vzorky podrobeny skokové změně teploty. Při rychlé změně teploty je možné odhalit případná slabá místa ve struktuře vyhřívaného elementu. Předpokládalo se tedy, že vlivem rychlého roztažení a smrštění dojde ke zvýšení elektrického odporu, především v některých rizikových místech, či v místech kde se nachází vada ve struktuře, která se před testem v parametrech vzorku dostatečně neprojevovala na měřených parametrech.

## 5 Výsledky měření

Realizované vzorky byly rozděleny do dvou skupin (A, B). Skupina s označením A podstoupila testy praním a sušením. Skupina B byla nejdříve podrobena testování skokovou změnou teploty v šokové komoře a následně putovala na bend tester ke sledování vlivu mechanického namáhání textilie na její elektrické parametry. Všechny snímky pořízené termokamerou byly provedeny po ustálení teploty při napájení proudem 2,5 A.

### 5.1 Výsledky testování praním a sušením

V Tab. 4 jsou uvedeny naměřené hodnoty odporu na textilních vzorcích, zařazených do skupiny A, které podstoupily testy praním a sušením, ty jsou detailněji popsány v předcházejících kapitolách. Testování vzorků bylo zvoleno v logaritmické škále, z důvodu předpokládaného většího počtu poruch na začátku testování (zejména u vyšíváných testovacích vzorků). Graf 1, znázorňující trend nárůstu odporu získaný proložením získaných hodnot exponenciálou se nalézá v kapitole 5.3, ve které je provedeno zhodnocení naměřených hodnot

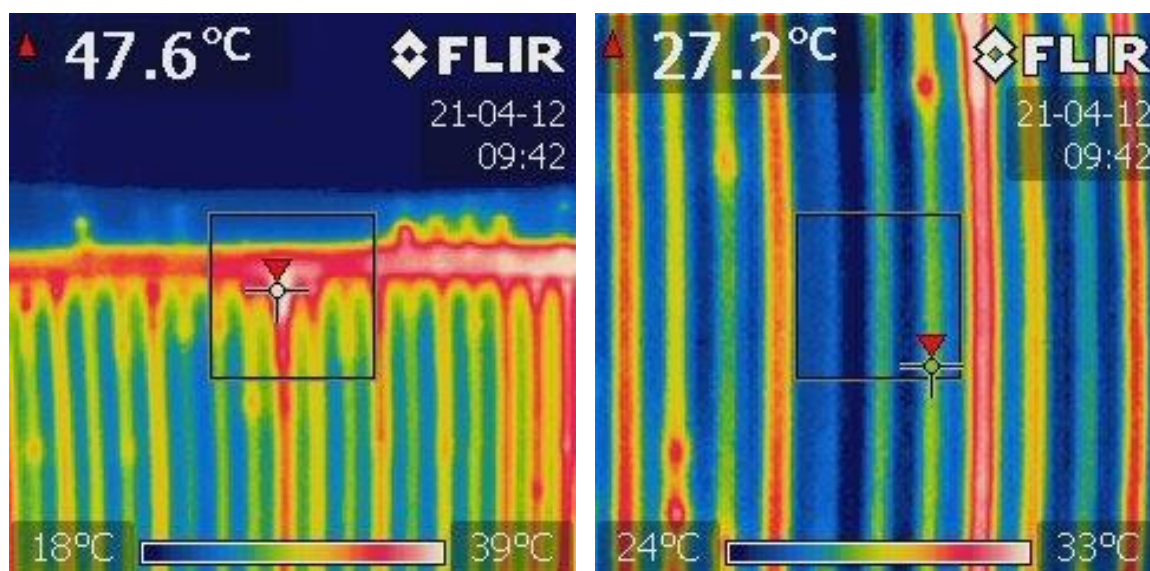
Tab. 4: Hodnoty elektrického odporu vzorků skupiny A, naměřené čtyřbodovou metodou po prání

Počet cyklů	0	1	2	5	10	20
R <sub>1A</sub> (Ω)	3,24	3,62	3,31	3,42	3,89	3,75
R <sub>2A</sub> (Ω)	3,15	3,21	3,40	3,31	3,46	3,88
R <sub>3A</sub> (Ω)	2,61	2,75	3,00	3,29	4,08	4,17
R <sub>4A</sub> (Ω)	3,44	3,68	3,87	-	-	-

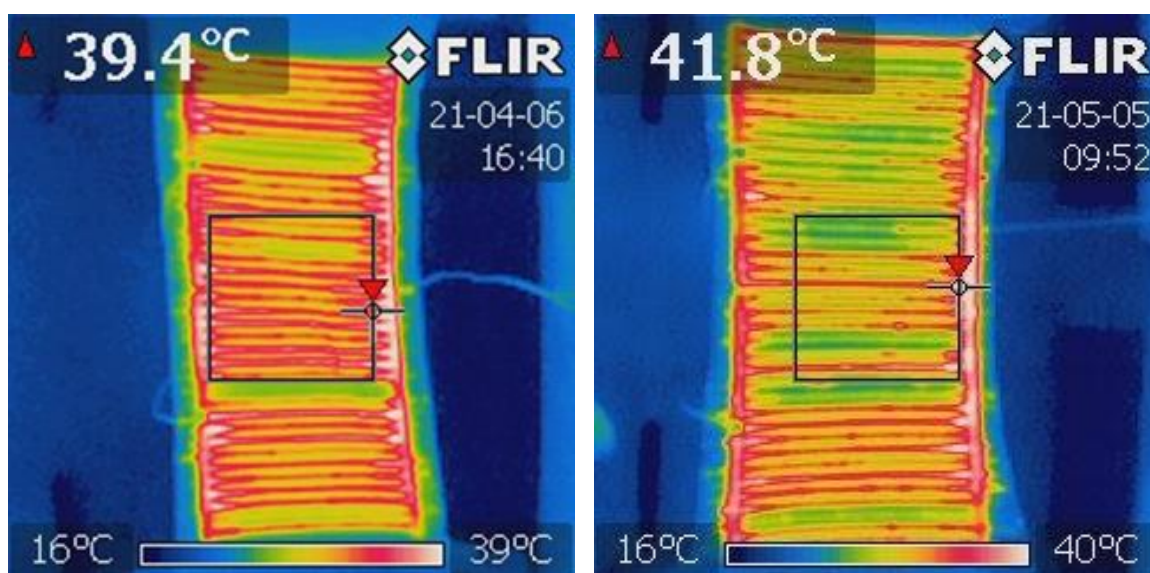
#### Vzorek 1A

Tento vzorek byl vyroben na základě návrhu pleteniny č. 1 a zařazen do skupiny A. Byl tedy podroben testům v automatické pračce a sušičce za účelem zkoumání vlivu těchto procedur na změnu elektrických parametrů vyhříváných textilií. Ze snímku z termokamery (Obr. 52) je patrné, že u tohoto vzorku není rovnoměrně rozložena teplota, hlavním důvodem je přehřívání v místech sběrných elektrod v kombinaci s tím, že v některých částech textilie nedochází k rovnoměrnému vyhřívání. Další nevýhodou této pleteniny s vodivými pruhy z hybridní vodivé nitě na bázi bronzu byla nestálost parametrů. V případě vzorků 1A a 1B nebylo prakticky možné v rozumném časovém intervalu dosáhnout uspokojivého ustálení teploty a elektrického odporu.





Obr. 52: Snímky vzorku 1A před praním, v místě přehřívající se sběrné elektrody (vlevo) a slabě vyhříváného místa (vpravo)



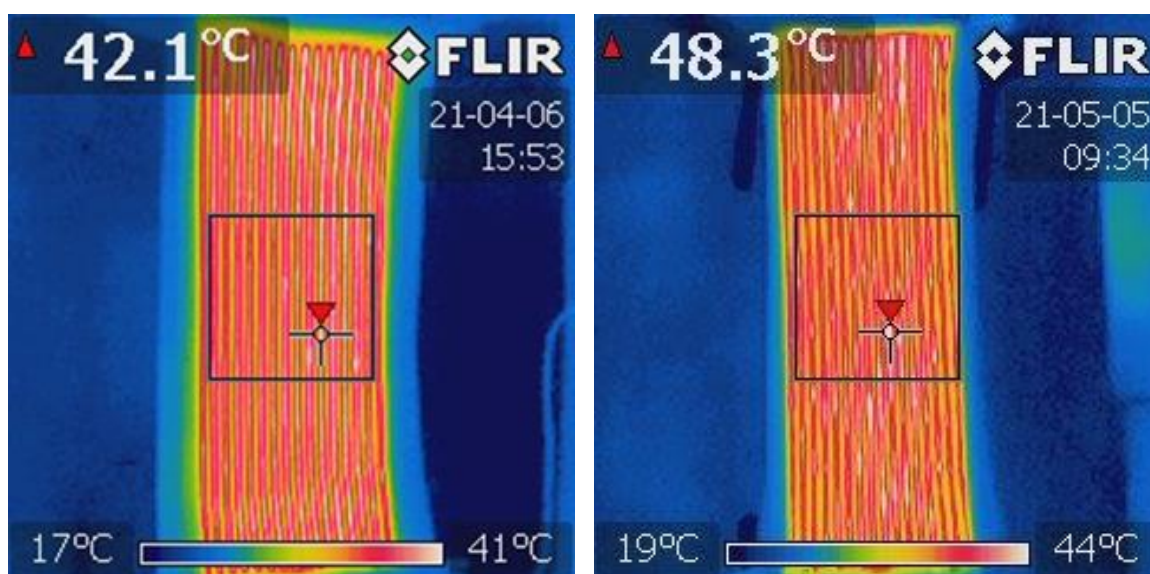
Obr. 53: Vzorek 1A před praním (vlevo) a po 20. praní (vpravo) při proudu 2,5 A

Tab. 5: Naměřené hodnoty na vzorku 1A, po praní, při proudu 2,5 A

Počet cyklů	0	1	2	5	10	20
Odpor ( $\Omega$ )	2,04	2,24	2,28	2,32	2,44	2,48
Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	39,4	40,9	40,6	40,7	41,7	41,8
Napětí (U)	5,1	5,6	5,7	5,8	6,1	6,2
Proud (I)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Příkon (W)	12,75	14	14,25	14,5	15,25	15,5

**Vzorek 2A**

Tento vzorek byl vyroben na základě návrhu pleteniny č. 2 a zařazen do skupiny A, která byla vystavena testům v automatické pračce a sušičce za účelem zkoumání vlivu těchto procedur na změnu elektrických parametrů vyhříváných textilií. Tento vzorek vykazoval velmi dobrou homogenitu rozložení teploty ve vyhřívané oblasti a na rozdíl od ostatních pletených vzorků u něj nedocházelo ani k přehřívání v místě sběrných elektrod. Lze tedy konstatovat, že tento pletený materiál, ve kterém vodivé cesty zajišťují hybridní nitě č. 2 (postříbřené měděné mikrodrátky), se jeví jako velmi vhodný pro realizaci vyhříváných textilií. Tato pletenina oproti ostatním vykazovala nejen dobrou homogenitu rozložení teploty, ale také rychlé ustálení teploty a hodnoty elektrického odporu po připojení ke zdroji. Při absolvování testů docházelo k předpokládanému nárůstu rezistivity vyhřívacích elementů, a tedy i teploty povrchu textilie. Ze snímků na Obr. 54 je patrné, že svou dobrou homogenitu rozložení teploty si vzorek zachoval i po absolvování dvaceti pracích cyklů.



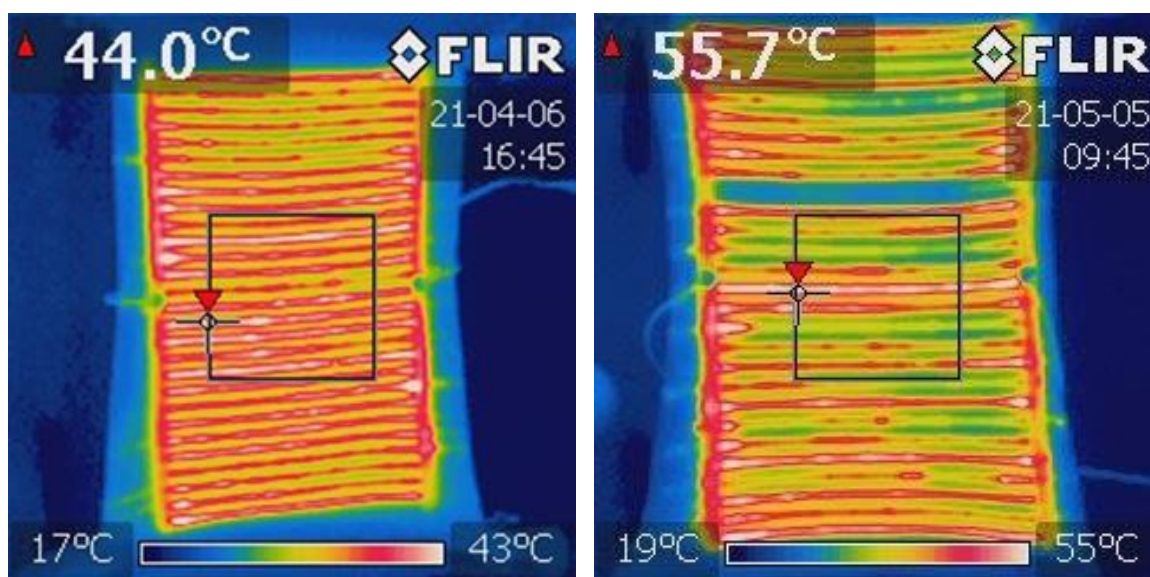
Obr. 54: Vzorek A2 při proudu 2,5 A, před praním (vlevo) a po praní (vpravo)

Tab. 6: Naměřené hodnoty na vzorku 2A, po praní, při proudu 2,5 A

Počet cyklů	0	1	2	5	10	20
Odpor ( $\Omega$ )	3,36	3,44	3,48	3,48	3,52	3,68
Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	42,1	44,1	44,5	45,5	47	48,3
Napětí (U)	8,4	8,6	8,7	8,7	8,8	9,2
Proud (I)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Příkon (W)	21	21,5	21,75	21,75	22	23

### Vzorek 3A

Jedná se o vzorek vyhříváné textilie vyrobený z pleteniny s vodivými pruhy realizovanými několika řadami hybridní nitě na bázi konstantanu (slitina mědi a niklu). Ačkoliv se konstantan obecně vyznačuje neměnnou rezistivitou v širokém rozsahu teplot, nelze tuto vlastnost očekávat v případě jeho použití v podobě hybridní vodivé nitě zakomponované do pletené textilie. V porovnání s ostatními textiliemi tento vzorek po absolvování pracích a sušících cyklů vykazoval nejstrmější nárůst elektrického odporu. Důvodem mohlo být to, že na výslednou rezistivitu vodivé dráhy má vliv mnoho faktorů. Obzvláště v případě pletenin je prakticky nemožné vytvořit odpovídající matematický model, který by popisoval reálné chování parametrů značně členité vodivé dráhy. Nejen složitost podoby vodivých cest, ale také jejich proměnlivost v závislosti na teplotě, vlhkosti, míře natažení nebo opotřebení, činí parametry těchto materiálů značně nepředvídatelné. Strmý nárůst odporu po praní, pravděpodobně plyne z nepoddajnosti konstantanových mikrodrátků, u kterých mohlo vlivem namáhání dojít k polámání.



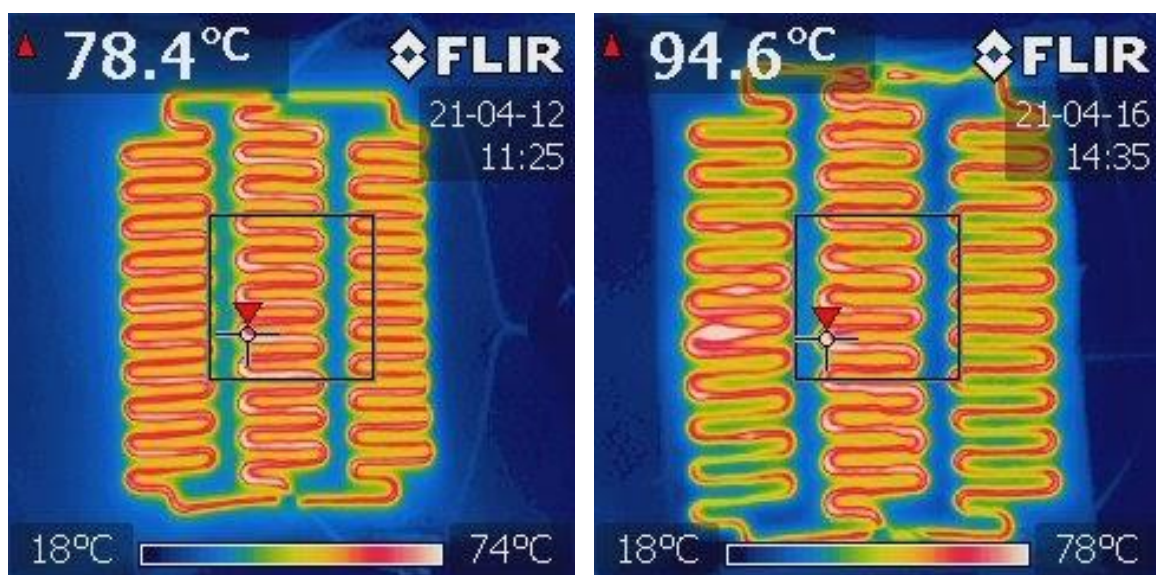
Obr. 55: A3 před praním (vlevo) a po praní (vpravo) při napájení proudem o velikosti 2,5 A

Tab. 7: Naměřené hodnoty na vzorku 3A, po praní, při proudu 2,5 A

Počet cyklů	0	1	2	5	10	20
Odpor ( $\Omega$ )	2,08	2,2	2,24	2,56	2,84	2,88
Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	44	45,9	47,6	51,6	54,9	55,7
Napětí (U)	5,2	5,5	5,6	6,4	7,1	7,2
Proud (I)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Příkon (W)	13	13,75	14	16	17,75	18

**Vzorek 4A**

Tento vzorek vyhřívané textilie zařazený do skupiny A, je tvořený běžnou tkanou textilií s keprovou vazbou. Ta slouží jako základní textilní substrát, na kterém je vodivou nití č. 2 (Cu/Ag) vyšitý vyhřívaný motiv. Tento vzorek při měření elektrického odporu vykazoval stejně jako pletenina využívající stejný typ hybridní nitě velice rychlé ustálení teploty i hodnoty odporu. Při pohledu na snímek před praním na Obr. 56, lze konstatovat, že homogenita rozložení teploty v případě vyšíváního motivu před praním byla velmi dobrá. Prostřední vyhřívaná větev vyhřívaného motivu sice měla mírně vyšší teplotu oproti krajním větvím, to však bylo způsobeno nepatrně kratší délkou její vodivé dráhy. Již po prvním vyprání a následném sušení došlo k znatelnému nárůstu rezistivity tohoto vzorku. V některých místech dokonce začalo docházet k přehřívání. Po druhém vyprání došlo opět k nárůstu rezistivity celého vzorku, na jedné z bočních větví navíc začalo docházelo k výraznému přehřívání. Ve zbytku větve s tímto poškozením naopak nedocházelo k dostatečnému vyhřívání (porovnání homogenity rozložení teploty na Obr. 56). Po pěti pracích cyklech a následném sušení došlo u vzorku 4A k úplné ztrátě funkce. Naměřený odpor dosahoval hodnot v řádu stovek k $\Omega$ . Z takto vysokého hodnoty elektrického odporu vyplývá, že na všech paralelních větvích muselo dojít k zásadním poškozením vodivých mikrodrátků.



Obr. 56: Vzorek 4A před praním (vlevo) a po druhém praní a sušení (vpravo) při napájení proudem o velikosti 2,5 A

Tab. 8: Naměřené hodnoty na vzorku 3A, po prání, při proudu 2,5 A

Počet cyklů	0	1	2	5
Odpor ( $\Omega$ )	4,32	4,4	4,44	nefunkční
Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	78,4	90,2	94,6	-
Napětí (U)	10,8	11	11,1	-
Proud (I)	2,5	2,5	2,5	-
Příkon (W)	27	27,5	27,75	-

V oblasti, ve které docházelo k přehřívání byla provedena optická inspekce pod mikroskopem. Při bližším zkoumání bylo zjištěno, že v tomto místě došlo k zprětrhání několika postříbřených měděných mikrodrátků (Obr. 57), které zapříčinilo přehřívání a nedostatečné vyhřívání ve zbytku této větve. Při optické inspekci pod mikroskopem po pátém cyklu bylo zjištěno, že se stejný jev objevil v mnohem větší míře a zapříčinil úplnou nefunkčnost vyhřívání ve všech vyhříváných větvích. Pravděpodobně došlo k poškození pouze v případě vodivých mikrodrátků, u textilních vláken hybridní nitě není pozorovatelné žádné výrazné poškození.



Obr. 57: Snímek místa poruchy na vzorku 4A, zapříčiněné zprětrháním Cu/Ag mikrodrátků hybridní vodivé nitě č. 2

## 5.2 Výsledky testování v šokové komoře a na bend testeru

Vzorky skupiny B byly nejprve podrobeny testu v šokové komoře, kde byly vystaveny cyklickým skokovým změnám teploty. Na všech vzorcích byl před vložením do komory změřen elektrický odpor pomocí čtyřbodové metody a proveden snímek termokamerou při napájení konstantním proudem 2,5 A. Stejný postup následoval po dokončení testu a vyjmutí vzorků. U všech vzorků lze pozorovat drobné zvýšení elektrického odporu, tento nárůst však u žádného vzorku není větší než 2 % z původní hodnoty.

Tab. 9: Výsledky testování v šokové komoře

Prováděné testy	Před šokovou komorou	Po šokové komoře
R <sub>1B</sub> (Ω)	3,46	3,50
R <sub>2B</sub> (Ω)	2,98	3,01
R <sub>3B</sub> (Ω)	2,54	2,58
R <sub>4B</sub> (Ω)	3,53	3,55

Následně tato skupina vyhřívaných textilií absolvovala také testování na tzv. bend testeru. Při kterém u pletených textilií vlivem natahování ve směru vodivých drah postupně docházelo ke snižování jejich elektrického odporu. Vzorek 4B (vyšívání vzor na tkané textilií) nebylo možné natahovat, proto tento test nahradilo ohýbání. U vzorku 4B došlo vlivem ohýbání jen k nepatrnému zvýšení elektrického odporu. Podrobnější specifikace prováděných testů je popsána v kapitolách výše. Tab. 10 obsahuje hodnoty odporu naměřené čtyřbodovou metodou na vzorcích skupiny B. Grafy znázorňující trendy naměřených hodnot se nalézají v následující kapitole, která se věnuje shrnutí naměřených hodnot.

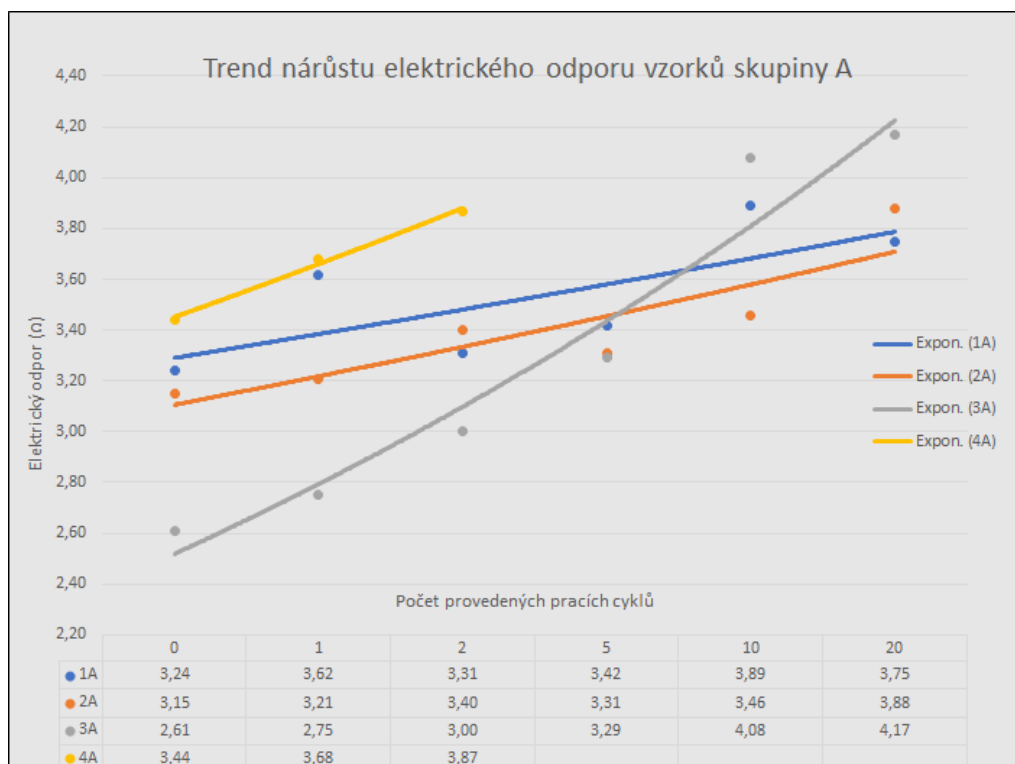
Tab. 10: Výsledky testování natahováním a ohýbáním

Prováděné testy	Před testem	100 cyklů	200 cyklů	500 cyklů	1000 cyklů
R <sub>1B</sub> (Ω)	3,50	3,41	2,98	2,73	2,58
R <sub>2B</sub> (Ω)	3,00	2,98	2,94	2,78	2,44
R <sub>3B</sub> (Ω)	2,58	2,27	2,09	2,04	2,06
R <sub>4B</sub> (Ω)	3,57	3,57	3,58	3,59	3,59

### 5.3 Shrnutí naměřených výsledků

#### Shrnutí výsledku testů praním

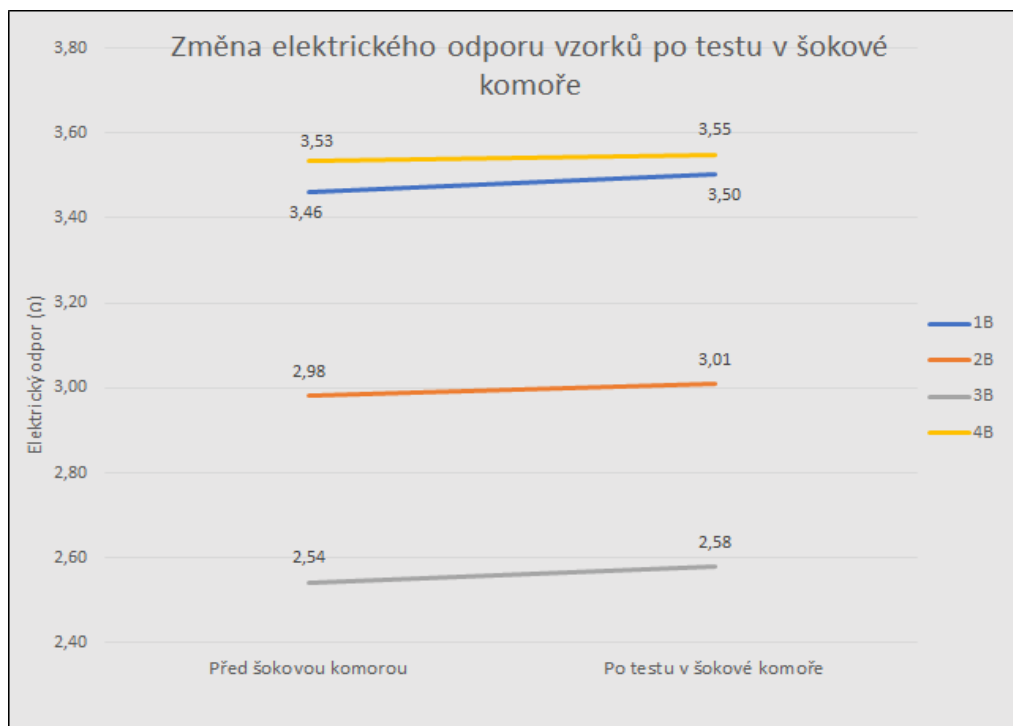
Graf 1 zobrazuje křivky, které vzniknou proložením hodnot elektrického odporu naměřených čtyřbodovou metodou na vzorcích skupiny A. Ze strmosti modré a oranžové křivky je patrné, že na vzorcích 1A (bronzové hybridní nitě) a 2A (Cu/Ag hybridní nitě) vlivem absolvování pracích a sušících cyklů postupně dochází k nárůstu rezistivity vyhřívaného motivu. Vzorek 3A (konstantanové hybridní nitě), na rozdíl od předešlých pletených textilních vzorků vykazuje znatelně strmější nárůst rezistivity vodivých drah, resp. vyhřívaného motivu. Tento jev lze odůvodnit tím, že konstantan (slitina mědi a cínu) je ze všech materiálů použitých v hybridních nitích nejméně poddajný, a tak pravděpodobně v průběhu praní docházelo v namáhaných místech k lámání těchto metalických mikrodrátků. Tyto zlomy pak způsobují lokální snížení vodivosti, které ve výsledku vede k nárůstu rezistivity celého vyhřívaného motivu. Krátká žlutá křivka pak znázorňuje chování vzorku 4A (vyšíváný vyhřívaný motiv), který před praním vykazoval velmi dobré vlastnosti. Bohužel s každým praním rychle docházelo k výraznému nárůstu elektrického odporu. Po pátém pracím cyklu již došlo k úplné ztrátě funkce na všech vyhřívaných větvích, vlivem mnohočetného zpřetrhání metalických mikrodrátků v hybridní niti.



Graf 1: Trend nárůstu elektrického odporu vzorků vyhřívaných textilií skupiny A v závislosti na počtu absolvovaných pracích cyklů.

### Shrnutí výsledku testů v šokové komoře

Na základě testu provedeného v klimatické komoře, lze konstatovat, že všechny zkoušené vzorky (skupiny B) prošly testem opakovaných skokových změn teploty mezi +85°C a -25 °C bez významných změn. U všech vzorků došlo k nepatrnému nárůstu elektrického odporu, ze kterého také vyplývá drobný nárůst teploty. Tento drobný nárůst je teploty je možné pozorovat na snímcích pořízených termokamerou (Příloha B), ze snímků je taktéž patrné, že po testu nedošlo ke změnám v rozložení teploty. Při měření na vzorku 1B došlo k poměrně zvláštnímu jevu. Naměřená teplota po provedeném testu byla nižší než před ním i přesto, že došlo k drobnému nárůstu odporu stejně jako u ostatních vzorků. Tento jev je pravděpodobně způsoben chybou při měření nejteplejšího bodu provedeného před testem. Ze škály barev v dolní části snímků (na Obr. 62, Příloha B) reprezentující teploty je patrné, že reálný rozdíl v teplotách pravděpodobně není tak velký, jak se ze zobrazených hodnot může zdát. Parametry vzorků této skupiny byly opět změřeny s odstupem několika dní k ověření, zda nedošlo k nějakým podstatným změnám vlivem hystereze. Měřením bylo zjištěno, že elektrický odpor zůstal dle očekávání totožný.

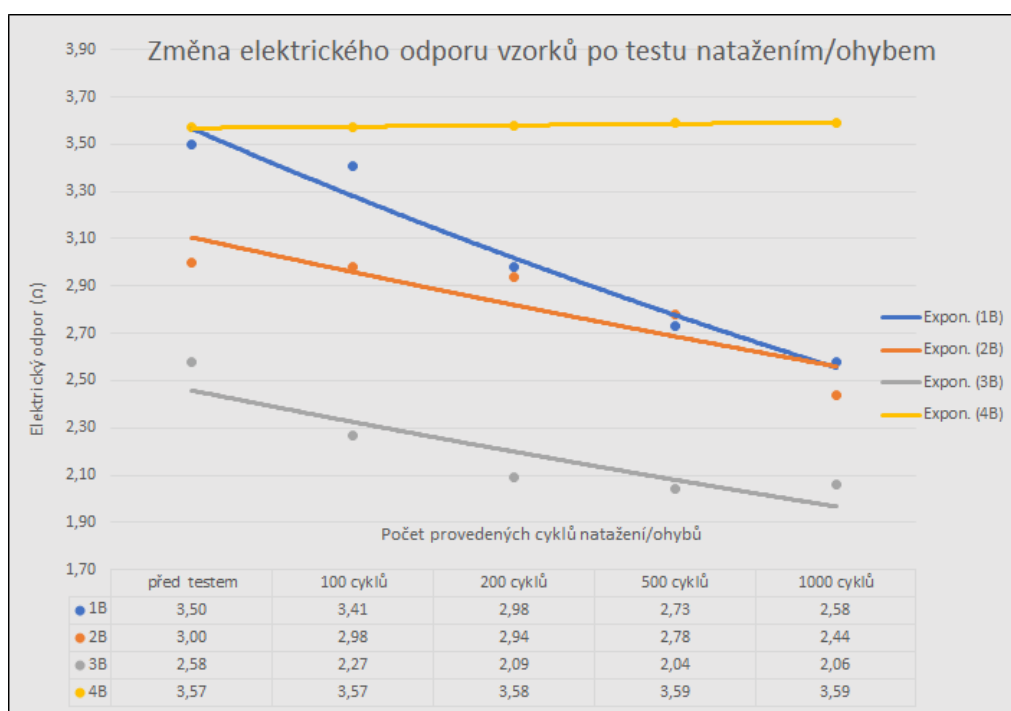


Graf 2: Trend nárůstu elektrického odporu vyhřívaných textilií po absolvování testů skokovými změnami teploty.



### Shrnutí výsledku testů na natahování a ohybem

Po absolvování testu v šokové komoře a ověření elektrických parametrů s odstupem několika dní putovala skupina vzorků s označením B na tzv. bend tester. Zde pletené textilní vzorky absolvovaly test natahování o cca 10 % oproti běžné délce a tkanina s vyšitým vyhřívaným vzorem byla podrobena testu ohýbáním. U všech pletených textilií docházelo vlivem cyklického natahování k poklesu elektrického odporu. Nejvíce odpor klesal u vzorků 1B a 3B tedy těch které využívají bronzové a konstantanové hybridní vodivé nitě. U vzorku 2B, který obsahuje hybridní vodivé nitě s postříbřenými měděnými mikrodrátky také došlo k poklesu odporu. Který však nebyl tak výrazný jako v případě ostatních textilií. Textilní vzorek 4B s vyšitým vyhřívaným vzorem vykazoval po testu tisícem ohýbacích cyklů jen nepatrný nárůst elektrického odporu. Zajímavým jevem je to, že při opakování měření odporu po testu natahování s odstupem jednoho týdne, došlo u všech pletených textilních vzorků k nárůstu odporu téměř na původní hodnotu před tímto testem.



Graf 3: Trend změny elektrického odporu vyhřívaných textilií po absolvování testu natahování (v případě pletenin) a ohýbáním (v případě vzorku 4B).

## 5.4 Diskuse naměřených hodnot a porovnání s předpoklady

Jak z přesně naměřených hodnot odporu pomocí čtyřbodové metody, tak z hodnot odporu vypočtených z napájecího proudu a napětí při pořizování snímků termokamerou lze vyčíst, že sledovaná změna parametrů se shoduje s původními předpoklady. V některých případech (především skupina A) docházelo ke kolísání hodnot, které není jednoznačně odůvodnitelné vzhledem ke složitosti struktury vodivých drah v pletených textiliích. Po proložení naměřených hodnot křivkou, však vždy získáme předpokládaný trend, tedy nárůst výsledného odporu po praní nebo naopak jeho snižování při natahování textilie ve směru vodivých hybridních nití (v případě pletených textilií). Zajímavým zjištěním je vysoká odolnost všech zkoumaných typů vyhřívané textilie při testu v šokové komoře, kdy u všech vzorky byl pozorován jen minimální nárůst rezistivity vyhřívaného motivu.

Při hodnocení vyhřívaných textilií na základě naměřených hodnot je třeba brát v potaz, že všechna měření probíhala na připojeném druku, hodnoty tedy zahrnují nejen elektrický odpor vodivého motivu, ale také přechodový odpor druku, kterým je realizován rozebíratelný kontakt k připojení napájecího zdroje. Pro hrubou představu velikosti vlivu přechodového odporu druku na celkový naměřený odpor, bylo po dokončení testování provedeno měření odporu čtyřbodovou metodou na druku a mimo něj, tedy přímo na vodivé stuze. Rozdíl těchto hodnot se u všech vzorků pohyboval řádově v setinách ohmu.

Z provedených testů vyplývá, že největší slabinou všech testovaných vzorků je jednoznačně praní, při kterém u všech vzorků docházelo k podstatnému nárůstu rezistivity motivu, v případě vzorku 3A (konstantan), pak byl tento nárůst obzvláště strmý a u vzorku 4A (vyšívaný vzor) došlo vlivem praní k úplné ztrátě funkčnosti. Toto zjištění není pro další rozvoj současných nositelných e-textilií příliš pozitivní, jelikož před jejich masovým rozšířením bude nejprve nutné vyřešit současné kompromisy mezi spolehlivostí a údržbou. Jako možné řešení tohoto problému především v případě vyšívaných vodivých motivů se jeví použití ochranné vrstvy. A to buď přímo na kovových drátcích v rámci hybridní vodivé nitě (např. lakováním) nebo zapouzdřením celé nitě na povrchu textilie pomocí silikonu. Tímto řešením však vznikají nové technické problémy jako je nutnost prohřívání této ochranné vrstvy. Diskutabilní je také odolnost a životnosti samotné této ochranné vrstvy při praní a sušení.

## 5.5 Doporučení pro praxi

Na základě výsledků a zkušeností získaných v praktické části této práce, lze ze zkoumaných materiálů jednoznačně vybrat jeden typ vyhřívané textilie, který se nejlépe hodí k realizaci vyhříváných textilních produktů. Tímto materiálem je pletenina, která tvoří základ návrhu č. 2, resp. vzorků 2A a 2B. Tato textilie obsahuje vodivé pruhy, které jsou realizovány několika řadami vodivé nitě č. 2, kterou tvoří kombinace čtyř polyesterových textilních vláken a čtyř měděných mikrodrátků s postříbřeným povrchem. Vyhřívané textilní vzorky vyrobené z této pleteniny se vyznačovaly velmi dobrou homogenitou rozložení teploty, která se výrazně nezhoršila ani po absolvování všech testů. Dobrých výsledků tento materiál dosahoval také z hlediska odolnosti vůči praní a sušení. Docházelo sice k postupnému nárůstu odporu, ale trend tohoto nárůstu (Graf 1) je natolik pozvolný, že i po dvaceti pracích a pěti sušících cyklech byl vzorek zcela funkční. Vzorek 2A po absolvování všech testů praním byl stále schopen plnit svou původní funkci vyhřívání bederního pásu napájeného zdrojem značky 30seven. Při použití tohoto zdroje na maximální úroveň vyhřívání stále dosahovala teplota povrchu textilie dostatečných 36 °C. Tento typ vyhřívané pletené textilie tedy lze doporučit pro realizaci produktů určených k běžnému používání včetně údržby.

Stejná hybridní vodivá nit č. 2, byla použita i v případě vzorků s vyšíváním motivem (4A, 4B). Tyto vzorky také zpočátku vykazovaly rychlé ustálení hodnoty odporu a dobrou homogenitu rozložení teploty. Na vzorku 4A, který absolvoval testy praním se však velmi rychle projevila zásadní slabina vyšívání motivu. Ten je velmi náchylný na mechanické poškození vodivých mikrodrátků v průběhu praní. V důsledku toho byl vzorek 4A již po pátém pracím cyklu zcela nefunkční. Tato metoda vytváření vyhřívané textilie se však jeví jako vhodná pro využití v oblastech, ve kterých textil není v přímém kontaktu s pokožkou a není tak kladen požadavek na častou údržbu. Výborným příkladem pro využití této metody se jeví vyhřívání podsedačky v kostelech, u kterých není předpokládána údržba praním.

## Závěr

Tato diplomová práce si kladla za cíl získání poznatků z oblasti spolehlivosti vyhřívaných textilií. Hlavním úkolem bylo získání představy o vlivu provádění údržby na elektrické parametry různých typů vyhřívaných textilií.

Úvodní část této práce byla věnována představení a definici e-textilií. Jsou zde uvedeny postupy vytváření vodivých cest na textilním substrátu a metod vytváření elektrických kontaktů v oblasti e-textilií. Na tuto část navazuje další kapitola, která obsahuje porovnání těchto metod z hlediska jejich vlastností, podstatných pro využití v oblasti vyhřívaných textilií. Z tohoto hodnocení nejlépe vyšla pletená vyhřívaná textilie s vodivými hybridními nitěmi a vyšivané vyhřívané textilie s vodivými hybridními nitěmi. V této části věnované obecně vyhřívaným textiliím je také uvedeno několik experimentálních a komerčně nabízených produktů, které nastiňují aktuální stav tohoto odvětví.

Za účelem získání reálných zkušeností a dat, byl proveden návrh čtyř typů textilních vzorků. Následně na jejich základě bylo realizováno osm funkčních vzorků vyhřívaných textilií. Tyto vzorky byly následně pro účely testování různých typů namáhání rozděleny do dvou skupin. Pro skupinu A byla navržena metodika testování praním v automatické pračce a sušením v automatické sušičce dle ČSN EN ISO 6330:2012. Skupina vzorků s označením B nejprve podstoupila test skokovými změnami teploty v šokové komoře dle normy ČSN EN 60068-2-14:2010. Následně tato skupina putovala na tzv. bend tester ke zjištění vlivu natahování a ohýbání na elektrické parametry zkoumaných vzorků. Hodnocenými parametry k posouzení vlivu těchto testů na vzorky byla hodnota elektrického odporu a homogenita rozložení teploty. Měření elektrického odporu bylo prováděno pomocí čtyřbodové metody tak, aby byly získány dostatečně přesné hodnoty bez chyby vnesené odporem přívodních vodičů. K měření dostatečně přesné hodnoty elektrického odporu byla použita čtyřbodová metoda. Homogenita rozložení teploty spolu s maximální teplotou na povrchu textilních vzorků byla posuzována na základě snímků pořízených termokamerou.

Ve finální části práce byly zhodnoceny získané výsledky, ze kterých nejlépe vyšel vzorek pletené textilie využívající hybridní vodivé nitě s postříbřenými měděnými mikrodrátky. Nejsilnější stránkou vzorků z tohoto materiálu byla výborná homogenita rozložení teploty, která se výrazně nezhoršovala ani po absolvování zkušebních testů. Dobré výsledky této textilie plynou především z dobré pružnosti a poddajnosti mědi oproti ostatním

kovovým materiálům (bronz, konstantan) použitým v hybridních nitích. Tato část dále obsahuje grafy znázorňující trendy změn elektrického odporu jednotlivých vzorků v průběhu testování. Získané hodnoty jsou v grafech pro přehlednost proloženy křivkou. Díky tomu jsou na první pohled patrné rozdíly mezi jednotlivými vzorky v závislosti na použitém typu hybridní vodivé nitě. Na základě získaných hodnot a z nich patrných vlastností jednotlivých vzorků byla tato práce zakončena doporučením pro praxi v oblasti vyhřívaných textilií z hlediska jejich předpokládané údržby.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MATTILA, H. R., *Intelligent Textiles and Clothing*, CRC Press, 2006. ISBN-13:978-0849390999
- [2] MOŽNAROVÁ, Lenka. *Studie uplatnění inteligentních (Smart) textilií*. B.m., 2004. Technická univerzita v Liberci.
- [3] EUFINGER, K., *Standardization of smart textiles and wearable intelligence*, Centexbel, 2016
- [4] STOPPA, Matteo a Alessandro CHIOLERIO. *Wearable electronics and smart textiles: A critical review*. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2014, 14(7), 11957–11992. ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s140711957]
- [5] Smart textilie, FEL ZČU. [Online]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/36918/1/Smart%20textilie.pdf> [citováno: 23-11-2020]
- [6] *E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies* | Textile World. [textileworld.com](http://www.textileworld.com) [online]. 2010, Dostupné z: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2010/04/e-textiles-forwearability-review-of-integration-technologies/> [citováno 05-01-21]
- [7] Silver fibre. R.STAT - Technical Fibres [online]. Dostupné z: <http://www.r-stat.fr/uk/silver-fibre.php> [citováno 05-01-21]
- [8] *Textilní vlákna - KRINOLÍNA.CZ*. KRINOLÍNA.CZ - Sdílená šicí dílna [online]. Copyright © 2016 Krinolína.cz [cit. 06.01.2021]. Dostupné z: <http://www.krinolina.cz/textilni-vlakna/>
- [9] ŠKOLATEXTILU.CZ - Základní pojmy. e-LTex [online], [cit. 06.01.2021]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/311/textilni-terminologie-zboziznalstvi/pleteniny/Zakladni-pojmy.html>
- [10] NIS - Nábytkářský informační systém. NIS - Nábytkářský informační systém [online]. Copyright ©2013 [cit. 06.01.2021]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/pleteniny/page/456/>
- [11] Shieldex® Knitted Fabrics - Statex | Metallized Technical Textiles. Statex | World Of Silver - Statex | Metallized Technical Textiles [online]. Copyright © 2020 Statex [cit. 06.01.2021]. Dostupné z: <https://statex.de/en/shieldex-knitted-fabrics/>
- [12] TAO, Xiaoming et al. *Smart Fibres, Fabrics and Clothing* [online]. 2001. ISBN 0849311721. Dostupné z: doi:10.1533/9781855737600
- [13] CARAMILLA.CZ - Nevyléčitelná posedlost jménem látky: Caramilla.cz – Web nejen pro švadlenky [online]. Copyright © Petra Macháčková, autorkou textů, fotografií a stříhů. [cit. 26.01.2021]. Dostupné z: <https://www.caramilla.cz/nevylecitelna-posedlost-jmenem-latky/>
- [14] TAO, Xiaoming, ed. *Handbook of smart textiles*, Singapore: Springer, 2015. ISBN 978-981-4451-44-4
- [15] LOCHER, I. a A.G. SEFAR. *Joining technologies for smart textiles. Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers* [online]. Elsevier, 2013, 2013, s. 285-305 [cit. 2021-01-27]. ISBN 9780857093424. Dostupné z: doi:10.1533/9780857093530.2.285
- [16] WIRTH, Václav. *Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje*. Plzeň, 2017 [cit. 2021-01-27]. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce: Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.
- [17] *SOLDERING CONDUCTIVE FABRIC - HOW TO GET WHAT YOU WANT*. [online]. [cit. 27.01.2021]. Dostupné z: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=1718>

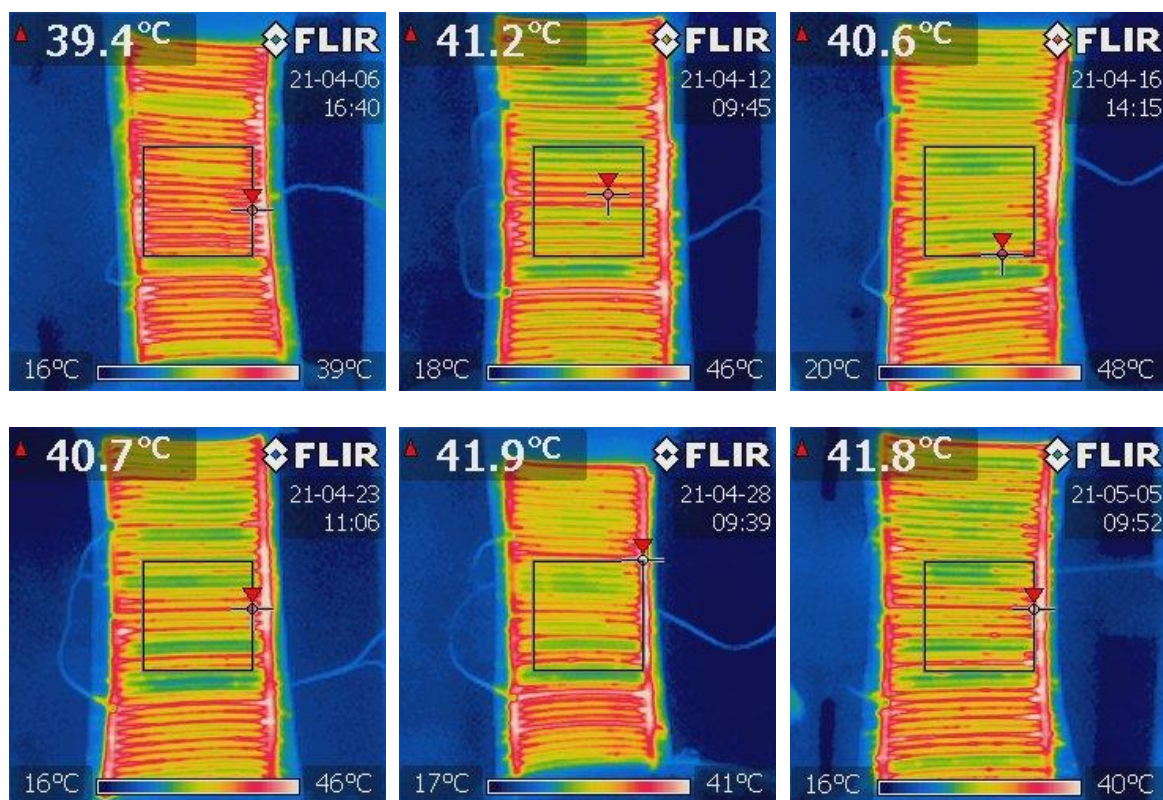
- [18] Odporové svařování - bodovací kleště, stolní bodovky, stojanové bodovky, navařovací stroje | Svářečí technika Schinkmann.cz. Svářečí technika Schinkmann.cz [online]. Copyright © 1991 [cit. 27.01.2021]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
- [19] What is Ultrasonic Welding and is it Right for Me? — RevPart. RevPart: Custom Rapid Prototyping & Injection Molding Company [online]. Copyright © 2020, Central One, Inc. dba RevPart, All rights reserved. [cit. 27.01.2021]. Dostupné z: <https://revpart.com/ultrasonic-welding-right/>
- [20] OLDERING CONDUCTIVE FABRIC - HOW TO GET WHAT YOU WANT. [online]. [cit. 27.01.2021]. Dostupné z: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=1718>
- [21] LOCHER, I. a A.G. SEFAR. Joining technologies for smart textiles. Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers [online]. Elsevier, 2013, 2013, s. 285-305 [cit. 2021-01-27]. ISBN 9780857093424. Dostupné z: doi:10.1533/9780857093530.2.285
- [22] C. Kallmayer and E. Simon, "Large area sensor integration in textiles," International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, Chemnitz, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/SSD.2012.6198112.
- [23] NICOMATIC - Manufacturer and designer of interconnect solutions. [online]. Copyright © 2020 NICOMATIC [cit. 09.02.2021]. Dostupné z: <https://www.nicomatic.com>
- [24] Electrically Conductive Hook and Loop | HookandLoop.com. Hook and Loop Fasteners, Tape, Velcro & Straps | HookandLoop.com [online]. Copyright © 1998 [cit. 09.02.2021]. Dostupné z: <https://www.hookandloop.com/blog/electrically-conductive-hook-loop/>
- [25] 9V Battery Snap Connector – Solarbotics Ltd.. Solarbotics Ltd. – Hardware hacking and Geekware since 1994 [online]. Dostupné z: <https://solarbotics.com/product/bhold9v/>
- [26] RUBINOVÁ, Olga, Tepelná pohoda a tepelná rovnováha člověka, VUT Brno. [online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/306647-Tepelna-pohoda-a-tepelna-rovnovaha-cloveka.html> [citováno 04-12-20]
- [27] M. Neruda and L. Vojtech, "Heating ability of electrically conductive textile materials," *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, Brno, 2014, pp. 631-634, doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018332.
- [28] CROUSE, M., Electrically heated textiles now possible, 2017. [Online]. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1944454030?accountid=14965> [citováno: 30-11-2020]
- [29] N. Neella, V. Gaddam, K. Rajanna and M. M. Nayak, "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)*, Los Angeles, CA, 2017, pp. 177-180, doi: 10.1109/NEMS.2017.8017000.
- [30] Sada vyhřívaného unisex termoprádla Glovii GX - černá - inSPORTline. *inSPORTline - největší výrobce a prodejce fitness v ČR* [online]. Copyright © 2021 [cit. 10.02.2021]. Dostupné z: <https://www.insportline.cz/37524/sada-vyhriwaneho-unisex-termopradla-glovii-gx/cerna>
- [31] [Taschenwärmer und Taschenofen Alternativen auf - » warmx.de. *Taschenwärmer und Taschenofen Alternativen auf - » warmx.de* [online]. Copyright © warmX GmbH. [cit. 10.03.2021]. Dostupné z: <https://www.jagen.warmx.de/>

- [32] PLIC, Václav. Vyhřívané textilie pro smart textilní aplikace. Plzeň, 2019 [cit. 2021-02-26]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce: Ing. Radek Soukup, Ph.D.
- [33] Thermal shock chamber – 60 - 300 l, -80 °C ... +220 °C | VT<sup>3</sup> S2 series - Vötsch Industrietechnik. DirectIndustry - The B2B marketplace for industrial equipment: sensors, automation, motors, pumps, handling materials, packaging, etc. [online]. [cit. 10.02.2021]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/voetsch-industrietechnik/product-16219-424369.html>
- [34] Termokamera FLIR i7 | Termokamera FLIR. Oficiální dodavatel termokamer FLIR pro ČR a SK | Termokamera FLIR [online]. [cit. 10.02.2021]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamery-flir-i/>
- [35] Termovizní monokulár HIKMICRO LYNX PRO LH19 - ThermVisia bestguarder.cz - noční vidění a termovize. Digitální noční vidění a termovize - ThermVisia bestguarder.cz - noční vidění a termovize [online]. Copyright © ThermVisia bestguarder.cz [cit.10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.bestguarder.cz/znacky/termovizni-monokular-hikmicro-lynx-pro-lh19/>

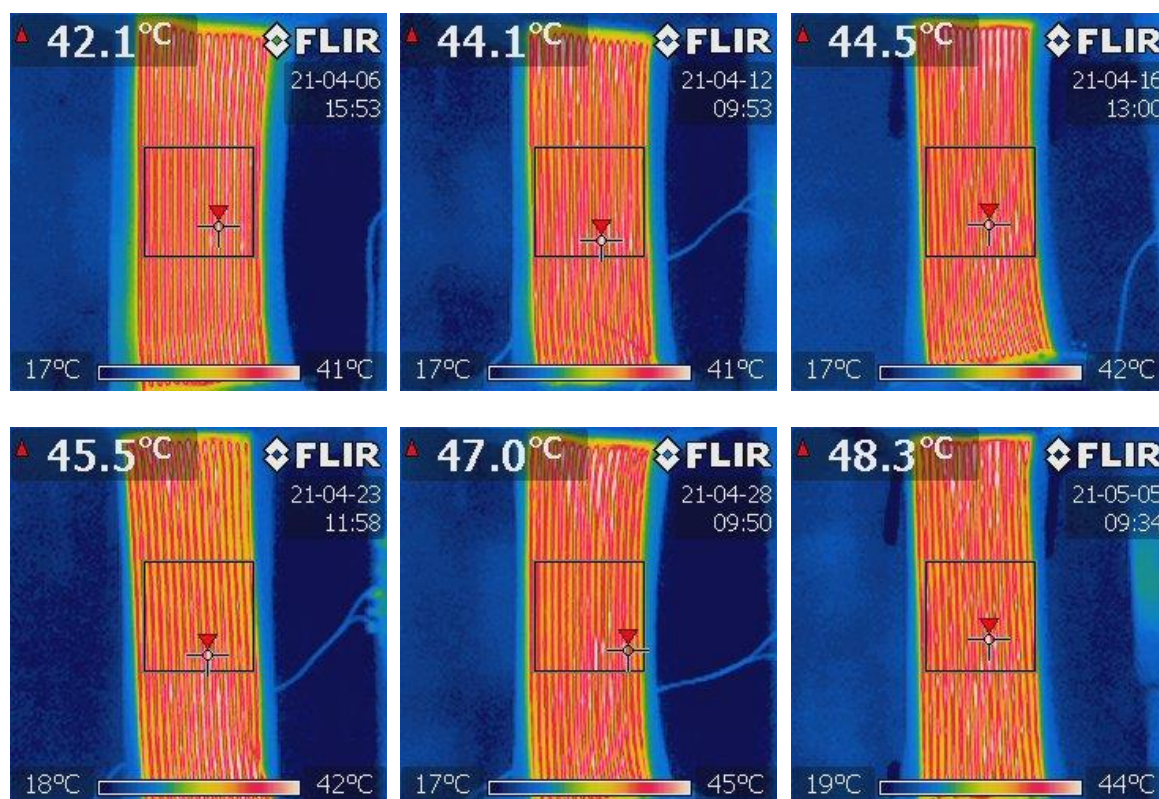


## Přílohy

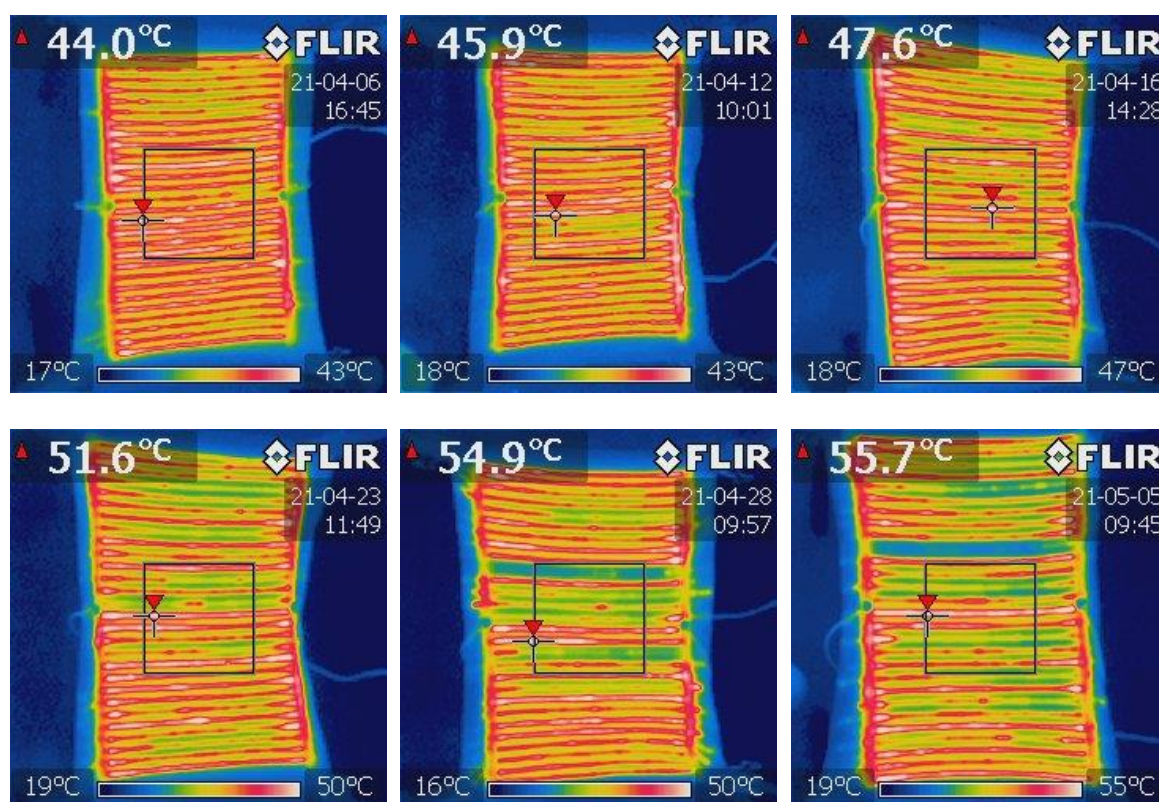
### Příloha A – Snímky vzorků ze skupiny A



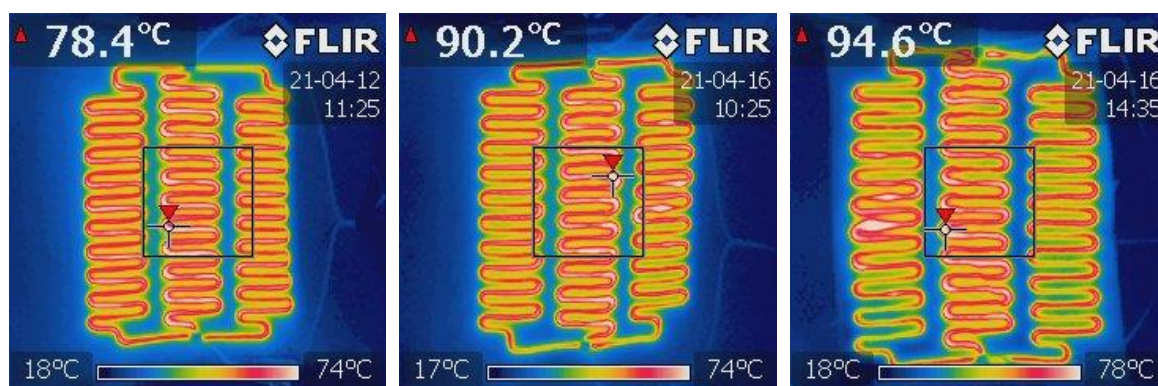
Obr. 58: Vzorek 1A (zleva nahoře) před vypráním, po 1. prání, po 2. prání, po 5. prání, po 10. prání a po 20. prání



Obr. 59: Vzorek 2A (zleva nahoře) před vypráním, po 1. prání, po 2. prání, po 5. prání, po 10. prání a po 20. prání

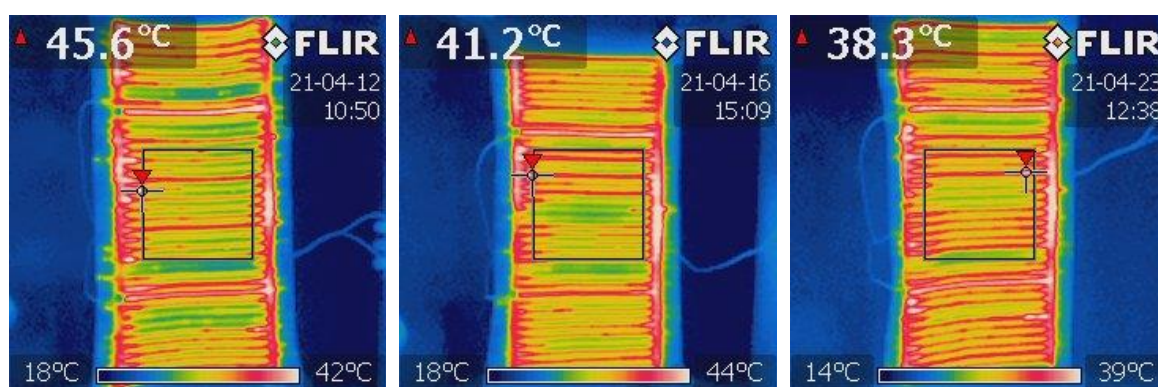


Obr. 60: Vzorek 3A (zleva nahoře) před vypráním, po 1. prání, po 2. prání, po 5. prání, po 10. prání a po 20. prání

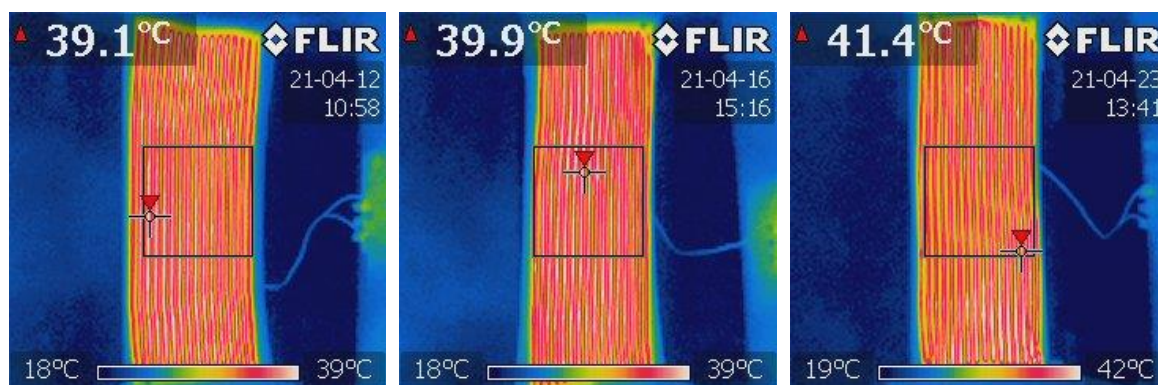


Obr. 61: Vzorek 4A (zleva) před vypráním, po 1. prání a po 2. prání

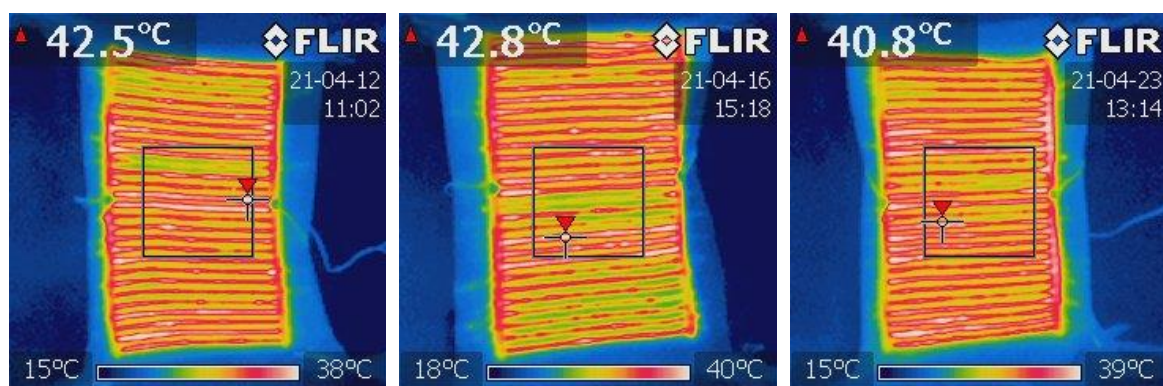
### Příloha B – Snímky vzorků ze skupiny B



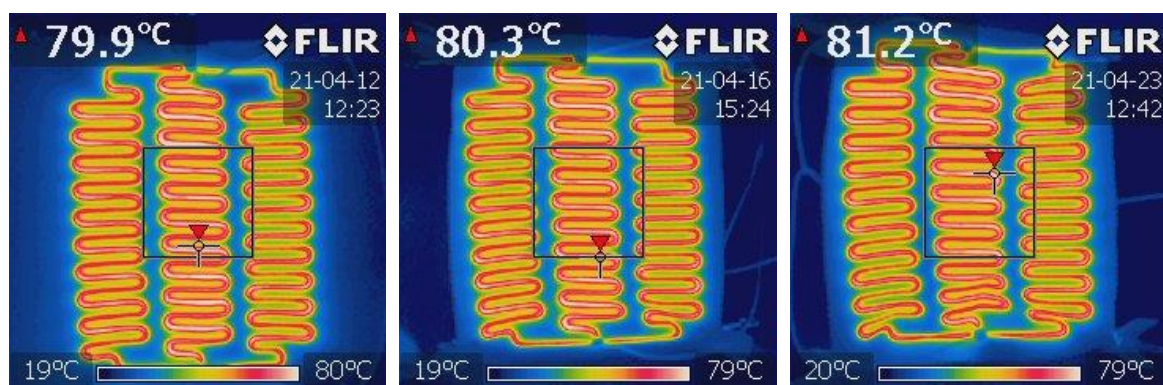
Obr. 62: Vzorek 1B (zleva) před testy, po testu v šokové komoře, po testu na natahování na bend testeru



Obr. 63: Vzorek 2B (zleva) před testy, po testu v šokové komoře, po testu na natahování na bend testeru

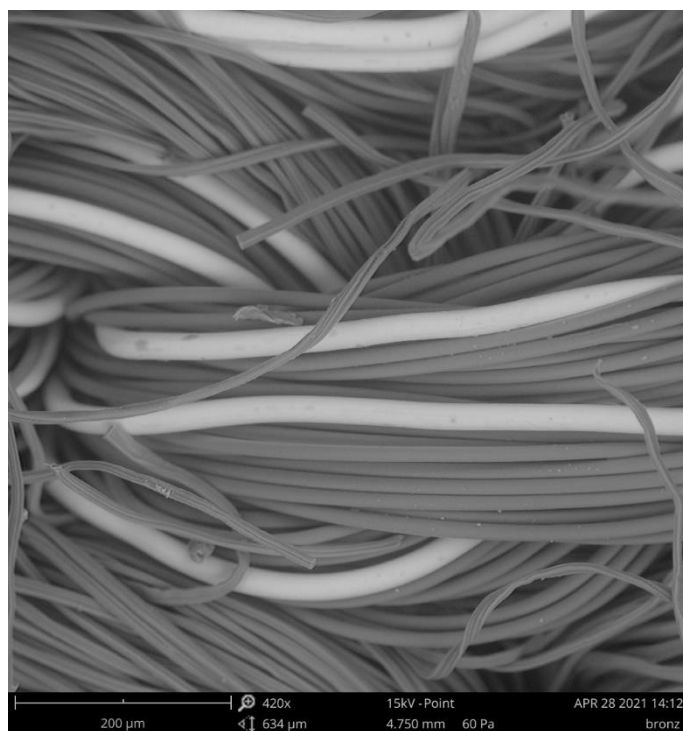


Obr. 64: Vzorek 3B (zleva) před testy, po testu v šokové komoře, po testu na natahování na bend testeru

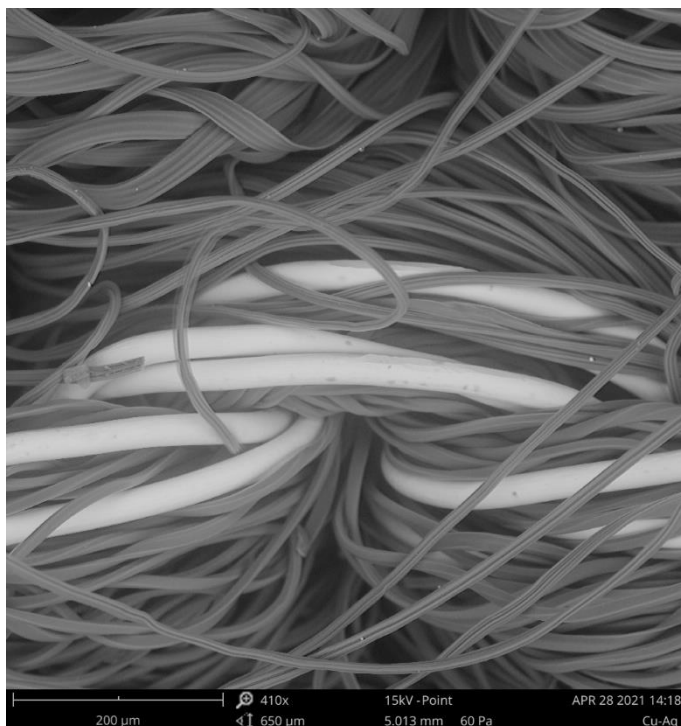


Obr. 65: Vzorek 4B (zleva) před testy, po testu v šokové komoře, po testu ohýbáním na bend testeru

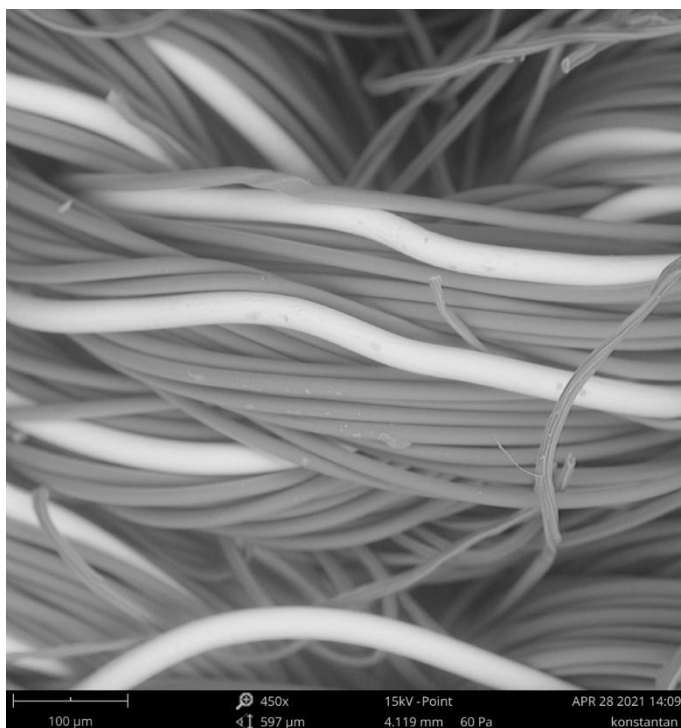
### Příloha C – Detailní snímky struktury materiálů



Obr. 66: Snímek bronzových hybridních nití v pletenině pod stolním skenovacím elektronovým mikroskopem Phoenom Pro X

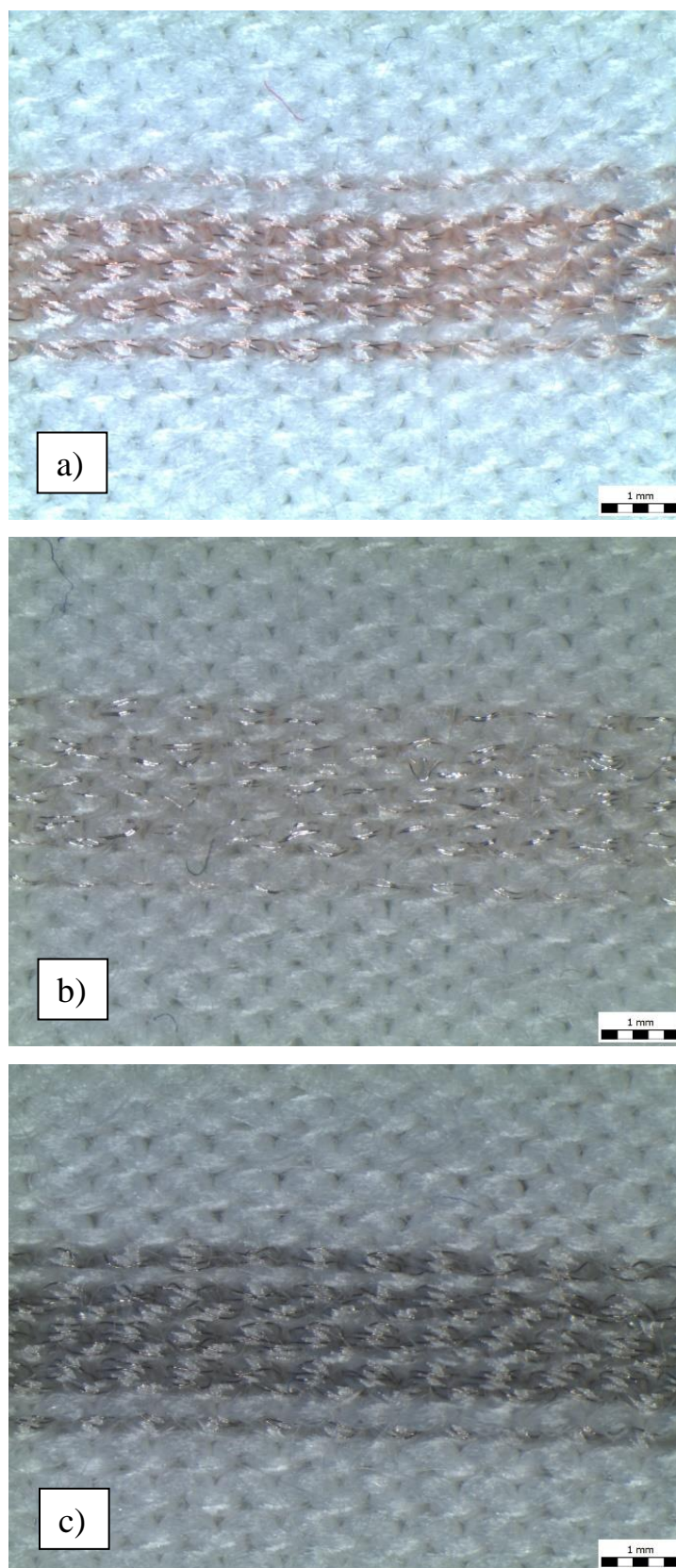


*Obr. 67: Snímek Cu/Ag hybridních nití v pletenině pod stolním skenovacím elektronovým mikroskopem Phoenom Pro X*

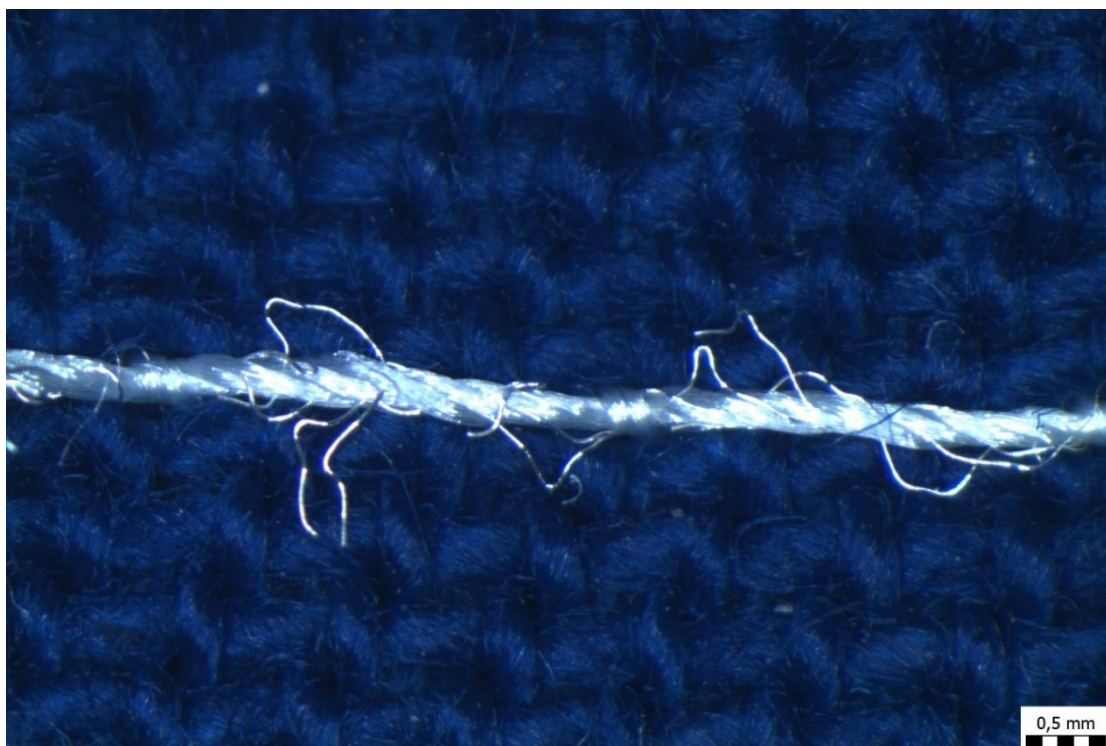


*Obr. 68: Snímek Cu/Ni hybridních nití v pletenině pod stolním skenovacím elektronovým mikroskopem Phoenom Pro X*

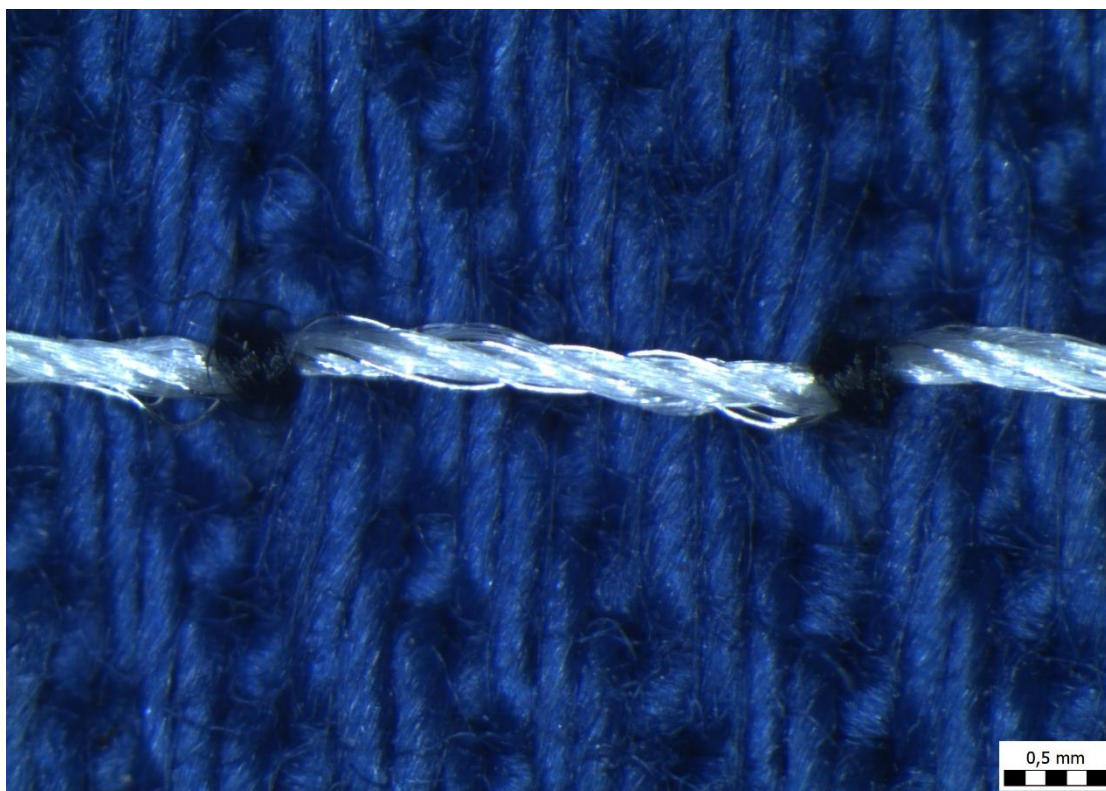
## Příloha D – Snímky stavu vodivých cest po testování praním



Obr. 69: Snímky stavu vodivých pruhů na pletených vzorcích po absolvování testů praním, pořízené pod stereo mikroskopem OLYMPUS SZX10, a) vzorek 1A (bronz), b) vzorek 2A (Cu/Ag), c) vzorek 3A (konstantan)



*Obr. 70: Hybridní vodivá nit vzorku 4A po 5. pracím cyklu (viditelné mnohačetné poškození vodivých mikrodrátků), pod stereo mikroskopem OLYMPUS SZX10*



*Obr. 71: Hybridní vodivá nit vzorku 4B po testování v šokové komoře a na bend testeru (nejdou patrné žádné viditelné změny), pod stereo mikroskopem OLYMPUS SZX10*