

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra materiálů a technologií

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Textilní senzory pro ochranné oděvy a technické textilie

Autor práce: **Václav Růžička**  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Kalčík**

2022

---

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Václav RŮŽIČKA**  
Osobní číslo: **E19B0063P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Téma práce: **Textilní senzory pro ochranné oděvy a technické textilie**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

### Zásady pro vypracování

1. Prostudujte problematiku textilních i konvenčních senzorů vhodných pro oblast chytrých ochranných oděvů a technických textilií.
2. Popište principy a způsoby měření vybraných textilních i konvenčních senzorů.
3. Vypracujte rešerši vybraných textilních senzorů.
4. Navrhněte demonstrátor textilního senzoru.
5. Porovnejte a kriticky zhodnoťte diskutované textilní senzory.


Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

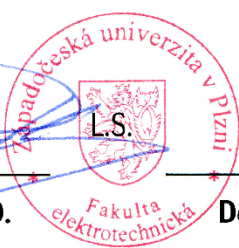
Seznam doporučené literatury:

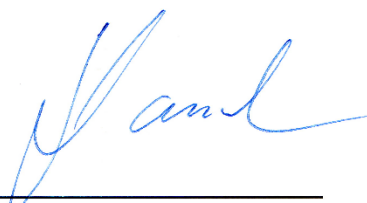
- Mattila, H., R., Intelligent Textiles and clothing, CRC Press, 2006. ISBN-13: 978-0849390999
- M. Catrysse, R. Puers, C. Hertleer, L. Van Langenhove, H. Van Egmond, D. Matthys, Towards the integration of textile sensors in a wireless monitoring suit, Sensors Actuators, A Phys. 114 (2004). doi:10.1016/j.sna.2003.10.071
- R. Schueller: Connector Design for Wearables, SMTA Proceedings, 2015
- Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Kalčík**  
Research and Innovation Centre for Electrical  
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**

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

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



V Plzni dne 8. října 2021

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na realizaci teplotního vyšívacího senzoru pro e-textilie. Hlavním cílem práce je návrh, výroba a testování teplotního senzoru. V rešeršní části je uvedeno rozdělení e-textilií a materiálů substrátů a propojovacích cest. Dále jsou popsány způsoby a druhy propojovacích cest na textilu. Jsou zde uvedeny druhy konvenčních a textilních senzorů pro měření teploty. Praktická část je zaměřena na návrh, vyšívání, kontaktování, testování a kalibraci realizovaných senzorů. V poslední části bakalářské práce je jsou diskutovány a kriticky zhodnoceny výsledky měření. Výsledné testy ukazují, že nejspolehlivější kontakty byly vytvořeny metodou odporového svařování. Sensory vykazují velmi dobré průběhy v závislosti na teplotě, které se přibližují komerčním senzorům. Vyšívací teplotní senzory by proto mohly být dalším krokem v rozvoji e-textilií.

## **Klíčová slova**

E-textilie, inteligentní textilie, senzory teploty, hybridní nit, vyšívání, kontaktování, kalibrace

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on the implementation of a temperature embroidered sensor for e-textiles. The main purpose of this work is the design, manufacture and testing of a temperature sensor. The research section shows the division of e-textiles and materials of substrates and connecting paths. Further, methods and types of connecting pathways for textiles are described. There are types of conventional and textile temperature sensors. The practical part is focused on the design, embroidery, contacting, testing and calibration of implemented sensors. In the last part of the bachelor thesis, the measurement results are discussed and critically evaluated. The results of tests show that the most reliable contacts were made by resistance welding. Embroidered sensors indicate very good temperature-dependent waveforms, which are close to commercial sensors. Embroidered temperature sensors could therefore be another step in the development of e-textiles.

## **Key Words**

E-textiles, intelligent textiles, temperature sensors, hybrid conductive thread, embroider, contacting, calibration

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kalčíkovi za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Stanislavovi Suchému, Ing. Davidovi Kalašovi a Ing. Martinovi Jandovi, kteří mi byli nápomocni v průběhu praktické části.

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 E-textilie .....	- 2 -
1.1 Rozdělení e-textilií .....	- 3 -
1.1.1 Pasivní e-textilie.....	- 3 -
1.1.2 Aktivní e-textilie .....	- 3 -
1.1.3 Ultra e-textilie .....	- 3 -
1.2 Materiály propojovacích cest .....	- 3 -
1.2.1 Kovová vlákna .....	- 3 -
1.2.2 Polymerní vlákna .....	- 4 -
1.2.3 Optická vlákna .....	- 4 -
1.2.4 Vodivé inkousty .....	- 5 -
1.2.5 Vlákna s uhlíkovými nanotrubicemi .....	- 6 -
1.3 Materiály substrátů.....	- 6 -
1.3.1 Základní rozdělení textilií .....	- 6 -
1.3.2 Materiály s tvarovou pamětí .....	- 7 -
1.3.3 Chromní materiály .....	- 8 -
1.3.4 Materiály s fázovou přeměnou.....	- 9 -
2 Technologie .....	- 10 -
2.1 Vodivá vlákna .....	- 10 -
2.1.1 Příze s kovovým jádrem.....	- 10 -
2.1.2 Ovrstvená vlákna .....	- 10 -
2.1.3 Hybridní nitě .....	- 10 -
2.2 Tištěné motivy.....	- 11 -
2.2.1 Sítotisk .....	- 11 -
2.2.2 Inkjet .....	- 12 -
2.3 Technologie implementace vodivých vláken .....	- 12 -
2.3.1 Tkaní .....	- 12 -
2.3.2 Pletení .....	- 13 -
2.3.3 Vyšívání .....	- 14 -

3	Senzory pro měření teploty.....	- 15 -
3.1	Konvenční .....	- 15 -
3.1.1	RTD – kovové odporové senzory .....	- 15 -
3.1.2	Termistory.....	- 17 -
3.1.3	Termočlánky .....	- 17 -
3.2	Textilní .....	- 17 -
3.3	Porovnání textilních a konvenčních senzorů.....	- 18 -
4	Praktická část.....	- 20 -
4.1	Návrh vzorků pro kontaktování.....	- 20 -
4.2	Vyšití.....	- 21 -
4.2.1	Nit 7A.....	- 22 -
4.2.2	Nit 74 .....	- 23 -
4.3	Kontaktování .....	- 23 -
4.3.1	Ultrazvukové svařování .....	- 23 -
4.3.2	Odporové svařování.....	- 24 -
4.3.3	Vodivá pasta.....	- 25 -
4.4	Kalibrace vyšitých teplotních senzorů .....	- 26 -
4.5	Výroba meandrů teplotních senzorů .....	- 28 -
5	Výsledky měření a porovnání senzorů .....	- 29 -
5.1	Test rychlého opakovaného nárůstu.....	- 29 -
5.2	Kalibrace vyšitých vzorků.....	- 30 -
5.3	Kalibrace vyšitých senzorů “Flower“ .....	- 31 -
5.4	Kalibrace vyšitých senzorů “Square“ .....	- 33 -
5.5	Teplotní koeficient odporu .....	- 34 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 36 -
	Literatura.....	- 37 -



## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>Ag</i>	Stříbro	
<i>Al</i>	Hliník	
<i>Au</i>	Zlato	
<i>Cu</i>	Měď	
<i>CNT</i>	Uhlíkové nanotrubičky	
<i>EKG</i>	Elektrokardiogram	
<i>EmbS</i>	Vyšivací senzor teploty	
<i>HCPF</i>	Hydrofobní vodivé vlákno s fázovou přeměnou	
<i>ICP</i>	Inherentně vodivé polymery	
<i>K<sub>RTD</sub></i>	Teplotní citlivost	[ $\Omega \cdot C^{-1}$ ]
<i>PANI</i>	Polyanilin	
<i>PCM</i>	Materiál s fázovou přeměnou	
<i>PET</i>	Polyethylentereftalát	
<i>PE</i>	Polyethylen	
<i>PEDOT</i>	Poly(3,4-ethylendioxythiofen)	
<i>PES</i>	Polyester	
<i>POF</i>	Polymerní optická vlákna	
<i>PPy</i>	Polypropyl	
<i>PT</i>	Polythiofen	
<i>PtS</i>	Odporový teplotní senzor	
<i>PTC</i>	Pozitivní teplotní součinitel	
<i>PT1000</i>	Platinový odporový teploměr s nominální hodnotou odporu 1 k $\Omega$ při 0 °C	
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid	
<i>Ni</i>	Nikl	
<i>NiTi</i>	Nitinol	
<i>NTC</i>	Záporný teplotní součinitel	
<i>MWCNT</i>	Vícestěnná uhlíková nanotrubička	
<i>R<sub>40</sub></i>	Elektrický odpor při teplotě 40 °C	[ $\Omega$ ]
<i>RTD</i>	Odporový snímač teploty	
<i>SC</i>	Seebeckův koeficient	[ $V \cdot K^{-1}$ ]

<i>SMA</i>	Materiál s tvarovou přeměnou	
<i>SWCNT</i>	Jednotěnná uhlíková nanotrubička	
<i>t</i>	Čas	[h]
<i>T</i>	Teplota	[°C]
<i>Ti</i>	Titan	
<i>TCR</i>	Teplotní koeficient elektrického odporu	[ppm·°C <sup>-1</sup> ]
<i>TPU</i>	Termoplastický polyuretan	
<i>U</i>	Elektrické napětí	[V]
<i>UV</i>	Ultrafialové záření	
<i>α</i>	Teplotní koeficient elektrického odporu	[ppm·°C <sup>-1</sup> ]
<i>λ</i>	Vlnová délka	[nm]

## Úvod

Oblast e-textilií je v současné době velmi žádané téma v oblasti techniky. Vlastnosti e-textilních senzorů jako flexibilita, nízká hmotnost a komfort poskytují inovativní řešení pro velký počet oblastí. Uplatnění nalezneme ve zdravotnictví, kde pomocí nich je možné snímat životní funkce pacientů. V oblasti sportu, kde e-textilie nabízejí zvýšené pohodlí oproti konvenčním řešením pro uživatele. E-textilní senzory získávají velký význam v ochranném vybavení, například v hasičských oblecích, kde díky jejich snímání je možné předcházet zraněním.

Práce je zaměřena na odporové vyšíváné teplotní senzory. Cílem práce je najít vhodné způsoby kontaktování mezi senzorickou hybridní odporovou nití a přívodní vodivou nití. Dále ověřit, zda vyšíváné senzory dokáží svými parametry konkurovat konvenčním odporovým senzorům.

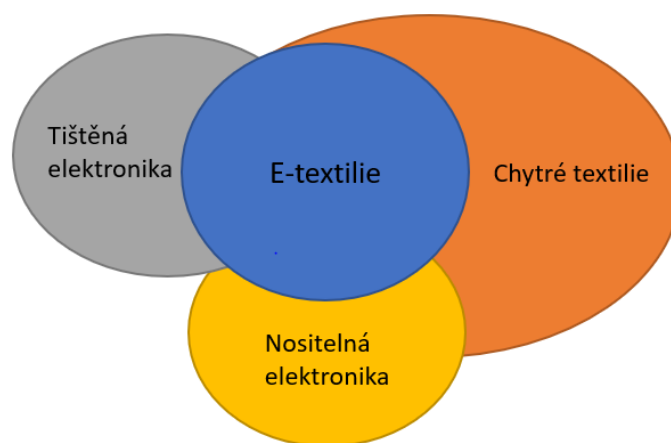
Tato práce je rozdělena do 5 částí. První kapitola se věnuje obecnému rozdělení e-textilií a popisu materiálů používaných v této oblasti. V další kapitole jsou představeny materiály vodivých cest a jejich možná implementace do textilu pomocí tkaní, vyšívání a pletení. Ve třetí kapitole jsou představeny konvenční druhy teplotních senzorů RTD, termistory, termočlánky a na ně navazují textilní řešení teplotních senzorů. Hlavní část se věnuje návrhu, vyšívání a způsobům kontaktování e-textilních teplotních senzorů. Poslední kapitola je věnována měření vzorků a kritickému zhodnocení naměřených dat.

## 1 E-textilie

E-textilie jsou látky, které díky implementovaným technologiím poskytují nositeli zvýšenou funkčnost. Jejich rozšířenou funkcí je schopnost vnímat a reagovat na mechanické, tepelné, magnetické, elektrické či chemické podněty [1]. Potenciál a možnost použití chytrých textilií je obrovský. Monitorování životních funkcí v lékařství, bezpečnostní systémy pro hasiče či vojáky, použití v oblasti sportu nebo stavebnictví.

Důležitou vlastností pro monitorovací aplikace v e-textilním průmyslu je odolnost vůči vnějším vlivům, která je pro textilie typická. Konvenční elektronika není vůči těmto vlivům přizpůsobena, proto je při vývoji e-textilií kladen důraz na odolnost použitých komponentů. Velkou výzvou pro tuto technologii je udržet technické vlastnosti pro různá zacházení s textilií. Mezi taková zacházení můžeme počítat mechanické namáhání při nošení či namáhání při opakovaném praní [2]. E-textilie obsahují 3 základní komponenty: senzor, akční člen a řídicí jednotku [1].

Oblasti e –textilií se pojí s dalšími oblastmi jako je nositelná elektronika, smart textilie či tištěná elektronika, znázorněno na Obr. 1.1. Nositelná elektronika představuje zařízení, ve kterých nemusí být nutně použity chytré textilie. Příkladem mohou být chytré hodinky či hrudníkové pásy pro měření teploty. Smart textilie se jemně odlišují od e-textilií. Smart textilie reagují na vnější podněty, ale nemusí nutně obsahovat elektronickou součást. Jako nedílnou součástí e-textilií je také tištěná elektronika [3].



Obr. 1.1 Klasifikace různého dělení e-textilií [2]

## 1.1 Rozdělení e-textilií

### 1.1.1 Pasivní e-textilie

Jedná se o první generaci e-textilií, která pouze snímá okolní prostředí a jeho změny. Podněty dokážou indikovat, nikoli na ně reagovat [4].

### 1.1.2 Aktivní e-textilie

Jedná se o druhou generaci, která nejenže snímá vnější prostředí, ale také na něj dokáže reagovat. Obsahují senzory a akční členy, pomocí kterých se uzavírá regulační smyčka [5]. Detekují různé podněty či veličiny z prostředí jako je teplota, intenzita světla, znečištění apod. a poté jednájí pomocí textilních aktuátorů [4].

### 1.1.3 Ultra e-textilie

Tato nejvyspělejší generace snímá vnější prostředí, dokáže na něj reagovat, ale také se dokáže přizpůsobit a přetvářet podle vnějšího prostředí. Tento typ můžeme připodobnit k chameleonovi, který dokáže přebírat barvy z okolí a reagovat na ně změnou vlastní barvy [5].

## 1.2 Materiály propojovacích cest

Umožňují přenos napájecích napětí, proudů a dat mezi komponentami elektronického systému. Mezi tyto komponenty patří senzory, řídicí a komunikační jednotky atd. Z komunikační jednotky jsou data dále přenášena ke zpracování, uživatelskému zobrazení či uložení. Např. jsou bezdrátově přenášena do PC.

Volba materiálu je často kompromisem jak z hlediska fyzikálních, chemických a funkčních vlastností. Oproti konvenční elektronice musí e-textilie odolat ohybu, vysokému tlaku a namáhání například při opakovaném praní v pračce.

### 1.2.1 Kovová vlákna

Kovové nitě se vyrábí z kovových vláken, která jsou velmi tenká. Řádově v desítkách mikrometrů. Vyrábí se tažením ve svazcích nebo odříznutím z tenkých plechů [1]. Do textilií jsou implementovány pomocí tkaní či pletení [1]. Mezi používané kovy patří měď, nerezová ocel, stříbro, titan, nikl a další materiály. V porovnání s dalšími textilními vodiči se kovová vlákna vyznačují vysokou měrnou vodivostí [6]. Z důvodu vysoké ceny, hmotnosti a tvrdosti použitých materiálů se tyto materiály využívají také k potažení jiných

podpůrných přízí. Nit tvořená kombinací kovového vlákna a konvenčního textilního vlákna se nazývá hybridní vodivá nit [8].

### 1.2.2 Polymerní vlákna

Běžné polymery jsou nevodivé organické látky, které se používají jako elektrické izolanty. Zástupcem této skupiny je například PE, PET, PVC.

Inherentní neboli vodivé polymery (ICPs) jsou skupinou vodivých polymerů, kde elektrickou vodivost měníme typem a množstvím přídavných činidel jako jsou například uhlíkové nanotrubičky [8]. Nejvýznamnějšími zástupci jsou polyanil (PANI), polypropyl (PPy), polytiofén (PT). Materiály se vyznačují vysokou odolností vůči kyslíku a lepší zpracovatelností oproti kovovým vláknům. Velkou výhodou je možnost měnit jejich vodivost přidáním dotovacích činidel [9]. Díky svým velmi dobrým elektrickým, fyzikálním a chemickým vlastnostem mají ICPs uplatnění v různých oblastech. Nalezneme je v chemických senzorech, kompozitních membránách a dobíjecích bateriích.

Polypropyl (PPy) považujeme za jeden z nejvhodnějších polymerů díky své vysoké elektrické vodivosti a dobré stabilitě v okolních podmínkách. Nicméně použití jako konjugovaného vodivého polymeru omezuje jeho křehkost, proto jeho vlastnosti zlepšujeme smícháním s dalšími polymery. Kompozity na bázi PPy dokáží poskytnout vláknům nebo tkaninám elektrické vlastnosti podobné kovům [9].

Jedním z nejvíce studovaných polymerů současnosti je poly(3,4-ethylendioxythiofen) (PEDOT) kvůli jeho stabilitě a laditelné elektrické vodivosti. V dopovaném stavu vykazuje vyšší vodivost než PPy, která může být dále zlepšena metodami dodatečné úpravy nebo mícháním. Navíc vysoce stabilní oxidovaný stav umožňuje držet krok s vodivostí po značnou dobu i při vysokých teplotách, a proto je vynikajícím materiálem pro elektrodu akčního členu.

Dosud bylo objeveno více než 25 vodivých polymerů. Díky jejich nízké ceně, flexibilitě a nízké hmotnosti se stávají převládajícími vodivými materiály v chytrých textiliích [10], [11].

Pro přípravu polymerních vláken se používá metoda zvlákňování. Nejčastěji se používá mokré či elektrostatické zvlákňování z polymerních roztoků [10].

### 1.2.3 Optická vlákna

Vlákna dělíme na dvě základní skupiny, a to na skleněná optická vlákna a polymerní optická vlákna (POF) [9].

Skleněná vlákna se vyznačují vysokou flexibilitou, ale také křehkostí. Z toho důvodu je jejich výroba složitější. Během mechanického namáhání či ohybu mohou na vláknech vzniknout nežádoucí mikrotrhliny ovlivňující funkci [9].

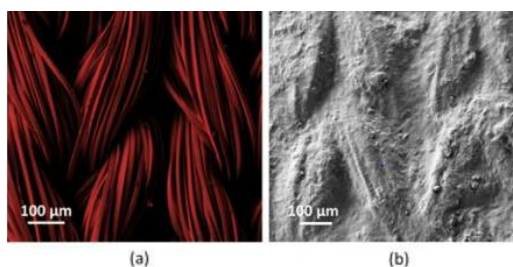
Polymerní optická vlákna disponují nízkou hmotností, flexibilitou, tenkostí a elektromagnetickou odolností. Nepřenášejí teplo a také nejsou náchylná na elektromagnetické výboje [11]. Uplatnění najdeme v celé řadě senzorů (srdečního tepu, dechové frekvence, natažení, teploty, tlaku, ohybu). Také díky vynikajícím optickým a tepelným vlastnostem ve světelné terapii [9]. Svě uplatnění nacházejí i ve světě módního průmyslu (viz Obr. 1.2) [13].



Obr. 1.2 Optické vlákno vetkané do textilu (převzato z [13])

#### 1.2.4 Vodivé inkousty

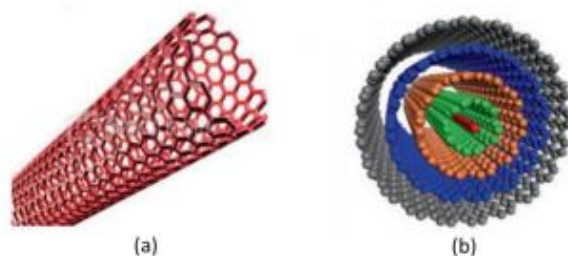
Tisk vodivých inkoustů je jeden z jednodušších způsobů výroby vodivých struktur na různé substráty. Inkoust je obohacen o vodivý materiál a aplikován sítotiskem nebo inkoustovým tiskem na textil [2]. Příklady vodivých inkoustů jsou pasty s uhlíkovými nanotrubicemi, pasty na bázi vodivých polymerů (PEDOT, polypyrol, polyanilin) nebo pasty s kovovými nanočásticemi (Cu, Al, Ag, Au). Pasty s nanočásticemi stříbra jsou hojně používané z důvodu jejich vysoké vodivosti ( $10^{-10}$ – $10^5$  S·cm<sup>-1</sup>) a nízké teplotě vytvrzování [2]. Měď je levnější alternativou, i když je méně stabilní a oxidace vede ke ztrátě vodivosti. Tisknuté motivy musí být chráněny dielektrickou vrstvou, aby se zabránilo oděru a dosáhlo stálosti po několika pracích cyklech, které u textilních materiálů vyžadujeme. Nejběžnější ochranným materiálem je polyuretanová vrstva, používaná díky své vysoké pružnosti a dobré přilnavosti [9], [14].



Obr. 1.3 a) polyesterová přize, b) polyesterová přize potažená inkoustem (převzato z [14])

### 1.2.5 Vlákna s uhlíkovými nanotrubicemi

Uhlíkové nanotrubičky (CNT) jsou válcové uhlíkové molekuly o průměru několika nanometrů a mají jedinečné tepelné, elektrické, mechanické, chemické a optické vlastnosti [15]. Uhlíkové nanotrubičky jsou vhodné pro použití v senzorech, z důvodu velké plochy snímání a chemické inertnosti. Existují dva základní typy CNT, a to jednovrstvé (SWCNT) a vícevrstvé (MWCNT), znázorněno na Obr. 1.4. Uhlíkové nanotrubičky jsou tvořeny vrstvou grafenu, který je uspořádán do válcovitého tvaru [16]. Díky přidání uhlíkových nanotrubiček, můžeme učinit tkaniny antibakteriální, vodotěsné či ohnivzdorné. Můžeme pomocí nich vytvářet tkaniny, které filtrují nečistoty, mění tvar, vedou elektrické signály a vykazují dobrou pevnost [17]. Příze z uhlíkových nanotrubiček se vyrábí nejčastěji metodou mokrého zvláknování vláken, kde roztok CNT o vysoké koncentraci rozpuštěný v kyselině je extrudován přes zvláknovací trysku nebo suchým spřádáním vláken CNT z vertikálně uspořádaného pole nanotrubiček [18].



Obr. 1.4 a) jednovrstvá CNT b) více vrstvá CNT (převzato z [16] )

## 1.3 Materiály substrátů

### 1.3.1 Základní rozdělení textilií

Textilie se dělí na tkané a netkané textilie. Tkané textilie mají různé struktury podle způsobu tkaní, např. plátované, keprové, atlasové či pleteniny [15]. Pleteniny jsou snadno deformovatelné, zatímco tkaniny jsou obvykle stabilní [16]. Poté co tkanina projde několika procesy, mezi které patří např. barvení, změkčování, antistatické úpravy může být používána jako senzor [6]. Tkaniny jsou hierarchicky strukturované vláknité materiály. První úroveň jsou vlákna, která se vyznačují vysokým poměrem délky k tloušťce. Vlákna se zkroutí a vytvoří přízi, která je považována za druhou úroveň tkaniny. Příze se pomocí techniky tkaní či pletení promění ve výslednou látku [21].

Netkané textilie jsou vyrobené z velkého počtu vláken nebo vláknitých pásů a jsou zpevněny různými technikami jako jsou lepení, mechanické blokování, jehlování, zapletení proudem tekutiny, tepelným lepením a lepením stehem [21].



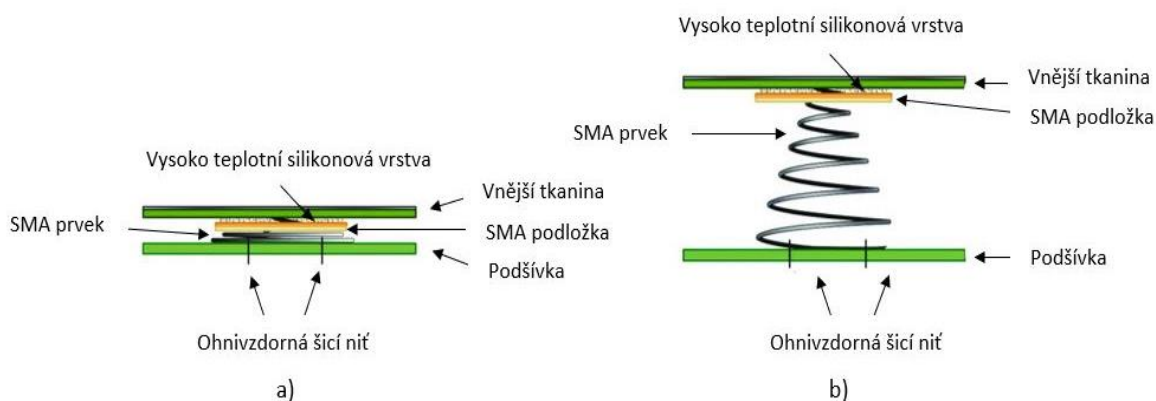
Konečné vlastnosti textilií jsou dány také kombinací přírodních (celulóзовých, kaučukových, bavlněných) nebo syntetických (nylonových, polyesterových, akrylových) vláken. U nich sledujeme např. lineární hustotu měřenou v denierech, míru síly potřebnou k přetrhnutí jednotlivého vlákna, popsanou z hlediska pevnosti (g/denier), pevnost v tahu (cN), procento prodloužení při přetržení a také pohodlí pro uživatele [10], [21].

### 1.3.2 Materiály s tvarovou pamětí

Materiály s tvarovou pamětí (SMA) jsou chytré materiály, které si dokáží zapamatovat a obnovit podstatnou “naprogramovanou“ deformaci po aktivaci a vystavení vnějším podnětům, jakými jsou teplota, světlo, působení chemikálií a vliv magnetického pole [7]. Slitiny s tvarovou pamětí jsou složeny z kombinace dvou nebo více prvků s vlastnostmi tvrdosti a pružnosti, které se při určitých teplotách značně liší [7], [22].

Nejpoužívanější kombinací slitin s tvarovou pamětí v textiliích je slitina niklu a titanu, která se používá v ochranných oděvech proti ohni a vysokým teplotám, a poskytuje různé úrovně ochrany podle teploty. Při stupni aktivace se snadno deformovatelná slitina stává tužší a získává svůj původní tvar. Stupeň aktivace lze upravit změnou poměru niklu a titanu ve slitině [21], [22].

Efekt tvarové paměti byl také využit ke zlepšení ochranných vlastností proti tepelným faktorům u hasičského oděvu. Bylo zkoumáno několik možností implementace toho materiálu, kde z výzkumů nejlépe dopadla implementace SMA pružin mezi vrstvy materiálu hasičského obleku z NiTi materiálu. Tato technologie dokáže zvýšit vzduchovou mezeru mezi vrstvami hasičského obleku z 0,5-2,0 mm při nízké teplotě a na 29,0-30,0 mm při teplotě vyšší než 60 °C, kdy dochází k aktivaci materiálu (viz Obr.1.5). Pružiny SMA mohou výrazně snížit přenos tepla do lidského těla a zlepšit tepelnou ochranu několikanásobně [22].



Obr. 1.5 Návrh chytrého textilního materiálu s prvky SMA a) neaktivní stav b) aktivní stav [22]

### 1.3.3 Chromní materiály

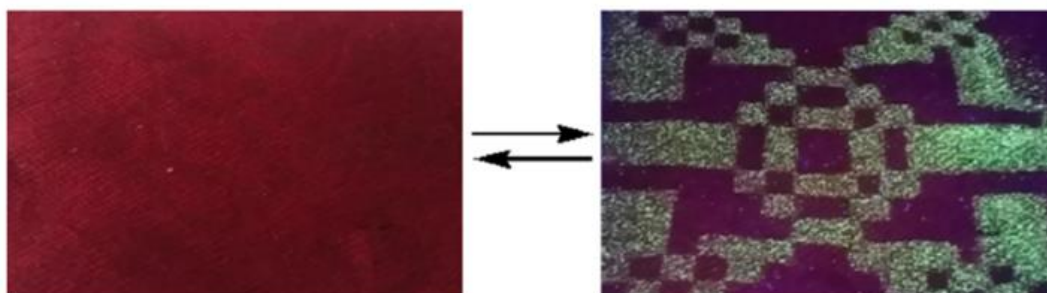
Chromní textilie, jinak známé jako chameleoní textilie jsou inteligentní textilní materiály, které mění svoji barvu podle působení vnějších podnětů z okolí.

Rozděluje je do několika základních skupin:

- Fotochromní – stimulem je světlo
- Termochromní – stimulem je teplo
- Elektrochromní – stimulem je elektřina
- Piezochromní – stimulem je tlak [23].

Fotochromní textilie mění barvu vratně v důsledku stimulace elektromagnetickým zářením [6]. Mezi nejznámější fotochromní materiály patří spiropyrany, spirooxaziny, naftopyrany, azobenzeny, osazony, semikarbazony [9]. Nejběžnějším procesem přípravy fotochromních látek je máčení ve vodní lázni. Celulózová vlákna se obvykle barví 1,5 hodiny při 100 °C, oproti tomu polyesterová vlákna se barví 1 hodinu při teplotě 120 °C [9]. Po promytí vláken vodou obsahující mýdlo a uhličitan sodný je látka připravena. Odbarvení na původní barvu probíhá 30-45 minut. Použití nalezneme v módě, v oblasti bezpečnosti či v UV senzorech [9].

Termochromní materiály mění vratně barvu se změnami v teplotě. Používají se dva typy termochromních systémů. Technologie tekutých krystalů, kdy se při určitých teplotách krystaly přeorientují a tím způsobí změnu barvy. Druhá používaná technologie je přeskupení molekulární struktury, kdy molekuly systému mění své uspořádání podle úrovně teploty a po ochlazení se vrací do původního uspořádání [5]. Pro tyto látky nalezneme velmi zajímavé použití v bezpečnostních hasičských oblecích. Změna barvy dokáže totiž nepřímo měnit schopnost materiálu pohlcovat teplo. Potažené hasičské uniformy termochromními materiály při vysokých teplotách zbledají a tím odrážejí teplo [7], [24].



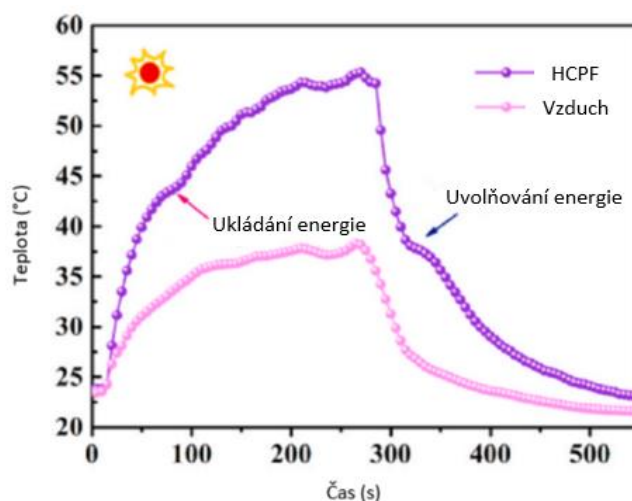
Obr. 1.6 Přeměna fotochromní látky pod UV zářením  $\lambda = 365$  nm (převzato z [24])

### 1.3.4 Materiály s fázovou přeměnou

Materiály s fázovou přeměnou (PCM) jsou latentně tepelně akumulční materiály. Používají chemické vazby k ukládání a uvolňování tepla (Obr. 1.7). K přenosu energie dochází při stavu změny fáze, kdy se materiál mění z pevné látky na kapalinu nebo z kapaliny na pevnou látku [10].

Mezi nejrozšířenější PCM v textiliích patří parafínové vosky, u kterých se teplota tání pohybuje kolem 38 °C [21]. Mikro kapsle s voskem o průměru 15 μm [6] mohou být implementovány do textilie během tažení vláken, přidány do struktury netkané textilie či nanesené na povrch.

Při dosažení teploty tání materiálu dochází k přechodu z pevného skupenství do kapalného, při kterém materiál se změnou fáze absorbuje a ukládá velké množství tepla. Teplota materiálu měnícího fázi zůstává prakticky konstantní během celé změny fáze [7], [26]. Při chlazení stejného materiálu se akumulované teplo přenáší do média a probíhá přechod z kapalného do pevného skupenství. Akumulované teplo používaných vosků se pohybuje v rozmezí od 60-235 J/g. V porovnání s ledem, který mění své skupenství na kapalné, absorbuje při této změně latentní teplo o hodnotě 335 J/g [7]. Možné aplikace nalezneme ve sportovních oděvech, v příkrývkách pro regulaci pacientů v nemocnicích, v automobilovém průmyslu či v ochranných oblecích do chladného i horkého prostředí [10].



Obr. 1.7 Teplotní křivka hydrofobního vodivá vlákna s fázovou změnou (HCPF) [26]

## 2 Technologie

### 2.1 Vodivá vlákna

Textilní senzory lze vyrobit zabudováním kovových vláken či přízí pomocí metod jako je vyšívaní či tkaní. Vodivá vlákna se mohou skládat z čistě kovové příze nebo z kompozitů kovů a nevodivých materiálů, které pomáhají zlepšit mechanické vlastnosti [22]. Dalším způsobem je zabudování vodivých polymerních vláken či přízí jako je polyanilin či polypropylen, které jsou oproti kovovým vláknům lehčí a měkčí [8].

#### 2.1.1 Příze s kovovým jádrem

Jedná se o příklad možného struktury vlákna. Kovový drát je jako jádro pokryté nevodivými vlákny. Textilní potahy mohou chránit jádro kovového drátu, pomáhají mu odolávat fyzickému namáhání a poskytují elektrickou izolaci [28].

#### 2.1.2 Ovrstvená vlákna

Alternativní způsob je potažení tkaniny vrstvou vodivých materiálů jako jsou kovy či vodivé polymery. Příze prochází 4 stupni potahování. Nejdříve se příze odvíjí z cívky, aby následně prošla nádrží s roztokem pro její potažení. Následně příze procházejí ohřívací komoru pro sušení a odstranění přebytečné vlhkosti. Nakonec je příze navinuta na speciálně navržené cívky [28].

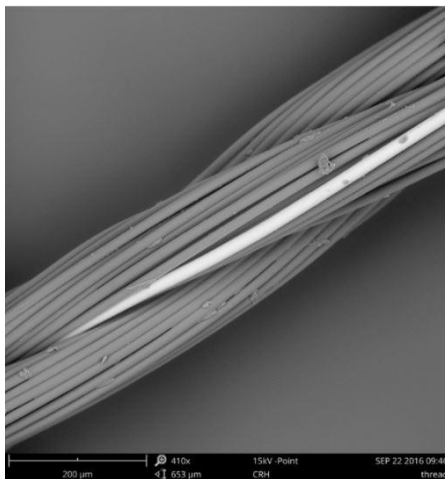
Příklad takového vlákna je francouzské vlákno Silver.STAT®, které bylo často použito při výzkumech na Západočeské univerzitě. Jedná se o polyamidové vlákno, které je ovrstveno čistým stříbrem, kde hodnota elektrického odporu je  $10^3 \Omega/\text{cm}$  [29].

Dalším využívaným způsobem je bezproudové pokovení tkaniny slitinou CuNi. Bezproudově pokovované tkaniny mají dobrou vodivost a flexibilitu. Díky elektrické vodivosti ve všech směrech na povrchu, je lze řezat do jakéhokoli tvaru a v jakémkoli směru [30].

#### 2.1.3 Hybridní nitě

Hybridní nit se obvykle skládá z několika kovových mikrodrátků (nerezová ocel, postříbřená měď, slitina mědi a niklu) v kombinaci se syntetickými multifilamenty (polyamid, polyester), které niti dodávají její mechanické parametry [31].

Příkladem je hybridní odporová nit, která byla vyvinuta ve VÚB ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni. Hybridní vlákno se skládá ze tří pramenů, z nichž každý obsahuje 33 polyesterových (PES) monofilů s průměrem 14,5  $\mu\text{m}$ . Jeden z pramenů obsahuje jeden mikrodrátek z austenitické chromniklové oceli o průměru 20  $\mu\text{m}$  (Obr. 2.1) [32].



Obr. 2.1 Struktura hybridní odporové nitě (převzato z [28])

## 2.2 Tištěné motivy

Dalšího způsobu vytvoření vodivé dráhy docílíme použitím technik jako je sítotisk či inkoustový tisk. Tisk na tkaniny má však některá úskalí, které je nutné překonat. V případě tisku na oblečení se často jedná o tkaninu složenou z polyesteru a bavlny. U tohoto složení substrátu, který má děrovost v řádech 10  $\mu\text{m}$ , je problémové dosáhnout souvislé a hladké vodivé cesty [9]. Z toho důvodu je v některých případech vyžadováno nanesení základní vrstvy pasty, aby se vyhladil povrch tkaniny a poté až tisk vodivých vrstev. Materiálem pro základní vrstvu může být UV vytvrditelná pasta na bázi polyuretanového akrylátu, kde tloušťka je 200  $\mu\text{m}$ . Dalším úskalím je vytvrzování inkoustu, neboť tkaniny odolávají pouze teplotám nižším než 150  $^{\circ}\text{C}$  oproti například polyamidu v případě flexibilní elektroniky, který odolá 400  $^{\circ}\text{C}$ . Proto je nutné vytvrzovat inkoust při nižších teplotách či použití například UV vytvrditelných inkoustů. Standardní doba vytvrzování se u polyester-bavlněné tkaniny při 150  $^{\circ}\text{C}$  trvá 45 minut [9].

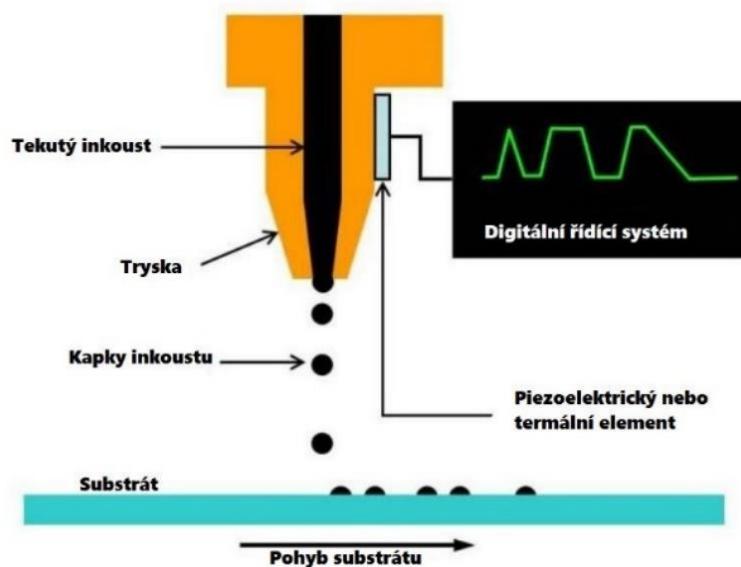
### 2.2.1 Sítotisk

Jedná se o tradiční metodu v oblasti elektrotechniky. Postup sítotisku zahrnuje protlačení viskózní pasty přes vzorované síto těrkou a po něm následuje proces sušení [33]. Sítotisk vytváří vrstvy ~ 25  $\mu\text{m}$  na jeden tiskový průchod, které lze vrstvit a tím vytvořit vrstvy o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ , které mohou překonat drsnost tkaniny [9]. Výhodou této metody je

vytváření flexibilních, lehkých a pohodlných vodivých cest. Nevýhodou je nízká mechanická odolnost, kdy může dojít k narušení vodivosti. Z toho důvodu se natištěné motivy pokrývají ochrannou vrstvou. Dále je nutná vyšší viskozita inkoustu, aby se nešířil po povrchu látky a vytvořil silnější vrstvu [9].

### 2.2.2 Inkjet

Inkjet je hojně využívaná metoda pro bezkontaktní depozici materiálu. Technologie pracuje na dvou základních principech, a to na drop-on-demand a continuous inkjet. Při principu drop-on-demand jsou jednotlivé kapky inkousty o průměru (5-150  $\mu\text{m}$ ) dávkovány na přesně daná místa z tiskové hlavy. Schématické znázornění Inkjet je zobrazeno na Obr. 2.2. Mezi nejvýznamnější techniky patří termální a piezoelektrický inkjet. Rozdílem oproti technologii sítotisku je použití méně viskózních inkoustů. U vysoce viskózních materiálů, jako jsou organická dielektrika, a rozptýlených částic, jako jsou anorganické kovové inkousty, dochází k potížím způsobeným ucpáním trysek [9], [34]–[36].



Obr. 2.2 Schéma technologie inkjet [35]

## 2.3 Technologie implementace vodivých vláken

### 2.3.1 Tkaní

Technologie tkaní je hojně využívaná technologie z důvodu své vysoké přesnosti a možnosti vytvářet velkoplošné povrchy. Principem je vzájemné provazování dvou sad přízí, které jsou na sebe kolmé. Jedná se o osnovu a útek. Výsledný provázaný systém se nazývá vazba tkaniny. Osnova je na tkalcovském stavu složena z velkého počtu paralelně uspořádaných přízí navinutých na osnovním válu. Druhá příze (útek) se do osnovy zanáší

jednotlivými prohozy v příčném řezu a prochází celou šířkou osnovy a nepřerušuje se [2], [37], [38].

Existují tři základní vazby tkaných textilií. Nejjednodušší a nejhustěji provázanou vazbou je plátňová vazba, kde se útková nit střídavě vede přes jednu osnovní přízi. Dalšími základními vazbami jsou vazby keprové a atlasové [13], [37].

Pro e-textilie jsou během tkaní vkládány vodivé osnovní příze a útkové příze. Používají se tenké vodivé příze nebo nevodivá polymerní vlákna, která jsou potažená vodivým povlakem. Tkané textilní materiály mohou být také vyrobeny do vícevrstvých struktur. Dvouvrstvá tkaná látka se skládá ze dvou vrstev osnovních přízí, oddělených jednou vrstvou útkových přízí. Tkané textilie se vyznačují svojí odolností a lepší tvarovou stálostí než pleteniny [9], [38], [39].

### 2.3.2 Pletení

Pletenina se skládá z řady po sobě jdoucích řad smyček, nazývaných očka viz Obr. 2.3. Pleteniny lze vyrábět na kruhových pletacích strojích nebo na plochých pletacích strojích. Kruhové pletací stroje nabízejí obvykle vysoké výrobní kapacity relativně jednoduchých struktur, většinou hladkých tkanin.

Základními typy pletení jsou útkové pletení a osnovní pletení. Při útkovém pletení se příze může pohybovat zleva doprava a zpět, aby vytvořila plochou tkaninu nebo po kruhové dráze, aby vytvořila válcovou tkaninu. Při osnovním pletení dochází k provázání sloupek na sloupek vytvářením smyček podél délky více paralelních přízí předem uspořádaných na nosníku.

Zvláštním typem pleteniny je fleecce. Jedná se o pleteninu, která je mechanicky upravena tak, aby vytvořila chlupatý povrch. V porovnání se základní tkaninou má fleecce lepší tepelně izolační vlastnosti díky většímu množství vzduchu zadržného ve vláknech fleecu [2].

Pleteniny jsou velmi elastické, dobře prodyšné a mají dobrou tepelnou retenci. Mezi výhody pletenin patří také vysoká flexibilita a deformovatelnost při vytváření trojrozměrných tvarů, které zajistí pohodlnost pro pokožku ve srovnání s tkanou strukturou. Díky tomu jsou vhodné pro oděvní průmysl, aby se přizpůsobily různým tvarům lidského těla.



Obr. 2.3 Schéma pleteniny (převzato z [37])

### 2.3.3 Vyšívání

Technologie vyšívání se využívá díky své možnosti vytvářet obvody v jakémkoliv tvaru. Vyšívání vyžaduje vodivé nitě, které mají vysokou pevnost a ohebnost v důsledku namáhání v ohybu a smyku [10], [40]. Vyšívání lze umístit v několika vrstvách. Díky tomu jsme schopni ze získaných dat sledovat tepelné namáhání v různých vrstvách a určit čas, kdy může dojít k přehřátí či popálení [41]. Toho využíváme v bezpečnostních oblecích, kde hrozí popálení člověka.

Vyšívání umožňuje tvorbu meandrů různých tvarů. U vytvořených meandrů sledujeme napětí nitě a tvorbu mikrotrhlin v oblastech s vysokým zakřivením [38]. K vyšívání používáme šicí stroje, kde některé umožňují vyšívat motivy předem určené grafickou předlohou [41].



### 3 Senzory pro měření teploty

Teplota lidského těla je jedním ze čtyř vitálních znaků, které jsou v lékařském prostředí standardní včetně srdeční frekvence, krevního tlaku a dechové frekvence. Informace o vitálních funkcích slouží k lékařskému posouzení zdravotního stavu a napomáhá diagnostikovat nemoci. Teplota lidského těla je ukazatelem fyzického stavu lidského těla. Týká se komfortu a výkonnosti lidského těla při zátěži teplem a chladem. Odchylna několika stupňů od normální tělesné teploty, tedy 37 °C, může způsobit zranění či dokonce smrt [43]. Dále vystavení lidského těla vysokým teplotám může způsobit vážné následky, jako onemocnění z horka či spáleniny lidské kůže. Onemocnění související s horkem nastává, když tělo ukládá více tepla, než může uvolnit, což je doprovázeno příznaky jako úpal, křeče z horka a vyčerpání z horka [44].

Tradiční konvenční teplotní senzory svými vlastnostmi neposkytují dostatečnou funkcionalitu pro velké množství použití. Jedním z problémů těchto senzorů je jejich špatné přilnutí k lidské pokožce při monitorování podmínek v uzavřených prostředích, jako například uvnitř oděvu či v protetických oblastech. Dalším problémem je jejich nepohodlí pro uživatele. Tyto problémy zapříčinily významný vývoj v oblasti flexibilních a nositelných teplotních senzorů. E-textilní teplotní senzory díky své stlačitelnosti, ohebnosti, biokompatibilitě a nízké hmotnosti jsou vhodným řešením [45].

E-textilní senzory mají široké pole působení. Ve zdravotnictví lze senzory použít ke zkoumání procesů hojení ran, hodnocení komfortu pacienta či sledování vývoje teploty během spánku. V dalších oborech pro monitoring teploty pracovníků v oblasti těžebního průmyslu, sledování fyziologických parametrů hasičů či v oblasti sportu [43]–[45].

#### 3.1 Konvenční

Senzory teploty lze rozdělit do 4 hlavních skupin: Kovové odporové senzory, polovodičové odporové senzory typu PTC a NTC a termočlánky.

##### 3.1.1 RTD – kovové odporové senzory

Principem RTD senzorů je teplotní závislost kovu na elektrickém odporu. Kov si můžeme představit jako soubor kladných iontů v krystalové mřížce. Se vzrůstající teplotou, kdy je jim dodávána energie ionty začínají více kmitat a v důsledku toho kladou čím dál větší odpor procházejícím elektronům a elektrický odpor vzrůstá [45], [46].

Pro teplotní citlivost materiálu je kritický parametr teplotní koeficient odporu TCR či  $\alpha$  [ $\text{ppm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ], který udává změnu elektrického odporu na stupeň Celsia a je dán vztahem

$$TCR \text{ (nebo } \alpha) = 10^6 \frac{R_2 - R_1}{(T_2 - T_1)R_1} \quad (1)$$

kde  $R_2$  je elektrický odpor při teplotě  $T_2$ ,  $R_1$  je elektrický odpor při teplotě  $T_1$ . Čím je TCR větší tím získáváme větší citlivost [32], [45].

Citlivost senzoru  $K_{RTD}$  [ $\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ] je dána vztahem

$$K_{RTD} = R_{40} \alpha \cdot 10^{-6} = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

Tab 3.1 Hodnota teplotního koeficientu pro vybrané materiály (převzato z [47])

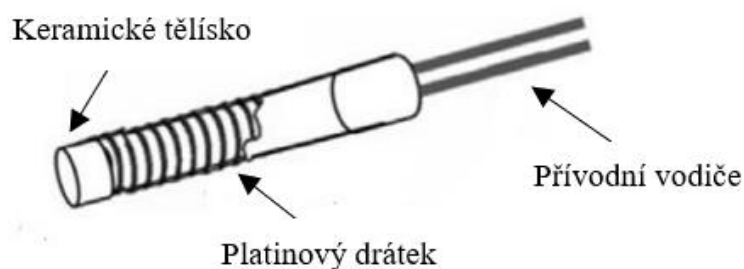
Látka	Platina	Nikl	Stříbro	Měď
TCR [ $\text{ppm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	3920	6000	4100	3900

Jedná se o nejčastěji využívaný typ senzoru z důvodu své vysoké přesnosti, linearitě a rychlé odezvě. Nejpoužívanějším materiálem je platina z důvodu své chemické netečnosti, časové stálosti a vysoké teplotě tání [46].

RTD jsou konstruovány ve dvou formách: vinutý drát (Obr. 3.1) a tenký film. Konvenční drátový RTD je tvořen stočeným platinovým drátkem o průměru od 0,007 mm do 0,05 mm, který je buď fixován do keramiky ve válcových kapilárách keramických tělísek nebo je bifilárně navinut na keramickém či skleněném tělísku [42], [45], [46].

Dalším způsobem, jak vyrobit senzor, je použití tenkovrstvých technologií, jako je napařování či napařování nebo za pomoci tisku na korundový substrát či na flexibilní substrát. Následně za pomoci textilních metod vložit do textilního substrátu [48].

Nejnovějším způsobem je využití textilních materiálů a pomoci textilních metod senzor vyrobit přímo na textilní substrát.



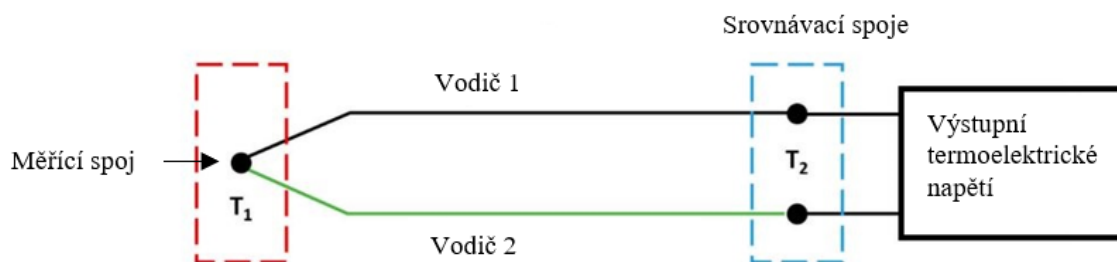
Obr. 3.1 Drátový odporový teplotní senzor [45]

### 3.1.2 Termistory

Termistor je teplotně závislý odpor, který je zhotovený z polovodivých materiálů. Může mít záporný teplotní součinitel (NTC) nebo kladný teplotní součinitel (PTC). V případě NTC termistoru dochází k poklesu odporu se zvyšující se teplotou, z důvodu vzniku tepelných elektronových párů. V případě typu PTC se zvyšující teplotou dochází ke strmému nárůstu odporu o několik řádů při dosažení Curieovy teploty. Výhodou termistoru oproti RTD je vyšší citlivost a vyšší nominální hodnota odporu. Nevýhodou je ale jeho nelinearita [45], [46].

### 3.1.3 Termočlánky

Termočlánek se skládá ze dvou různých kovů, které jsou na jednom konci spojené (teplý konec) a na druhém konci oddělené (studený konec), znázorněno na Obr. 3.2. Princip je založen na termoelektrickém jevu, který je znám také jako Seebeckův jev. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii, a proto difundují ve velkém množství do chladnějších míst. Z toho důvodu na každém konci vzniká různý elektrický potenciál. Jedná se o aktivní senzor, který je možné využít jako zdroj elektrické energie. Nevýhodou je nutnost zajištění studeného konce. Mezi nejpoužívanější termočlánky patří typ E, typ J a typ K. Typ K je složen z chrom-alumelu a umožňuje měřit teploty v rozsahu od  $-180$  do  $+1350$  °C s citlivostí  $42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  [45], [46], [44].



Obr. 3.2 Schéma termočlánku [44]

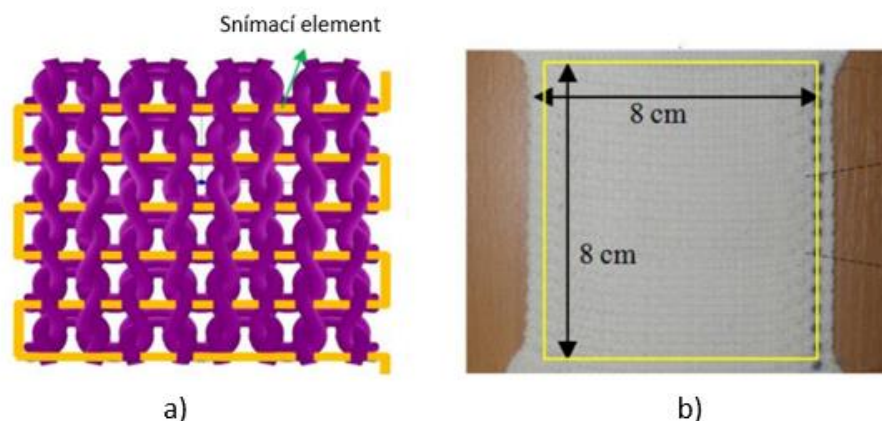
## 3.2 Textilní

Textilní teplotní senzory používají stejně jako konvenční 3 základní technologie a to RTD, termistory a termočlánky. Liší se především v konstrukci a použitých materiálech. V dnešní době zatím ještě nenajdeme na trhu komerční řešení těchto senzorů realizovaných pomocí vyšívacích hybridních nití.

Důvodem velkého výzkumu textilních senzorů jsou jejich vlastnosti, které jsou požadovány v e-textiliích. Díky kombinaci různých konstrukcí a materiálů nabízejí velmi dobrou mechanickou odolnost, biokompatibilitu, multifunkčnost, pohodlí a jednodušší implementaci do textilu v porovnání s konvenčními senzory.

Francouzští vědci ve článku „Temperature sensor realized by inkjet printing process on flexible substrate“ realizovali flexibilní tištěný teplotní senzor. Jednalo se o RTD senzor ze stříbra, nanesený pomocí metody inkoustového tisku drop-on-demand na kaptonovém substrátu. Plocha senzoru činila  $6,2 \text{ cm}^2$  a šířka stříbrných čar  $300 \mu\text{m}$ . Citlivost tištěného teplotního senzoru měřená v rozmezí od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  byla  $4,46 \Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  s nominálním odporem  $2,032 \text{ k}\Omega$  při  $38,5 \text{ }^\circ\text{C}$  [49].

Teplotním senzorem implementovaným v textilní pletenině se zabývali vědci Husain Kennon v článku „Preliminary Investigations into the Development of Textile Based Temperature Sensor for Healthcare Applications.“ Vyvinuli snímací pleteninu pro snímání teploty, která byla vyrobena v průmyslovém měřítku na plochém pletacím stroji pokládáním snímacího jemného kovového drátu do dvouvrstvé pletené struktury (Obr. 3.3). Snímací plocha byla  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ . Pro kovový drát z wolframu při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  byla naměřena hodnota nominálního odporu  $121,81 \Omega$  a citlivost  $435 \text{ m}\Omega \cdot ^\circ\text{C}$  [43].



Obr. 3.3 a) koncept struktury b) výsledný vzorek snímací struktury  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$  [43]

### 3.3 Porovnání textilních a konvenčních senzorů

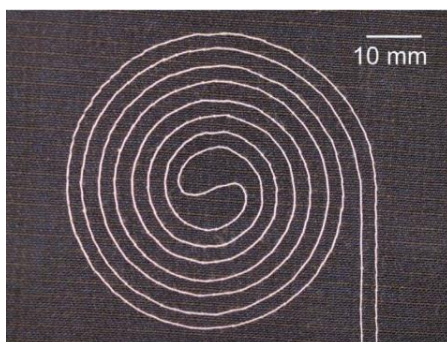
Testováním a porovnáním textilních a konvenčních senzorů se zabývali vědci ze Západočeské univerzity v Plzni ve člancích „A novel large-area embroidered temperature sensor based on an innovative hybrid resistive thread“ a „Large Area Temperature Measurement in Smart Textiles.“

Textilní senzor byl vyšit jako bifilární spirálovitý meandr z hybridního odporového vlákna viz Obr. 3.4. Senzor vykazoval při teplotě 40 °C lineární odpor 2373  $\Omega$ , teplotní koeficient odporu 1044 ppm $\cdot$ °C<sup>-1</sup> a teplotní citlivost 2,5  $\Omega$  $\cdot$ °C. Jako konvenční senzor byl zvolen Pt1000. Jedná se o jeden z typů platinových senzorů, které se staly v dnešní době nejpoužívanějšími a komercializovanými sondami pro detekci teploty. Pt1000 vykazuje hodnotu teplotního koeficientu 3920 ppm $\cdot$ °C<sup>-1</sup> [42], [50].

Výsledek zkoušky dlouhodobé stability ukázal, že vyšívání senzorů mohou odolat zvýšené teplotě bez kolísání odezvy senzoru stejně jako konvenční senzor.

Výsledky zkoušky teplotního šoku však ukázaly velkou výhodu vyšívání senzoru. Textilní senzor dosahuje až 4x rychlejší reakce na rychlou změnu teploty oproti konvenčnímu senzoru. Citlivost konvenčního senzoru se snižuje použitím mechanické ochrany, bez které však senzor nelze implementovat pro praktické aplikace smart textilií [42], [50].

Díky výsledkům těchto studií můžeme konstatovat, že vyšívání teplotní senzory svými vlastnostmi jsou srovnatelné či dokonce z hlediska dynamických měření lepší než konvenční senzory. Další výhodou vyšívání senzorů je jejich schopnost měřit na větší ploše a bez nutnosti zapouzdření či jiné mechanické ochrany. Jejich snadná integrace, flexibilita a pohodlnost patří mezi jejich další výhody.



Obr. 3.4 Bifilárně spirálovitý meandr vyšívání teplotního senzoru (převzato z [42])

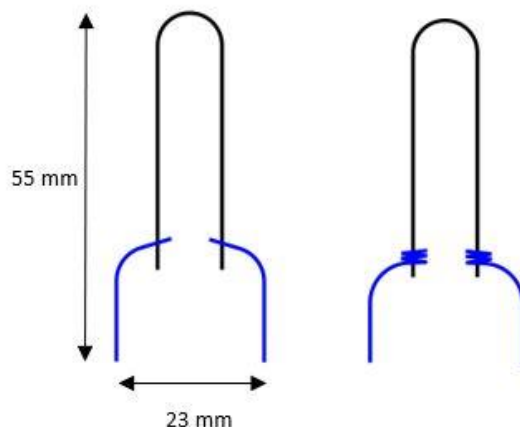
## 4 Praktická část

Po předchozích kapitolách rešeršní části bylo rozhodnuto o zaměření praktické části na realizaci teplotního vyšívacího senzoru. Praktická část se skládá z návrhu demonstrátoru, výroby a měření senzoru.

### 4.1 Návrh vzorků pro kontaktování

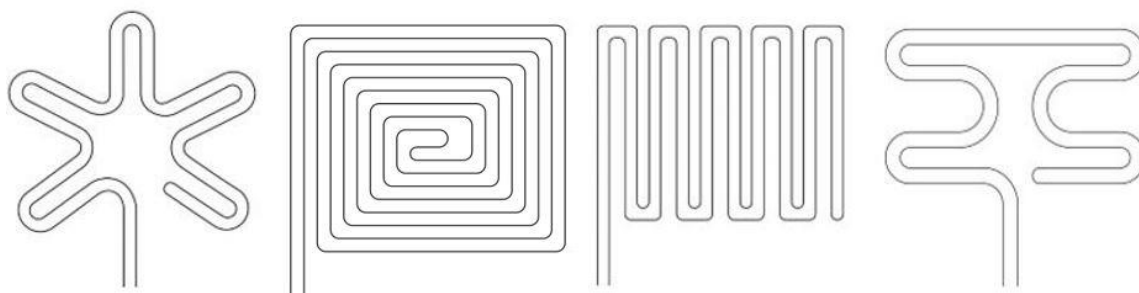
Při návrhu bylo nutné zohlednit požadavek na bezporuchové vyšívání nitě bez jejího poškození. Z toho důvodu se u veškerých návrhů vyskytují zaoblené rohy namísto kolmých. Díky této úpravě lze dosáhnout menšího namáhání nití při jejich vyšívání, nižšího napětí nití v rozích a minimalizovat možné poškození mechanickým namáháním. Nevýhodou však může být nižší rychlost vyšívání.

Pro návrhy byl použit program vektorové grafiky Inkscape. Prvním krokem v návrhu bylo vytvoření dvou typů vzorků s různým překřížením z důvodu otestování spolehlivého kontaktování pro následné měření senzorů. U prvního vzorku bylo navrženo pouze jednobodové překřížení a u druhého bylo navrženo pětibodové překřížení. Oba vzorky byly navrženy s rozměry 55 x 23 mm viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Navržené struktury

Následně byly navrženy 4 různé typy meandrů pro vytvoření teplotního senzoru viz Obr. 4.2. Každý z meandrů zaujímal plochu 49 cm<sup>2</sup>. Rozteč mezi nitěmi byla 3 mm.



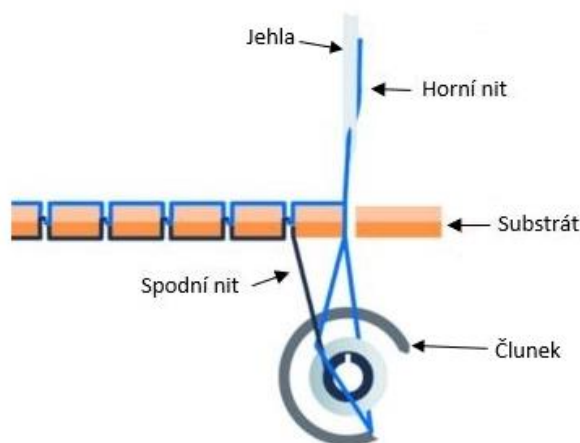
Obr. 4.2 Schéma navrhnutých meandrů

## 4.2 Vyšití

Vyšití senzorů probíhalo na poloprofesionálním vyšívacím a šicím stroji Bernina B 750, který umožňuje vyšití elektronicky navržených tvarů.

Jako substrát byla použita tkaná 100% bavlna s keprovou vazbou. Hmotnost látky je 180 g/m<sup>2</sup>.

Z důvodu požadavku na bezporuchové vyšití bylo nutné zvolit umístění nití. Vodivá nit byla umístěna do člunku vyšívacího stroje na pozici spodní nitě. Důvodem bylo snížení jejího namáhání při vyšívání. Spodní nit při vyšívání neprochází skrz substrát a díky tomu je méně mechanicky namáhána. V důsledku toho se sníží riziko porušení vnitřních vodivých mikrodrátků. Jako horní nit byla použita polyesterová nevodivá nit, která byla navinuta na cívce a vedena napínacím systémem k vyšívací jehle. Jednotlivé stehy vznikají protlačením jehly s horní nití substrátem, navázáním horní nitě kolem spodní nitě a následným vytažením jehly do původní polohy. V průběhu vyšívání dochází ke vtáhnutí spodní nitě do substrátu. Z toho důvodu bylo upraveno napnutí nití, aby se omezilo vtahování sensorové nitě do substrátu a tím minimalizovalo možné poškození. Vzdálenost mezi jednotlivými stehy byla zvolena 4 mm.

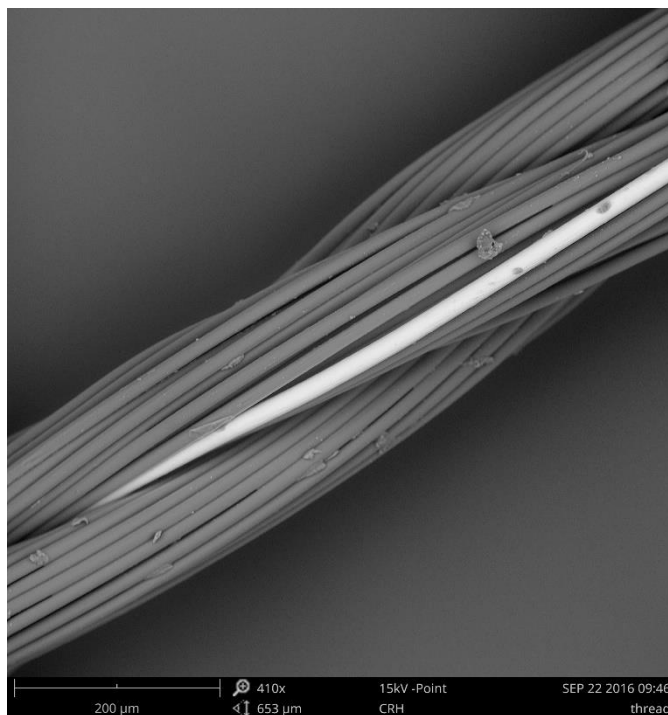


Obr. 4.3 Princip vyšívacího stroje [40]

K účelu vyšití byly vybrány odlišné nitě typu 7A a 74.

#### 4.2.1 Nit 7A

Jedná se o hybridní odporové vlákno, pomocí něhož je možné integrovat elektronické součástky do textilií. Vlákno je chráněno českým užitným vzorem CZ 28603 U1. Vlákno se skládá ze 3 pramenů. Každý pramen obsahuje 33 polyesterových vláken (PES). Součástí jednoho z pramenů je odporový mikrodrátek z nerezové austenitické chromniklové oceli 1.4301 (AISI 304). Struktura hybridního vlákna je zobrazena na Obr. 4.4, kde světlejší vlákno je odporový mikrodrátek o průměru 20  $\mu\text{m}$  a zbylá tmavá vlákna jsou vyrobena z PES spojitých monofilů se středním průměrem 14  $\mu\text{m}$ . Odporový mikrodrátek má lineární elektrický odpor 2323  $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ , pevnost v tahu 950  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , 30% schopnost prodloužení a odolnost vůči vodě, páře a nízkým koncentracím organických a anorganických kyselin. Povrch hybridní odporové nitě je pokryt silikonovým lubrikantem, který zajišťuje ochranu nitě při vyšívání, kdy dochází ke vzniku třecího tepla, které by mohlo nit poškodit. Vlákno bylo vyvinuto a testováno Západočeskou univerzitou v Plzni ve spolupráci se společností VÚB a. s. [42].



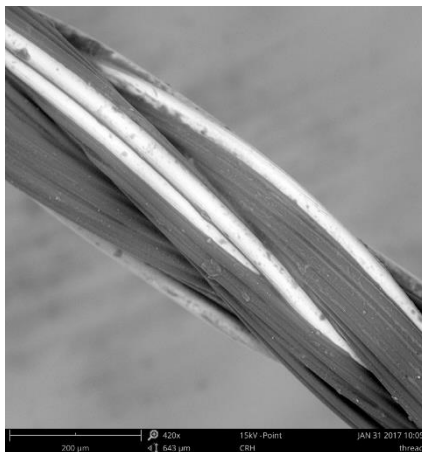
Obr. 4.4 Struktura nitě 7A (převzato z [42])



### 4.2.2 Nit 74

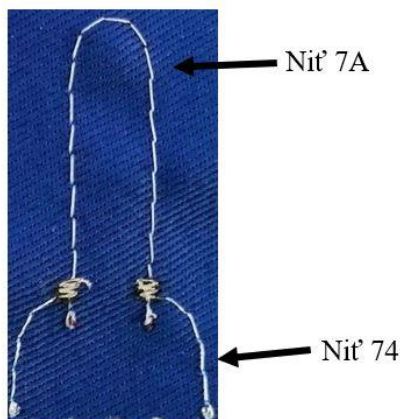
Jedná se o hybridní vodivou nit. Nit se skládá z desítek PES multifilamentních vláken o průměru 14  $\mu\text{m}$  a z osmi postříbřených měděných mikrodrátků o průměru 30  $\mu\text{m}$ . Jemnost nitě je 777 dtex a elektrický odpor  $2,85 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ . Struktura je znázorněna na Obr. 4.5 [51].

Vodivá nit 74 byla zvolena z důvodu zajištění spolehlivého kontaktu mezi oběma nitěmi.



Obr. 4.5 Struktura nitě 74

U obou typů vzorků tvořila nit 7A horní část vzorku a nit 74 spodní přívody viz Obr. 4.6. V případě zvolení pouze nitě 7A, která obsahuje pouze jeden nerezový mikrodrátek, by s velkou pravděpodobností nemuselo dojít ke kontaktu.



Obr. 4.6 Vyšitý vzorek

## 4.3 Kontaktování

Pro vytvoření spolehlivého kontaktu byly zkoumány tři různé způsoby kontaktování.

### 4.3.1 Ultrazvukové svařování

Ultrazvukové svařování je rychlý a energeticky nenáročný způsob kontaktování. Princip spočívá ve využití ultrazvukové energie o vysokých frekvencích (20-40 kHz) k vytvoření mechanických vibrací s nízkou amplitudou (1-25  $\mu\text{m}$ ). Svařované díly se pokládají na

kovadlinu. Mechanické kmity jsou přenášeny pomocí sonotrody do místa spoje. Vibrace vytvářejí teplo na rozhraní spojovaných materiálů a v důsledku toho dojde k roztavení termoplastických materiálů a tvorbě svaru po ochlazení. Jedná se o nejrychleji známou svařecí techniku s dobou svařování obvykle mezi 0,1 – 1 sekundy [52]. Při ultrazvukovém svařování je důležité správně nastavit parametry, mezi které patří:

- Přítlačná síla působící na spoj – zabezpečuje přenos kmitů ze sonotrody na svařované materiály
- Amplituda kmitů – se zvětšující se amplitudou výchylky svařovacího hrotu roste pevnost spojů
- Frekvence kmitů – je dána použitým zařízením, při vyšší frekvenci se svařovací hlava intenzivněji zahřívá a amplituda kmitů je úměrně menší
- Čas svařování [53].

Po několika testovacích vzorcích byly zvoleny parametry přítlačné síly na hodnotu 100 N, amplitudy kmitů na 15  $\mu\text{m}$ , energie na 30 J a čas svařování 0,6 s. Frekvence svařování byla 35 kHz. Pro vyšší spolehlivost kontaktu byla na vrchní stranu přidána netkaná měděná látka, která zajistila vyšší pravděpodobnost vzniku kontaktu mezi mikrodrátky. Z vrchní i spodní strany kontaktu byly přidány čtverečky TPU (Termoplastický polyuretan) fólie, které zajišťovaly ochranu kontaktu.

#### 4.3.2 Odporové svařování

Princip odporového svařování spočívá v přítlačení a následném průchodu elektrického proudu skrz svařovaný materiál. Při průchodu proudu vzniká na rozhraní elektrod vysoký elektrický přechodový odpor. Kontaktní plochy se zahřívají, dojde k natavení svařovaných částí a za působení tlaku dojde k vytvoření svaru. Základním parametrem odporového svařování je:

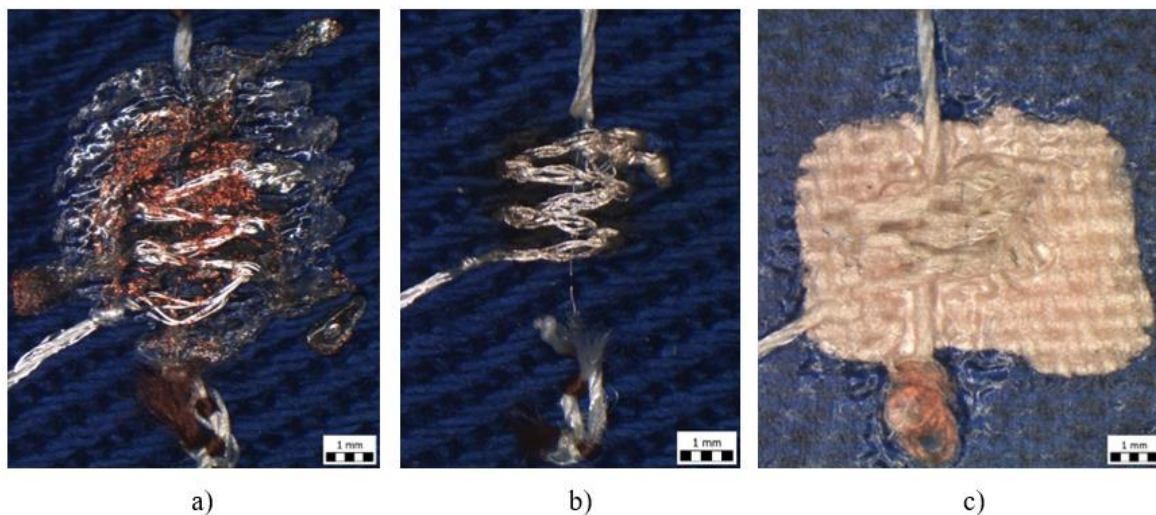
- Svařovací napětí – vyšší svařovací napětí znamená vyšší svařovací proudy a tím i větší tvorbu tepla
- Doba svařování
- Přítlačná síla – vyšší přítlačná síla znamená nižší kontaktní odpory, což za normálních podmínek snižuje množství generovaného tepla [54].

Pro odporového svařování byly zvoleny parametry s hodnotami napětí na 1,6 V, dobou svařování na hodnotu 300 ms a zatížení 1 kg.

### 4.3.3 Vodivá pasta

Pro vytvoření třetího způsobu kontaktu byl použit vodivý stříbrný inkoust a TPU fólie od společnosti DuPont značky Intexar. Technologie Intexar se skládá z roztažitelných elektronických inkoustů, fólií a enkapsulantů, připravených k zabudování do oděvů za účelem k vytvoření tenkých a tvarově padnoucích elektrických obvodů. DuPont představil komerčně dostupné chytré oblečení, které umožňuje monitorování životních funkcí, jako jsou například srdeční frekvence, frekvence dýchání a EKG [55].

Nejprve se na bavlněný substrát nalaminovala fólie DuPont™ Intexar™ TE-11C. Jedná se o roztažitelný dvouvrstvý termoplastický polyuretanový film, který zabraňuje průsaku inkoustu skrz substrát. Následně na fólii byly vyšity textilní vzorky. Pro vytvoření kontaktu byla použita stříbrná vodivá pasta DuPont™ Intexar™ PE874. Pasta se vyznačuje vysokou roztažností, přilnavostí, vodivostí s hodnotou odporu  $50 \text{ m}\Omega/25\mu\text{m}$  [55]. Obr. 4.7 zobrazuje snímky kontaktů z mikroskopu.

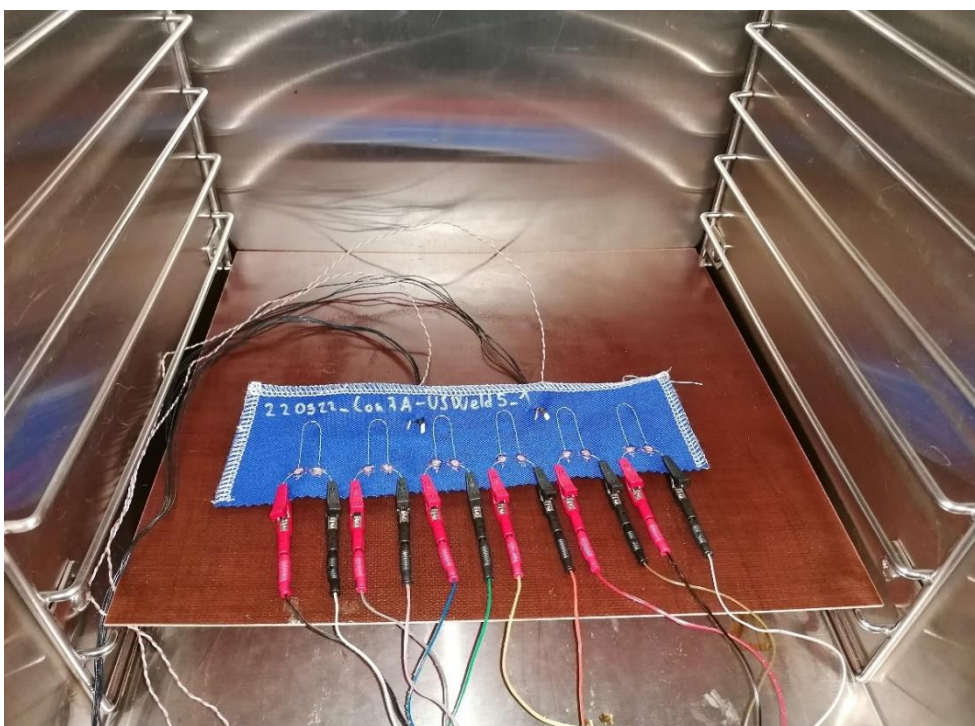


Obr. 4.7 Detail kontaktů dle metody: a) ultrazvukové svařování b) odporové svařování c) vodivá pasta

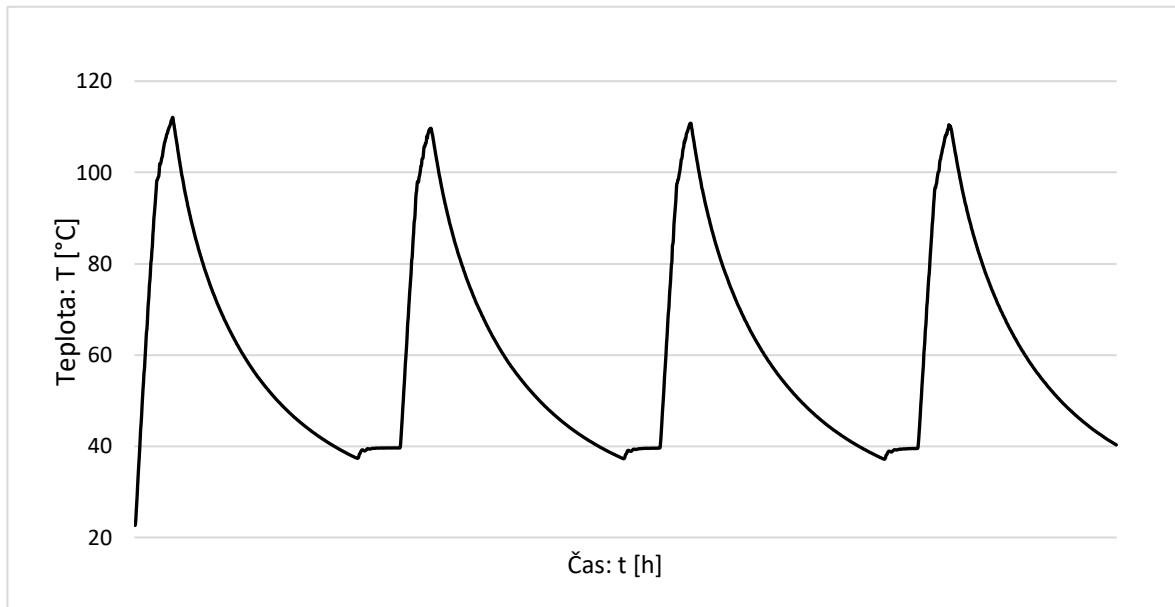
#### 4.4 Kalibrace vyšitých teplotních senzorů

Kalibraci vyšitých senzorů bylo nutné provést z důvodu korekce odchylek odporů jednotlivých senzorů, které vznikly při vyšívání či kontaktování. Odchytky jednotlivých senzorů se pohybovaly v řádech desítek ohmů. Cílem kalibrace bylo určit vztah mezi elektrickým odporem vyšívaných senzorů a teplotou. Ke kalibraci textilních senzorů byly použity komerční odporové senzory Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná a konvenční termočlánky typu T. Kalibrace senzorů probíhala v peci SalvisLAB thermocenter TC40 v rozsahu teplot od 40 °C do 120°C. Nejprve senzory byly testovány v režimu rychlého opakovaného nárůstu (Obr. 4.9) a následného poklesu teploty (Obr. 4.10). Vzorky, které vykazovaly dobré výsledky byly následně podrobeny režimu schodovitého nárůstu, kdy docházelo k navýšení teploty po 10 °C. Po každém nárůstu došlo k ustálení teploty. V průběhu zvyšování teploty byl ventilátor pece spuštěn na 60 % výkonu a během chlazení na 100 % svého výkonu. Pro zaznamenání hodnot byl použit multimetr Keithley 2700, který byl rozšířen o měřicí karty. Pro kontaktování vyšívaných senzorů byly použity kabely zakončené piny. Pro měření byla použita čtyřbodová metoda. Zapojení a uspořádání senzorů je zobrazeno na Obr. 4.8.

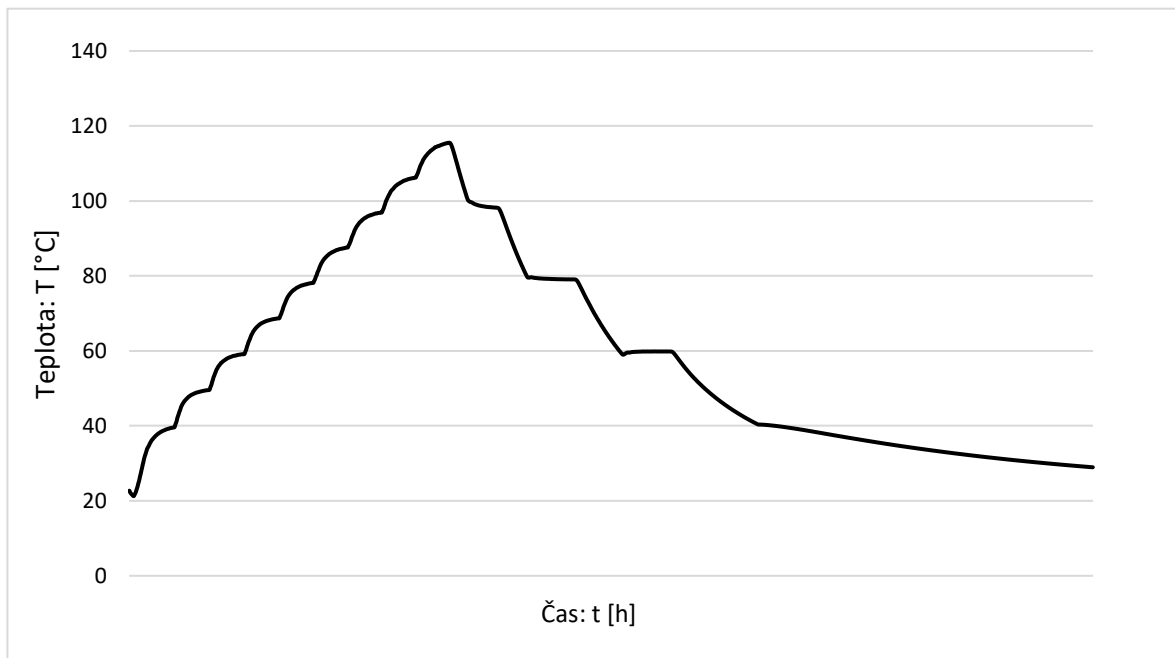
Kalibrace bylo provedena u všech vyrobených senzorů. Cílem kalibrace bylo zjistit, který ze způsobů kontaktování (viz kapitola 4.3) vykazuje nejmenší chybovost.



Obr 4.8 Zapojení senzorů uvnitř pece



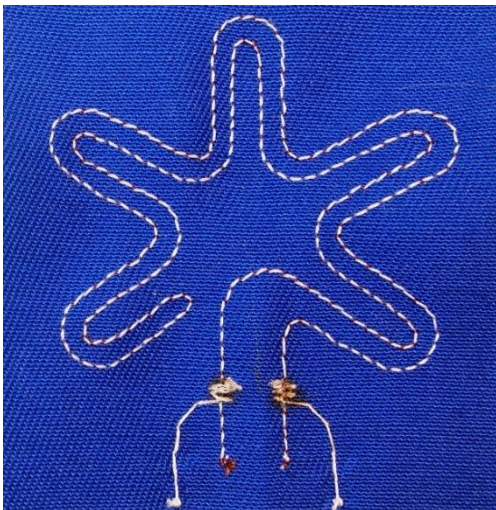
Obr. 4.9 Teplotní profil kalibračního testu rychlého opakovaného nárůstu



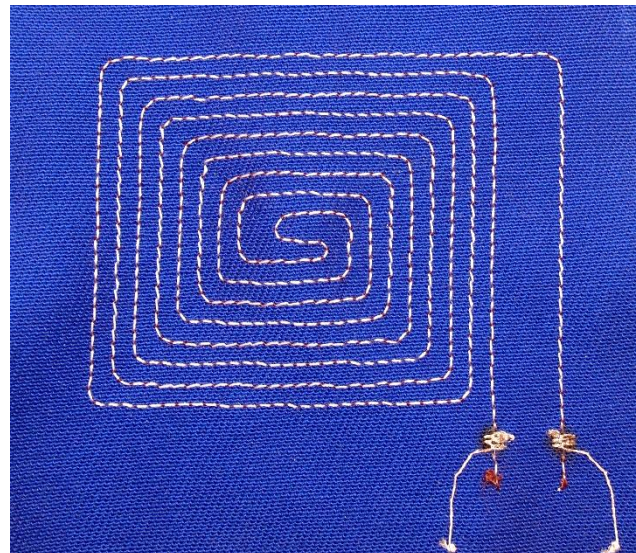
Obr. 4.10 Teplotní profil kalibračního testu schodovitého nárůstu

#### 4.5 Výroba meandrů teplotních senzorů

Na základě výsledků měření na vzorcích byly vybrány metody, které byly použity při výrobě celých meandrů teplotních senzorů. Pro zhotovení byly vybrány dva typy meandrů. První s pracovním pojmenováním “Square“ z důvodu čtvercového tvaru a druhý s pracovním pojmenováním “Flower“ z důvodu tvaru květiny. Oba typy meandrů byly vyšity se vzdáleností mezi jednotlivými stehy 2 mm. Meандр “Flower“ disponoval délkou teplotního prvku 51 cm a snímací plochou o velikosti 353 cm<sup>2</sup>. Meандр “Square“ disponoval délkou teplotního prvku 118,25 cm a snímací plochou o velikosti 449 cm<sup>2</sup>. V průběhu vyšívání meandru “Square“ došlo k úpravě napnutí nití. Vyšité senzorové meandry ukazují obrázky Obr. 4.11 a Obr. 4.12.



Obr. 4.11 Vyšitý meандр “Flower“

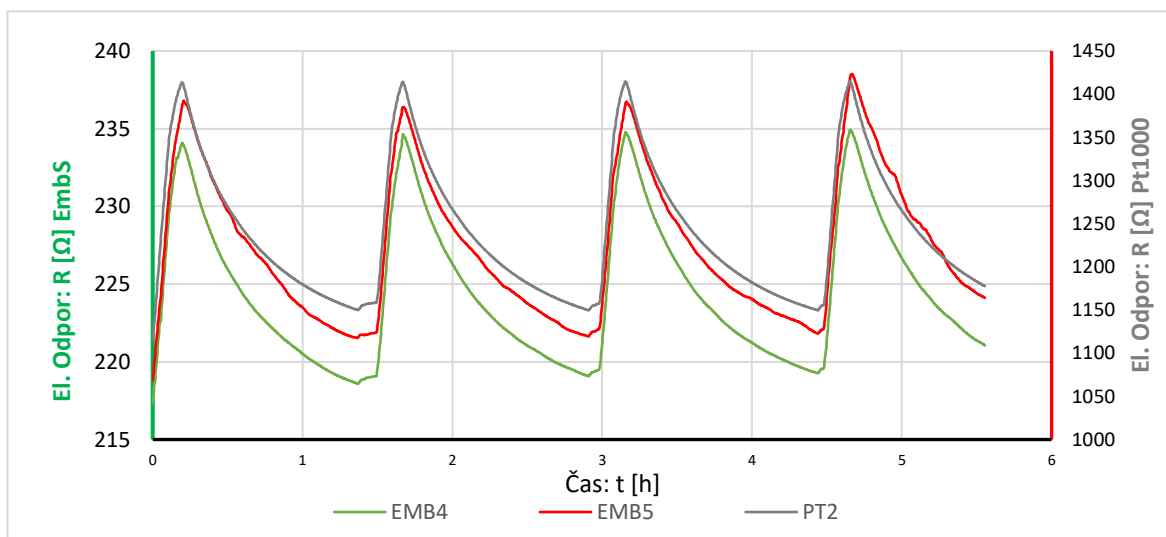


Obr. 4.12 Vyšitý meандр “Square“

## 5 Výsledky měření a porovnání senzorů

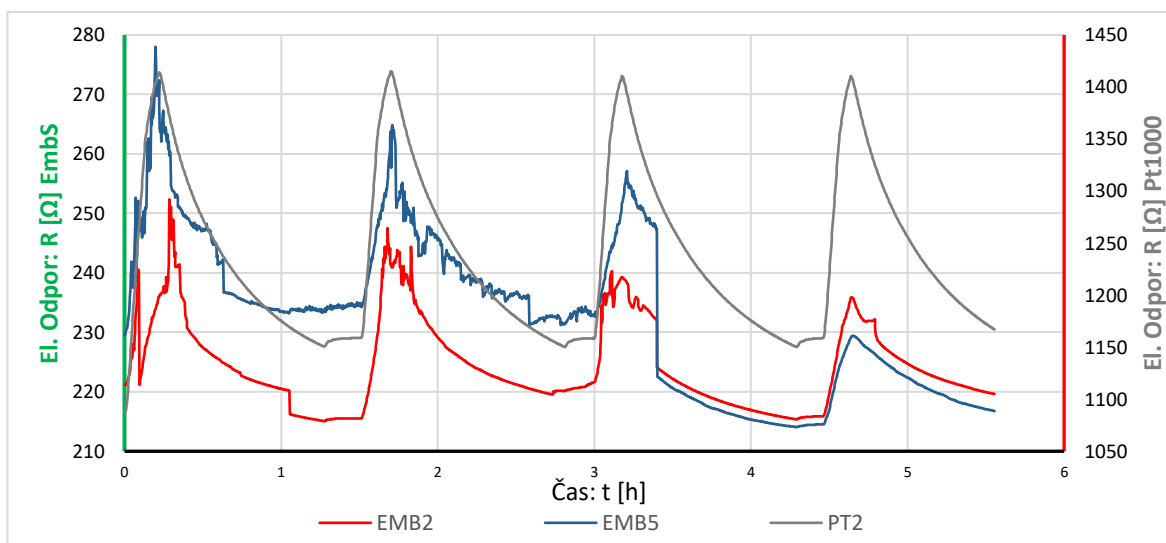
### 5.1 Test rychlého opakovaného nárůstu

Veškeré vyšité vzorky byly nejprve otestovány testem rychlého opakovaného nárůstu. Vzorky, které vykazovaly přijatelné průběhy byly dále testovány metodou schodovitěho nárůstu.



Obr. 5.1 Graf závislosti odporu na čase při testu opakovaného nárůstu

Obr. 5.1 ukazuje závislost odporu na čase vyšitých vzorků, které byly kontaktovány metodou odporového svařování. Tyto vzorky vykazovaly výborné chování během testu, kdy jejich průběh odpovídal komerčním teplotním senzorům Pt1000.



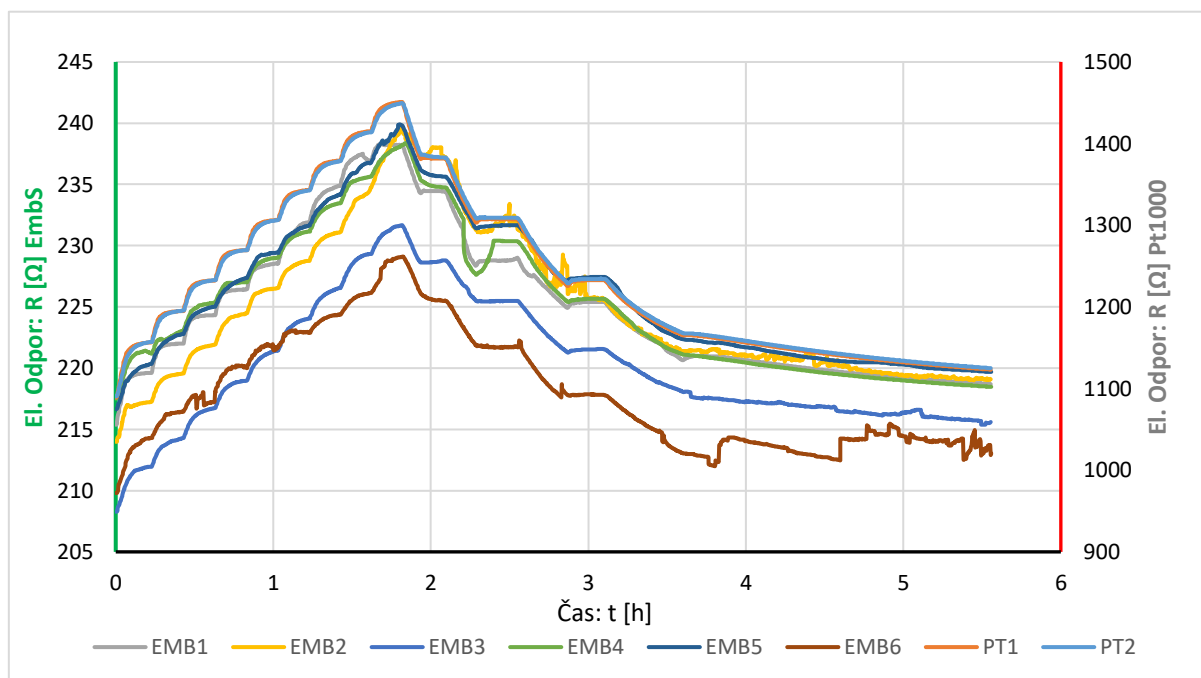
Obr. 5.2 Graf závislosti odporu na čase při testu opakovaného nárůstu

Obr. 5.2 ukazuje závislost odporu na čase u vzorků, které byly kontaktovány metodou ultrazvukové svařování. V tomto případě vzorky vykazují vysoké kmitání a vysoké odchylky. Z toho důvodu byl tento způsob kontaktu vyhodnocen jako nedostatečný.

Z výsledků testů rychlého opakovaného nárůstu bylo patrné, že některé vyrobené vzorky nebyly funkční z důvodu nevytvoření kontaktu mezi nití 7A a nití 74 či nestálostí kontaktu při změnách teplot. Proto neprošly do další fáze testování.

## 5.2 Kalibrace vyšitých vzorků

Vyšité vzorky, které vykazovaly přijatelné průběhy při testu rychlého opakovaného nárůstu, byly podrobeny testu schodovitěho nárůstu.



Obr. 5.3 Graf závislosti odporu na čase při testu schodovitěho nárůstu

Obr. 5.3 zobrazuje výsledek testu schodovitěho nárůstu při kterém se ukázalo, že vzorky kontaktované metodou odporového svařování nadále vykazovaly výborné výsledky. Způsob odporového svařování vyčníval spolehlivostí a velice dobrými průběhy. Vzorky kontaktované vodivou pastou vykazovaly pouze průměrné výsledky, kdy chybovost byla vyšší než u vzorků kontaktovaných odporovým svařováním.

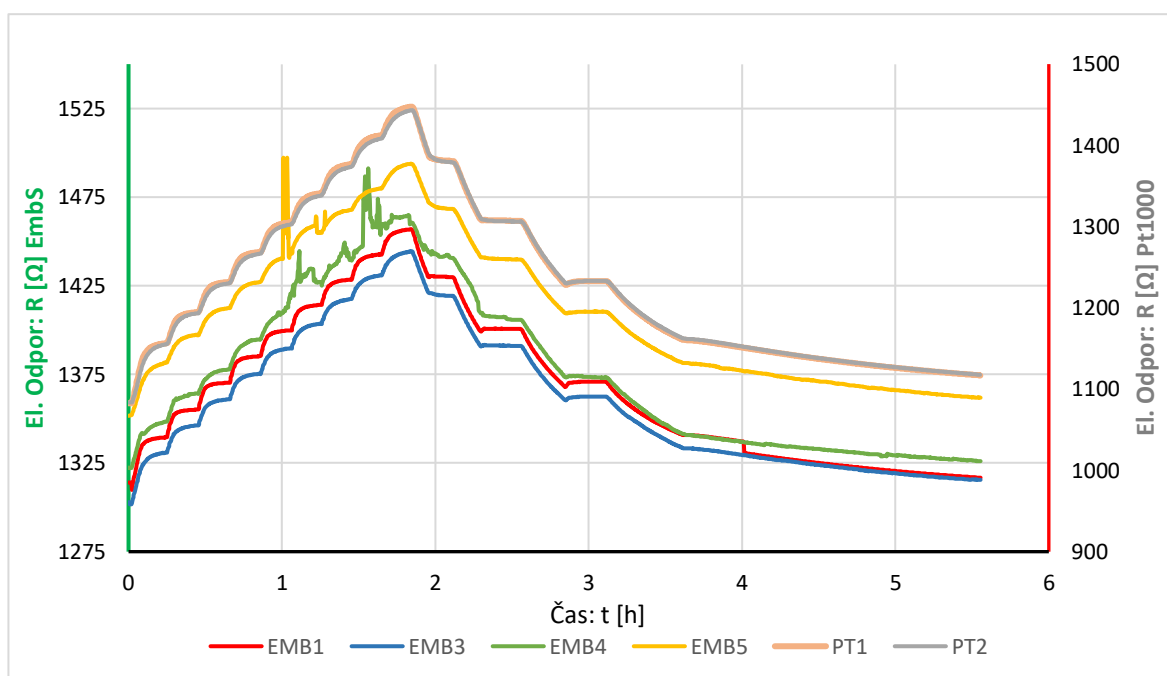
Dále výsledky ukázaly jako nejslibnější způsob kontaktu pětibodové přešití kontaktu. Jedno bodové přešití se ukázalo jako naprosto nedostatečné z důvodu své vysoké chybovosti, kdy ve velkém množství případů nedošlo ke kontaktu hybridní odporové nitě a vodivé nitě.

Z výše uvedených výsledků proto byl zvolen způsob realizace vyšitých teplotních senzorů pomocí pětibodového překřížení a kontaktování metodou odporového svařování.



### 5.3 Kalibrace vyšitých senzorů “Flower“

Provedení kalibrace bylo nutné z důvodu odchylky elektrického obvodu. Odchylka elektrického odporu činila  $38 \Omega$  mezi 5 testovanými vzorky. Vzorek s označením EMB2 z důvodu chybného kontaktu nebylo možné změřit. Obr. 5.4 ukazuje graf závislosti elektrického odporu vyšitých senzorů (EMB1 až EMB4) a komerčních senzorů (PT1 a PT2) na čase. Z průběhů lze vidět, že dva senzory vykazují nestálost průběhu a občasné značné odchylky a jeden ze senzorů byl nefunkční. Graf obsahuje dvě vertikální osy. Pravá osa patří komerčním senzorům a levá vyšitým senzorům.



Obr 5.4 Graf závislosti odporu na čase při testu schodovitého nárůstu senzoru “Flower“

Pro sestavení kalibrační křivky vyšitých senzorů bylo nutné převést hodnoty naměřené konvenčními senzory na jednotky teploty. Hodnoty elektrického napětí naměřené termočlánky typu T byly dosazeny do rovnice (3) a přepočteny na hodnoty teploty ve stupních Celsia.

$$T1 = \frac{\Delta U}{SC + T2} (\text{°C}) \quad (3)$$

Kde T1 je teplota uvnitř pece, T2 teplota vně pece,  $\Delta U$  je změřené napětí a SC je Seebeckův koeficient pro termočlánek typu T o hodnotě  $43 \mu\text{V}/\text{°C}$ .

Naměřené hodnoty konvenčními senzory Pt1000 byly dosazeny do rovnice (4) a přepočteny na teplotu.

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B\left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right)}}{2B} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

Pro odporové senzory Pt1000 dosazujeme konstanty:

$$A = 3,908 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}), B = 5,775 \cdot 10^{-7} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}), R_0 = 1000.$$

Díky vypočtené teplotě a změřenému elektrickému odporu vyšíváných senzorů byla stanovena kalibrační křivka (Obr. 5.5), kdy body pro kalibrační křivku byly použity z ustáleného stavu teploty před následným teplotním růstem. Shromážděné body z kalibrace byly lineárně proloženy a stanoveny lineární rovnice, vycházející z předpisu směrnicové rovnice přímky viz rovnice (5). Rovnice (6) až (9) slouží pro převod elektrického odporu vyšíváných senzorů na teplotu.

$$y = k \cdot x + q \quad (5)$$

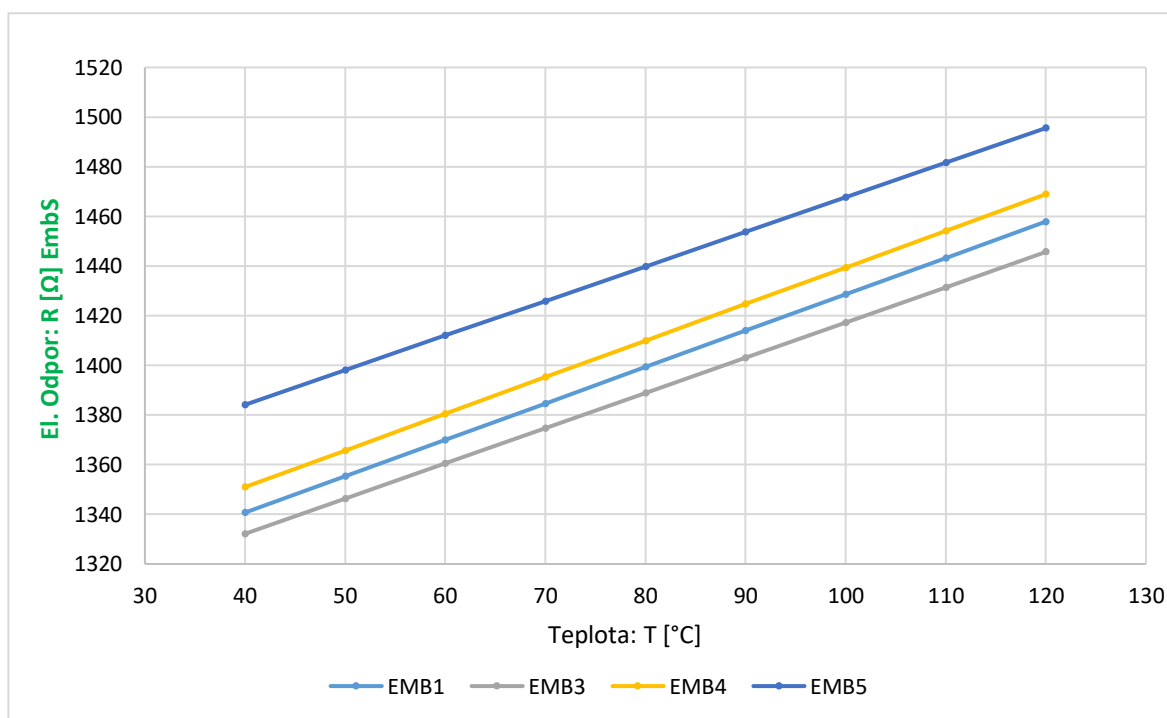
kde a je směrnice přímky a b vyjadřuje průsečík přímky s osou y.

$$\text{EMB1: } y = 1,4655x + 1282,1 \quad (6)$$

$$\text{EMB3: } y = 1,4195x + 1275,4 \quad (7)$$

$$\text{EMB4: } y = 1,4743x + 1292 \quad (8)$$

$$\text{EMB5: } y = 1,3936x + 1328,4 \quad (9)$$

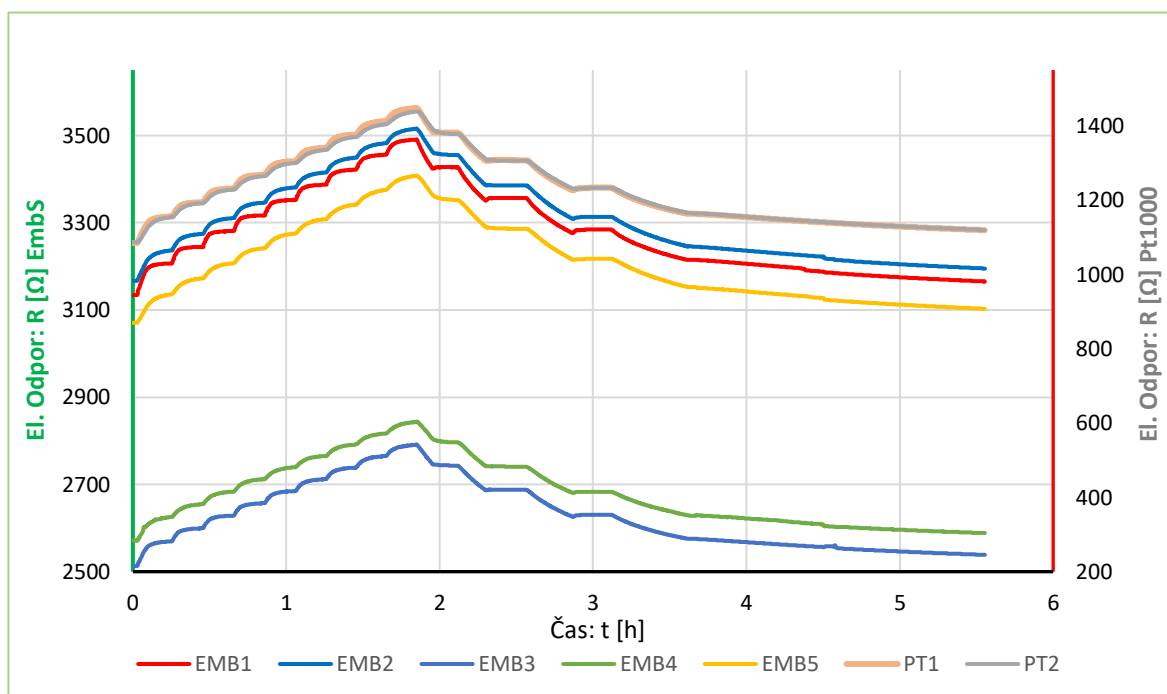


Obr 5.5 Kalibrační křivky senzorů “Flower“

Výsledné kalibrační křivky ukazují, že vyšívané senzory v rozmezí teplot od 40 °C do 120 °C mají lineární charakter. To umožňuje jednoduchý převod naměřeného elektrického odporu na teplotu.

#### 5.4 Kalibrace vyšitých senzorů “Square“

V průběhu vyšití toho typu senzorů došlo k úpravě napnutí nití, neboť nevodivé nitě byly příliš vtahovány do substrátu a tím došlo ke zkrácení výsledné dráhy odporové nitě a deformaci tvaru senzorů. V důsledku změny napnutí nitě odchylna elektrického odporu mezi vyšitými senzory činila 655  $\Omega$  mezi 5 testovanými vzorky. Obr. 5.6 ukazuje graf závislosti elektrického odporu vyšitých senzorů (EMB1 až EMB5) a komerčních senzorů (PT1 a PT2) na čase. Z průběhů lze vidět, jak neoptimální napnutí nitě při vyšívání dokáže zásadně ovlivnit délku dráhy odporové nitě a tím i hodnoty elektrického odporu. Graf obsahuje dvě vertikální osy. Pravá osa patří komerčním sensorům a levá vyšíváním sensorům.



Obr. 5.6 Graf závislosti odporu na čase při testu schodovitého nárůstu senzoru “Square“

Pro sestavení kalibrační křivky (Obr. 5.7) vyšívání senzorů byl použit shodný postup viz kapitola 4.8. Rovnice (10) až (14) ukazují lineární rovnice pro převod elektrického odporu vyšívání senzorů.

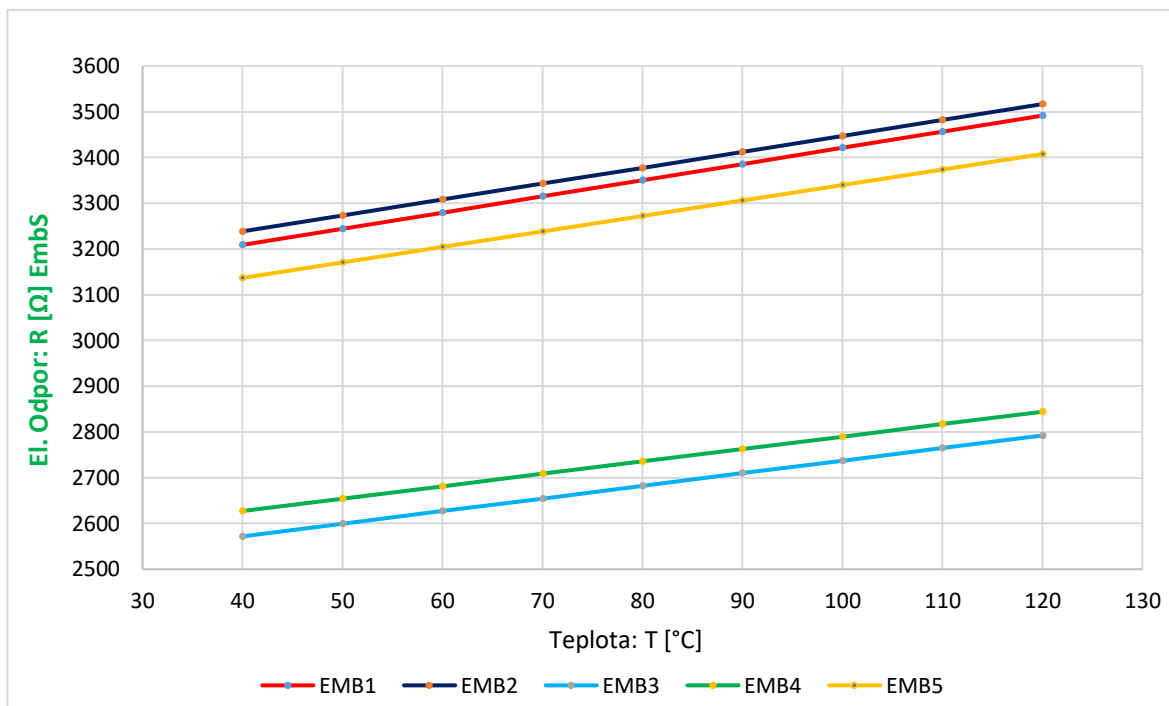
$$\text{EMB1: } y = 3,5328x + 3067,6 \quad (10)$$

$$\text{EMB2: } y = 3,4769x + 3099,4 \quad (11)$$

$$\text{EMB3: } y = 2,7558x + 2461,6 \quad (12)$$

$$\text{EMB4: } y = 2,7111x + 2518,8 \quad (13)$$

$$\text{EMB5: } y = 3,3853x + 3001,3 \quad (14)$$



Obr. 5.7 Kalibrační křivky senzorů “Square“

## 5.5 Teplotní koeficient odporu

Důležitým parametrem teplotních senzorů je teplotní koeficient odporu (TKR), který určuje závislost elektrického odporu na teplotě. Pro výpočet TKR byla použita rovnice (1) a pro výpočet citlivosti byla použita rovnice (2). Obě rovnice byly upraveny pro teplotní rozsah 40 °C až 120 °C.

Tabulka 5.1 zobrazuje vypočtené hodnoty teplotního koeficientu teploty a citlivosti senzorů pro senzory “Flower“. Pro vyšíváné senzory nejvyšší hodnota TKR dosahuje 1094,47 ppm·°C<sup>-1</sup>, zatímco nejvyšší hodnota TKR komerčních senzorů Pt1000 dosahuje hodnoty 3145,1 ppm·°C<sup>-1</sup>. Tento rozdíl způsobuje odlišnost použitých materiálů. Absolutní citlivost vyšíváných senzorů se pohybuje od 1,39 Ω·C<sup>-1</sup> až 1,47 Ω·C<sup>-1</sup>. Oproti tomu citlivost komerčních senzorů dosahuje hodnoty až 3,64 Ω·C<sup>-1</sup>.

Tabulka 5.1 Vypočítané parametry TKR a  $K_{RTD}$  pro teplotní rozsah od 40 °C až 120 °C senzorů “Flower“

Název senzoru	TKR [ppm·°C <sup>-1</sup> ]	$K_{RTD}$ [Ω·C <sup>-1</sup> ]
EMB1	1094,47	1,47
EMB3	1065,97	1,42
EMB4	1033,62	1,39
EMB5	1012,98	1,40
PT1	3145,10	3,64
PT2	3112,68	3,60

Tabulka 5.2 zobrazuje vypočtené hodnoty teplotního koeficientu teploty a citlivosti senzorů pro senzory “Square“. Pro vyšíváné senzory nejvyšší hodnota TKR dosahuje 1105 ppm·°C<sup>-1</sup>, zatímco nejvyšší hodnota TKR komerčních senzorů Pt1000 dosahuje hodnoty 316,74 ppm·°C<sup>-1</sup>. Citlivost vyšíváných senzorů se pohybuje od 2,77 Ω·C<sup>-1</sup> až 3,55 Ω·C<sup>-1</sup>. Hodnoty citlivosti komerčních senzorů dosahují hodnoty až 3,64 Ω·C<sup>-1</sup>.

Tabulka 5.2 Vypočítané parametry TKR a  $K_{RTD}$  pro teplotní rozsah od 40 °C až 120 °C senzorů “Square“

Název senzoru	TKR [ppm·°C <sup>-1</sup> ]	$K_{RTD}$ [Ω·C <sup>-1</sup> ]
EMB1	1105,31	3,54
EMB2	1076,58	3,48
EMB3	1077,16	2,77
EMB4	1037,27	2,72
EMB5	1083,06	3,40
PT1	3146,74	3,64
PT2	3073,69	3,55

Vyšíváné senzory “Square“ vykazují srovnatelnou citlivost s komerčními senzory Pt1000. Taková citlivost zajišťuje dostatečnou změnu elektrického odporu při změně teploty. Vyšíváné senzory “Flower“ disponují nižší, avšak stále přijatelnou citlivostí.

## Zhodnocení a závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat problematiku textilních a konvenčních senzorů vhodných pro oblast chytrých ochranných oděvů a technických textilií. První kapitoly práce jsou zaměřeny na rešerši e-textilií. Konkrétně materiálům substrátů, propojovacích cest a dále technologiím výroby textilních senzorů. Hlavní část práce se zabývá komerčními a textilními teplotními senzory. Stěžejní část práce se věnuje návrhu, realizaci, metodám kontaktování a testování vyšitých textilních teplotních senzorů.

E-textilní teplotní senzory díky své flexibilitě, pohodlnosti a nízké hmotnosti nacházejí stále větší možnosti implementace do textilií a uplatnění v praktických aplikacích. Uplatnění nalezneme v oblasti zdravotnictví, sportu či ochranném vybavení.

Praktická část se věnuje návrhu, vyšití, kontaktování a testování vyšívaného teplotního senzoru, jehož senzoricou částí je hybridní odporová nit.

Jako nejspolehlivější způsob kontaktu se ukázala metoda odporového svařování s pětibodovým překřížením nití. Metody ultrazvukového svařování, vodivé pasty či jednobodového překřížení se ukázaly jako nedostatečné z důvodu nevytvoření kontaktu či odchylek a kmitání odporu při testování takto vytvořených senzorů. Toto kmitání bylo způsobeno rozdílnou tepelnou roztažností použitých materiálů.

Vyšité senzory byly podrobeny testům rychlého opakovaného nárůstu a schodovitého nárůstu v rozmezí teplot od 40 °C do 120 °C. Kalibrační křivky v tomto rozmezí teplot vykazovaly lineární průběh. Hodnoty absolutní citlivosti se pro senzor typu "Flower" pohybovaly od 1,39  $\Omega \cdot C^{-1}$  až 1,47  $\Omega \cdot C^{-1}$  a pro typ "Square" od 2,77  $\Omega \cdot C^{-1}$  až 3,55  $\Omega \cdot C^{-1}$ . V porovnání hodnoty citlivosti komerčních senzorů Pt1000 dosahují hodnot až 3,64  $\Omega \cdot C^{-1}$ . Taková citlivost vyšívaných senzorů zajišťuje dostatečnou změnu elektrického odporu při změně teploty a vyšívané senzory dokáží tedy tímto parametrem konkurovat konvenčním teplotním senzorům.

Z důvodu nestálosti některých kontaktů bych navrhl pro další výzkum věnovat se zapouzdření či jiné ochraně kontaktů či celého senzoru. Tato úprava by mohla napomoci k větší spolehlivosti a ochraně kontaktů jak při teplotních změnách, tak při mechanickém namáhání.

## Literatura

- [1] M. S. Sarif Ullah Patwary, “Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview,” *Journal of Textile Science & Engineering*, vol. 05, no. 01, 2015, doi: 10.4172/2165-8064.1000181.
- [2] S. Schneegass and O. Amft, “Human-Computer Interaction Series Smart Textiles Fundamentals, Design, and Interaction.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/6033>
- [3] Maxey Madison, “What’s the Difference between an E-Textile, Smart Fabric, Functional Fabrics and Smart Textiles?,” Oct. 04, 2019. <https://www.loomia.com/blog/2019/9/2/zl70axxzv913ajm64vm1rbdvrrfhgu> (accessed Feb. 19, 2022).
- [4] L. Affatato and C. Carfagna, “Smart Textiles: A Strategic Perspective of Textile Industry,” *Advances in Science and Technology*, vol. 80, pp. 1–6, Sep. 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/ast.80.1.
- [5] V. KONCAR, *Smart Textiles and Their Applications*. Woodhead Publishing, 2016.
- [6] H. H. Dadi and B. Sweden, “Literature over view of Smart textiles,” 2010.
- [7] D. Canan Çelikel, “Smart E-Textile Materials.” [Online]. Available: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- [8] F. Khoshmanesh, P. Thurgood, E. Pirogova, S. Nahavandi, and S. Baratchi, “Wearable sensors: At the frontier of personalised health monitoring, smart prosthetics and assistive technologies,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 176. Elsevier Ltd, Mar. 15, 2021. doi: 10.1016/j.bios.2020.112946.
- [9] X. Tao, *Handbook of Smart Textiles*. 2015. doi: 10.1007/978-981-4451-45-1.
- [10] H. Mattila, “Intelligent textiles and clothing,” 2006.
- [11] M. Zahid *et al.*, “Recent Developments in Textile Based Polymeric Smart Sensor for Human Health Monitoring: A review,” *Arabian Journal of Chemistry*, p. 103480, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103480.
- [12] Y. Koyama, M. Nishiyama, and K. Watanabe, “Smart textile using hetero-core optical fiber for heartbeat and respiration monitoring,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 15, pp. 6175–6180, Aug. 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2847333.
- [13] Z. Gong *et al.*, “Wearable fiber optic technology based on smart textile: A review,” *Materials*, vol. 12, no. 20. MDPI AG, Oct. 01, 2019. doi: 10.3390/ma12203311.

- [14] F. Marra, S. Minutillo, A. Tamburrano, and M. S. Sarto, "Production and characterization of Graphene Nanoplatelet-based ink for smart textile strain sensors via screen printing technique," *Materials and Design*, vol. 198, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109306.
- [15] Q. F. Ma *et al.*, "Carbon-nanotube / Polyvinyl alcohol coated thin core fiber sensor for humidity measurement," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 257, pp. 800–806, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.snb.2017.10.121.
- [16] N. M. Isa, N. Irawati, S. W. Harun, F. Ahmad, H. A. Rahman, and M. H. M. Yusoff, "Multi-walled carbon nanotubes doped Poly(Methyl MethAcrylate) microfiber for relative humidity sensing," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 272, pp. 274–280, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.01.049.
- [17] A. Kubley *et al.*, "Chapter 12 - Smart Textiles and Wearable Technology Innovation With Carbon Nanotube Technology," in *Nanotube Superfiber Materials (Second Edition)*, Second Edition., M. J. Schulz, V. Shanov, Z. Yin, and M. Cahay, Eds. William Andrew Publishing, 2019, pp. 263–311. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812667-7.00012-4>.
- [18] J. Di *et al.*, "Carbon-Nanotube Fibers for Wearable Devices and Smart Textiles," *Advanced Materials*, vol. 28, no. 47, pp. 10529–10538, Dec. 2016, doi: 10.1002/adma.201601186.
- [19] A. Cakir, "Smart clothing – technology and applications," *Behaviour & IT*, vol. 30, pp. 287–288, Nov. 2011, doi: 10.1080/0144929X.2011.556868.
- [20] "Šijte s námi: Látky od A do Z – tkaniny vs. pleteniny." <https://sijtesnami.cz/2021/03/latky-od-a-do-z-tkaniny-vs-pleteniny/> (accessed Nov. 16, 2021).
- [21] L. M. Castano and A. B. Flatau, "Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review," *Smart Materials and Structures*, vol. 23, no. 5. Institute of Physics Publishing, 2014. doi: 10.1088/0964-1726/23/5/053001.
- [22] G. Bartkowiak, A. Dabrowska, and A. Greszta, "Development of smart textile materials with shape memory alloys for application in protective clothing," *Materials*, vol. 13, no. 3, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13030689.
- [23] H. Ramlow, K. L. Andrade, and A. P. S. Immich, "Smart textiles: an overview of recent progress on chromic textiles," *Journal of the Textile Institute*, vol. 112, no. 1. Taylor and Francis Ltd., pp. 152–171, 2021. doi: 10.1080/00405000.2020.1785071.



- [24] T. A. Khattab, M. Rehan, and T. Hamouda, "Smart textile framework: Photochromic and fluorescent cellulosic fabric printed by strontium aluminate pigment," *Carbohydrate Polymers*, vol. 195, pp. 143–152, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.04.084.
- [25] Y. Lu *et al.*, "Novel smart textile with phase change materials encapsulated core-sheath structure fabricated by coaxial electrospinning," *Chemical Engineering Journal*, vol. 355, pp. 532–539, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.189>.
- [26] Z. Niu, S. Qi, S. S. A. Shuaib, and W. Yuan, "Flexible, stimuli-responsive and self-cleaning phase change fiber for thermal energy storage and smart textiles," *Composites Part B: Engineering*, p. 109431, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109431.
- [27] J. Borneman, "E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies," *Textile World*.
- [28] R. Alagirusamy, J. Eichhoff, T. Gries, and S. Jockenhoevel, "Coating of conductive yarns for electro-textile applications," *Journal of the Textile Institute*, vol. 104, no. 3, pp. 270–277, Mar. 2013, doi: 10.1080/00405000.2012.719295.
- [29] K. Moučková, K. Šíma, and R. Soukup, "System for Respiratory Rate Monitoring Integrated in Textiles," in *2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISSE49702.2020.9120881.
- [30] G. Cho, K. Jeong, M. J. Paik, Y. Kwun, and M. Sung, "Performance evaluation of textile-based electrodes and motion sensors for smart clothing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 12, pp. 3183–3193, 2011, doi: 10.1109/JSEN.2011.2167508.
- [31] "Elektricky vodivé hybridní nitě." <https://www.clevertex.cz/vodive-nite/elektricky-vodive-hybridni-nite-detail-761> (accessed Jan. 24, 2022).
- [32] R. Polanský *et al.*, "A novel large-area embroidered temperature sensor based on an innovative hybrid resistive thread," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 265, pp. 111–119, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.08.030.
- [33] I. Kazani, C. Hertleer, G. de Mey, A. Schwarz, G. Guxho, and L. van Langenhove, "Electrical Conductive Textiles Obtained by Screen Printing," 2012.
- [34] S. Khan, L. Lorenzelli, and R. S. Dahiya, "Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 6, pp. 3164–3185, Jun. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2375203.
- [35] M. Keener, "Printing Techniques for Electronics," 2015.

- [36] M. Ghahremani Honarvar and M. Latifi, "Overview of wearable electronics and smart textiles," *Journal of the Textile Institute*, vol. 108, no. 4. Taylor and Francis Ltd., pp. 631–652, Apr. 03, 2017. doi: 10.1080/00405000.2016.1177870.
- [37] M. Varga, N. Münzenrieder, C. Vogt, and G. Tröster, "Programmable e-textile composite Circuit," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, Jul. 2015, vol. 2015-July, pp. 678–684. doi: 10.1109/ECTC.2015.7159665.
- [38] T. Agcayazi, K. Chatterjee, A. Bozkurt, and T. K. Ghosh, "Flexible Interconnects for Electronic Textiles," *Advanced Materials Technologies*, vol. 3, no. 10. Wiley-Blackwell, Oct. 01, 2018. doi: 10.1002/admt.201700277.
- [39] L. Devendorf and C. di Lauro, "Adapting double weaving and yarn plying techniques for smart textiles applications," in *TEI 2019 - Proceedings of the 13th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, Mar. 2019, pp. 77–85. doi: 10.1145/3294109.3295625.
- [40] "How Does a Sewing Machine Work," Apr. 2021. <https://love-sew.com/blogs/blog/how-does-a-sewing-machine-work> (accessed Apr. 23, 2022).
- [41] J. Kalčík, R. Soukup, K. Technologif A Měření Fakulta, and Z. Univerzita V Plzni, "Vyšíváný teplotní senzor Embroidered Temperature Sensor."
- [42] R. Polanský *et al.*, "A novel large-area embroidered temperature sensor based on an innovative hybrid resistive thread," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 265, pp. 111–119, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.08.030.
- [43] M. D. Husain and R. Kennon, "Preliminary investigations into the development of textile based temperature sensor for healthcare applications," *Fibers*, vol. 1, no. 1, pp. 2–10, Jun. 2013, doi: 10.3390/fib1010002.
- [44] W. Root, T. Bechtold, and T. Pham, "Textile-Integrated thermocouples for temperature measurement," *Materials*, vol. 13, no. 3. MDPI AG, Feb. 01, 2020. doi: 10.3390/ma13030626.
- [45] B. Arman Kuzubasoglu and S. Kursun Bahadir, "Flexible temperature sensors: A review," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 315. Elsevier B.V., Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.sna.2020.112282.
- [46] Kreidl Marcel, *Měření teploty-senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005.

- [47] “Resistance Changes with Temperature,” *Temperature Coefficient of Resistance*. <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-fundamentals/temperature-coefficient-of-resistance/> (accessed Feb. 27, 2022).
- [48] G. S. Chung and C. H. Kim, “RTD characteristics for micro-thermal sensors,” *Microelectronics Journal*, vol. 39, no. 12, pp. 1560–1563, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.mejo.2008.02.028.
- [49] M. D. Dankoco, G. Y. Tesfay, E. Benevent, and M. Bendahan, “Temperature sensor realized by inkjet printing process on flexible substrate,” *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, vol. 205, pp. 1–5, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.mseb.2015.11.003.
- [50] J. Kalcik and R. Soukup, “Large Area Temperature Measurement in Smart Textiles,” in *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISSE.2019.8810244.
- [51] J. Kalcik, K. Sima, and R. Soukup, “Textile Hybrid Thread Thermocouples,” in *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, May 2021, vol. 2021-May. doi: 10.1109/ISSE51996.2021.9467514.
- [52] W. Shi and T. Little, “Ultrasonic joining of textile materials Mechanisms of ultrasonic joining of textile materials,” # MCB University Press, 2000. [Online]. Available: <http://www.emerald-library.com>
- [53] Hlavatý Ivo, “Ultrazvukové svařování-41.” Accessed: Mar. 27, 2022. [Online]. Available: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/2-06-41.pdf>
- [54] P. Podržaj, I. Polajnar, J. Diaci, and Z. Kariž, “Overview of resistance spot welding control,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 3. pp. 215–224, May 2008. doi: 10.1179/174329308X283893.
- [55] “CCI EUROLAM Intexar™ Stretchable Electronics.” <https://www.ccieurolam.com/en/products/stretchable-electronics/> (accessed Apr. 04, 2022).