

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Flexibilní senzor teploty pro aplikace v chytrých textiliích**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KALČÍK**  
Osobní číslo: **E16N0056P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Flexibilní senzor teploty pro aplikace v chytrých textiliích**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Proveďte literární rešerši dostupných metod vhodných pro měření teploty v oblasti chytrých textiliích.
2. Navrhněte aplikace pro měření teploty v chytrých textiliích a stanovte požadované parametry senzorů teploty.
3. Navrhněte vhodné materiály a topologie sensorových prvků pro měření teploty. Pozornost rovněž věnujte problematice spolehlivého kontaktování sensorových prvků.
4. Proveďte měření vybraných vzorků teplotních sensorových prvků na textilních substrátech a diskutujte dosažené výsledky a navrhněte další postup prací pro výzkum v této oblasti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

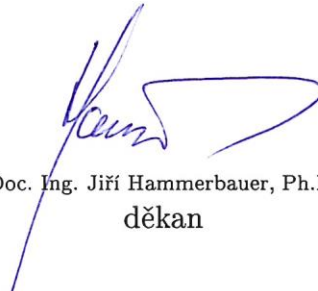
Seznam odborné literatury:

1. Mattila, H., R., Intelligent Textiles and clothing, CRC Press, 2006.  
ISBN-13: 978-0849390999
2. Locher, I, Kirstein, T., Temperature profile estimation with smart textiles,  
In Proceedings of the International Conference on Intelligent textiles,  
Smart clothing, Well-being, and Design, 2005.
3. 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) 302?311.  
doi:10.1016/j.sna.2003.10.071.
4. T. Kirstein, D. Cottet, J. Grzyb, G. Tröster, Wearable computing systems  
? electronic textiles, in: T. Xiaoming (Ed.), Wearable Electron. Photonics,  
CRC Press, Boca Raton, FL, 2005: pp. 177?197.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radek Soukup, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



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

V Plzni dne 10. října 2017

## Abstrakt

Tato práce zahrnuje vývoj vyšívaných teplotních senzorů pro inteligentní textilie, především hasičské obleky. Vyvíjený teplotní senzor je založen na inovativní hybridní odporové niti. Práce postupuje od návrhu senzoru konvenčními textilními metodami přes skutečnou realizaci senzorů. Vyšívané teplotní senzory jsou kalibrovány v teplotním rozsahu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplotní senzory jsou podrobeny testu dlouhodobé stability 1000 hodin v teplotě  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Test dlouhodobé stability přináší uspokojivé výsledky, změna elektrického odporu testovaného senzoru je v relativních veličinách nižší než změna měřená stejným testem u komerčního senzoru. Reakce vyšívaných teplotních senzorů na skokové změny teploty mezi  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  je porovnána s komerčními teplotními senzory Pt1000 třídy A. Vyšívaný teplotní senzor disponuje několikanásobně rychlejší odezvou na skokovou změnu teploty. Senzor je doporučen k dalšímu vývoji a realizaci v cílových aplikacích.

## Klíčová slova

Teplota, měření, senzor teploty, smart textilie, vyšívaní, kalibrace

## Abstract

This study introduces the development of embroidered temperature sensors for smart textiles, especially firefighting suits. The developed temperature sensor is based on innovative hybrid resistance thread. The work proceeds from the design of the sensor through conventional textile methods to real realization of sensors. Embroidered temperature sensors are calibrated in the temperature range from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Temperature sensors are subjected to a long-term stability test of 1000 hours at  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The long-term stability test yields satisfactory results, the change in the electrical resistance of the tested sensor is less than measured change by the same test in a commercial sensor in relative values. Reaction of embroidered temperature sensors to shock-temperature changes between  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  is compared with commercial grade Pt1000 temperature sensors. The embroidered temperature sensor has a so much faster response to shock-temperature changes. The sensor is recommended for further development and implementation in the target applications.

## Key words

Temperature, measurement, temperature sensor, smart textile, embroider, calibration

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 24.5.2018

Jan Kalčík

## Poděkování

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

Tato diplomová práce vznikla s podporou projektu TA03010286 ELTEX - Smart textile s integrovanými elektronickými funkčními bloky nové generace pro zkvalitnění ochrany. A projektu LF14043: EURIPIDES ADVANTEX - advanced functional blocks and technologies for smart textile products.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2 SMART TEXTILIE</b> .....	<b>11</b>
2.1 ROZDĚLENÍ SMART TEXTILÍ .....	12
2.2 VYUŽITÍ SMART TEXTILÍ .....	14
<b>3 TEPLOTNÍ MĚŘENÍ</b> .....	<b>16</b>
3.1 KONVENČNÍ TEPLOTNÍ SENZORY .....	19
3.2 TEXTILNÍ TEPLOTNÍ SENZORY .....	21
<b>4 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>23</b>
4.1 NÁVRH TOPOLOGIÍ TEXTILNÍHO TEPLOTNÍHO SENZORU .....	25
4.2 VYŠITÍ, KONTAKTOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ RŮZNÝCH TOPOLOGIÍ SENZORU .....	26
4.3 KALIBRACE VYŠITÝCH SENZORŮ .....	30
4.4 TEST DLOUHODOBÉ STABILITY TEXTILNÍHO SENZORU .....	33
4.5 MĚŘENÍ REAKCE SENZORU NA SKOKOVOU ZMĚNU TEPLoty .....	34
4.6 OPĚTOVNÁ KALIBRACE VYŠITÝCH SENZORŮ .....	37
<b>5 VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>38</b>
5.1 KALIBRACE VYŠITÝCH SENZORŮ .....	38
5.2 TEST DLOUHODOBÉ STABILITY TEXTILNÍHO SENZORU .....	40
5.3 MĚŘENÍ REAKCE SENZORU NA SKOKOVOU ZMĚNU TEPLoty .....	42
5.4 OPĚTOVNÁ KALIBRACE VYŠITÝCH SENZORŮ .....	44
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>49</b>



## Seznam symbolů a zkratk

Zkratka	Popis česky	Popis anglicky
TKR	Teplotní koeficient elektrického odporu	Thermal coefficient of resistance
$K_{RTD}$	Teplotní citlivost	Temperature sensitivity
Pt1000	Platinový odporový teploměr (s nominální hodnotou elektrického odporu 1 k $\Omega$ při 0 °C)	Platinum resistive thermometer (with a nominal value of electrical resistance 1 k $\Omega$ at 0 °C)
PTC	Pozitivní teplotní koeficient	Positive temperature coefficient
NTC	Negativní teplotní koeficient	Negative temperature coefficient
PES	Polyester	Polyester
EmbS	Vyšívaný teplotní senzor	Embroidered temperature sensor
PtS	Pt1000 teplotní senzor	Pt1000 temperature sensor

# 1 Úvod

Smart textilie a E-textilie jsou vzhledem ke svému potenciálu využití v mnoha oborech vyvíjeny závratným tempem. Smart textilie jsou již nyní využívány ve zdravotnictví, průmyslu, módě a dalších oborech. Ovšem nejzajímavější aplikací pro potřeby této diplomové práce jsou hasičské obleky. Na základě potřeby určení vlivů ovlivňujících nejen komfort, ale především bezpečí pracovníků, jsou navrhovány senzory teploty, vlhkosti prostředí a další. Z toho důvodu je tato práce zaměřena na vývoj vyšivaného teplotního senzoru implementovatelného do textilií konvenčními nebo novými textilními metodami.

Vývoj E-textilií je poměrně nové zaměření, a tedy není překvapením prozatím chybějící standardizace postupů a metod. Dosavadní řešení flexibilních teplotních senzorů implementovatelných do textilií jsou založena na vrstvení nití teplotně citlivým materiálem. A také na implementaci senzorů tištěných na plastové folie. Pro vývoj senzoru v této práci je využit princip teplotní závislosti elektrického odporu kovových vodičů. Za tímto účelem jsou k dispozici vodivé a odporové nitě sestávající z polyesterových vláken a kovových mikrodrátků.

Cílem této práce je výběr vhodného sensorového elementu, návrh způsobu aplikování do textilního substrátu a vhodná metoda kontaktování. Těž testování základních parametrů teplotních senzorů a jejich porovnání s komerčně dostupnými spolehlivými senzory teploty. Nezbytnou součástí je kalibrace inovativních senzorů a test dlouhodobé stability prvků. Dále je vhodný test reakce teplotních senzorů na skokovou změnu teploty.

## 2 Smart textilie

Textilní materiály se staly běžnou součástí našich životů. Je těžké představit si bez nich současný život, protože textilie jsou člověkem využívány téměř neustále. Uživatelé výrobků z textilií je poskytnuto ochrany před přízní i nepřízní počasí, zároveň však textilie nejsou zatěžující a naopak poskytují nositeli příjemné vlastnosti jako nízká váha, netransparentnost, elasticita apod. Textilní materiály nejsou využívány jen v podobě částí oděvu, ale tkané i netkané textilie jsou aplikovány v čalounictví, stavebnictví, zahradnictví a dalších oborech, ve kterých jsou použity například pro svou izolační schopnost.

Vzhledem k rozvoji technologií je umožněno vytvářet novou dimenzi v textilním průmyslu a to spojením konvenčního textilního průmyslu s aplikací elektronických prvků. Nejprve se v první generaci chytrých textilií využila možnost spojit textilie s konvenční elektronikou. Což ale nevyhovovalo s přihlédnutím k jejím nevýhodám, jako jsou náchylnost k pracím procesům, složitost výroby a narušení lehkosti či elasticity textilních materiálů. Z těchto důvodů v současnosti roste trend vývoje nových textilních elektronických prvků snadno aplikovatelných do textilního průmyslu. Tedy smart textilie resp. E-textilie mají za úkol, kromě běžných vlastností textilních materiálů, nadstandardní funkce za použití moderních technologií a poznatků vědy a techniky. Smart textilie dokáží měřit, ovlivnit či reagovat na elektromagnetické, mechanické či tepelné podněty.

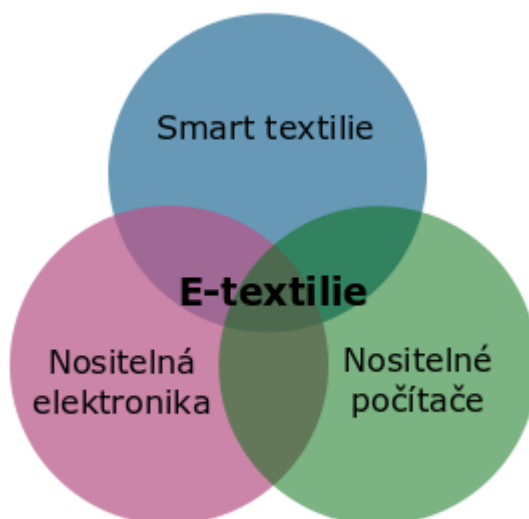
Smart textilie, známé také jako inteligentní oděvy, inteligentní textilie a elektro- nebo e-textilie, mají velký potenciál ovlivňovat každodenní život. Inteligentní textilní prvky zahrnují vkládání aktivních elektronických komponentů do textilií nebo oděvů, aby vytvořily skutečnou inteligentní strukturu, která snímá a reaguje na environmentální podněty [1].

Nitě obsahující nejen textilní vlákna, ale také mikrodrátky mohou plnit funkci senzoru, aplikovatelného například k detekci fyzikálních změn, lidských funkcí či chemických látek. Druky, zipy, suché zipy standardně využívané ke spojení částí oděvů mohou být primárně využity za účelem galvanického propojení elektrických obvodů smart textilií. Běžné textilní materiály mohou být využity coby kapsičky pro inteligentní součásti, nosný

materiál k uchycení resp. prošíání elektronických prvků, nebo jako činitel potřebný při vyhodnocování stavů sensorových členů.

## 2.1 Rozdělení smart textilií

Vývoj v oblasti smart textilií je ovlivněn mnoha faktory, jedním z nich je, že u tohoto poměrně nového odvětví zatím nejsou definovány standardy, jimiž se běžně při vývoji v jiných zaměřeních řídíme. V roce 2016 se projekt „Standardization of smart textiles and wearable intelligence“ vědecké instituce CENTEXBEL pokusil o standardizaci textilií obsahující elektroniku. Dochází zde k dělení na smart textilie, nositelnou elektroniku a nositelné počítače. V průniku těchto tří odvětví vzniká další, nazvané E-textilie, znázorněno na obr. 2.1. [2]



Obr. 2.1 Znáznornění průniku odvětví inteligentních textilií [2]

Za smart textilie jsou považovány materiály detekující případně reagující na vnější podněty. Například materiály reagující změnou své barvy např. na světlo (fotochromní), reagující na teplo (termochromní), reagující na tlak (piezochromní), reagující na elektrické pole (elektrochromní), reagující na vlhkost apod. Smart textilie jsou tedy i membrány používané ve funkčních oděvech, jejichž funkce spočívá v nepromokavosti a udržení tepla, ovšem v případě sportovního výkonu při zvýšení teploty dokážou jednosměrně otevřít póry. Dalším příkladem smart textilií jsou například materiály detekující zvýšenou vlhkost či osvětlení, které je možno využít v logistice pro kontrolu přepravy materiálů citlivých na vystavení neblahým vlivům okolního prostředí. Dále mezi smart textilie řadíme

materiály s tvarovou pamětí, jejichž devízou je návrat do přirozené polohy a tvaru po deformaci. Matrace či lina z takových materiálů jsou běžně dostupné. Při přiblížení k problematice smart textilií v kombinaci s elektrotechnikou se nabízí například materiál s tvarovou pamětí vybuzenou elektrickým polem, tedy textilie, která změní tvar, prodyšnost či pevnost v závislosti na elektrickém poli.

Nositelná elektronika a nositelné počítače se zřejmě odlišují stupněm inteligence použité elektroniky. Nositelná elektronika a nositelné počítače jsou patrně běžné elektronické obvody uzpůsobené k připevnění na textilií. V průniku smart textilií, nositelné elektroniky a nositelných počítačů vznikají elektronické komponenty aplikovatelné konvenčními nebo novými textilními technologiemi tzv. E-textilie.

Zároveň se instituce CENTEXBEL pokusila o definici tříd integrace v inteligentních textiliích následujícím způsobem:

- **Integrační úroveň 1** (odnímatelná) elektronické zařízení je přidáváno způsobem, který je odstranitelný bez zničení produktu, např. pomocí kapsy, zipu a suchého zipu, tlačítka atd. [2].
- **Integrační úroveň 2** (připojeno) elektronické zařízení je připevněno k textilií takovým způsobem, aby nebylo možné odstranění bez zničení výrobku, např. šité, svařované, lepené atd. na textil [2].
- **Integrační úroveň 3** (smíšené řešení) elektronické zařízení sestává z jedné nebo více komponentů vyrobených z textilií nebo textilních úprav zkombinovaných s trvale nebo dočasně připojenými elektronickými součástmi, např. LED lampa připojená k vodivé dráze vetkané do tkaniny [2].
- **Integrační úroveň 4** (kompletní textilní řešení) všechny součásti elektronického zařízení jsou vyrobeny z textilií nebo textilních úprav [2].

Další dělení smart textilií je dle stupně inteligence na **pasivní inteligentní textilie** (passive smart), **aktivní inteligentní textilie** (active smart) a **vysoce aktivní textilie** (very smart).

**Pasivní inteligentní textilie** se vyznačují citlivostí na vnější podněty a indikací změn. Mezi ně se řadí velké množství materiálů fungujících jako čidla a indikátory stavu okolí. Například můžeme uvést textilie měnící barvu v závislosti na teplotě a optická vlákna

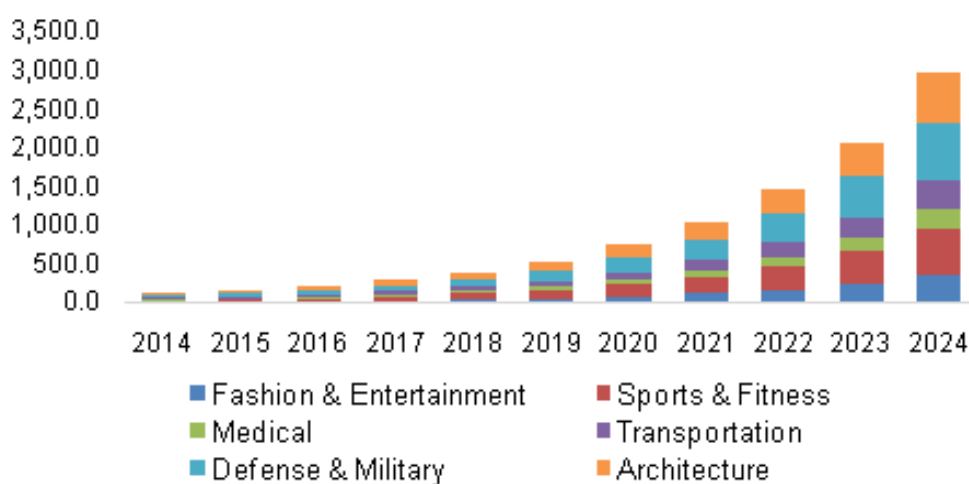
citlivá na deformaci, koncentraci chemikálií, tlak, zrychlení, elektrický proud, magnetické pole atd. [3].

**Aktivní inteligentní textilie** identifikují změnu vnějšího podnětu, a také na tuto změnu reagují způsobem vedoucím k jejich pasivaci. Například teplotně regulující textilie (schopné hromadit či uvolňovat teplo podle změn teploty okolí), textilie s tvarovou pamětí, textilie s variabilní prodyšností a propustností pro vodní páry [3].

**Vysoce aktivní textilie** jsou podskupinou aktivních inteligentních textilií, které jsou schopny kromě indikace a reakce na změnu podmínek okolí také přizpůsobivosti na tyto změny [3].

## 2.2 Využití smart textilií

Je patrné, že smart textilie se vyznačují interdisciplinárním charakterem a disponují potenciálem zasáhnout do bezpečnosti odvětví a nejen usnadnit práci, kontrolovat bezpečnost a dohlížet na adekvátní zacházení s pozemskými živly a ochranu životního prostředí. Obr. 2.2 ukazuje minulý, aktuální a predikovaný stav prodeje smart textilií dělený dle odvětví konečného užití na evropském trhu.



Obr. 2.2 Evropský trh inteligentních textilií podle konečného užití, 2014 - 2024

(v milionech USD) [9]

Za tímto účelem vznikají aplikace smart textilií v oblasti zdravotnictví, jako například prostředek s implementovanými vodivými nitěmi v řadách s funkcí odporového ohřevu. Nebo s vpletenými vodivými nitěmi do tvaru interdigitálních elektrod se schopností

detekce přítomnosti a polohy pacienta, vlhkosti či tenze v určených zónách náchylných na proleženiny. V průmyslu, coby aplikace ochranných či signalizačních oděvů za použití senzorů nebezpečných látek a světélkujících součástí, přičemž je nutno pamatovat, že světelné zdroje použité na smart textiliích zřejmě nemohou dosáhnout výkonů srovnatelných s externími zdroji záření. Proto je rozumné spolu se zdroji světla umísťovat na textiliích také reflexní pruhy. V oblasti módy například vlákna, která svítí, mění barvu či tvar. A konečně využití smart textilií v hasičských oblecích, zastávající úlohu měření a zaznamenávání teploty okolí kontaktní i bezkontaktní metodou, měření životních funkcí, schopnost komunikace mezi jednotlivými články zasahujícího týmu, detekce plynů, kouře, snížené viditelnosti, pohybu či polohy hasiče a v neposlední řadě varování v případě zvýšeného rizika. Inteligentní hasičský oblek včetně popisu jednotlivých komponentů je ukázán na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Hasičský smart oblek [10]

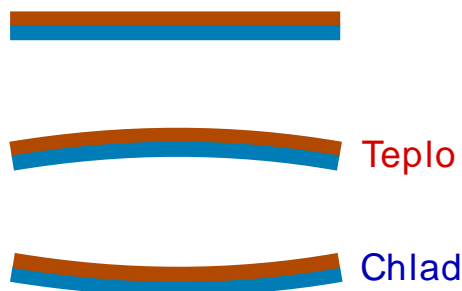
### 3 Teplotní měření

„Teploto je forma energie, která souvisí s neuspořádaným pohybem molekul. Kdykoliv se těleso zahřívá, přebírá tak tepelnou energii jiného tělesa (jiných těles) z okolí. Vzrůst energie v ohřivaném tělese se pak projeví zvýšením jeho teploty, anebo změnou skupenství látky. Měření tepla se zabývá kalorimetrie; teplo se měří speciálním zařízením, tzv. kalorimetrem. Teplo je skalární fyzikální veličina, jeho jednotkou měření je v soustavě SI joule (starší, dosud užívanou jednotkou je kilokalorie  $1 \text{ kcal} = 4186,8 \text{ J}$ ). Joule experimentálně dokázal, že při všech dějích, kdy se určitá forma energie mění na teplo, platí zákon zachování energie. V izolované soustavě tedy zůstává při všech dějích součet všech energií stálý. Teplo je ta část změny vnitřní energie, která nemá povahu ani mechanické práce, ani chemické práce, jde o energii, kterou systém vymění (tj. přijme nebo odevzdá) při styku s jiným systémem jiné teploty. Teplo je fyzikální veličinou popisující termodynamický děj (posloupnost stavů systému), nikoli veličinou stavovou, popisující stav jediný.“[4]

„Teplota charakterizuje tepelný stav tělesa, rovněž souvisí mikrofyzikálně s pohybem molekul. Rozdíl teplot ve dvou různých místech tělesa vyvolává pohyb (vedení) tepla. Protože teplo ani teplota nejsou přímo spolehlivě pozorovatelné vizuálně nebo akusticky, měří se nepřímou pomocí srovnávání přímo pozorovatelných změn (mechanických, elektrických, optických apod.) se změnami tepelnými. Teplota je skalární fyzikální veličinou a její jednotkou je Kelvin (dosud užívanými jednotkami jsou stupeň Celsia a stupeň Fahrenheita).“[4]

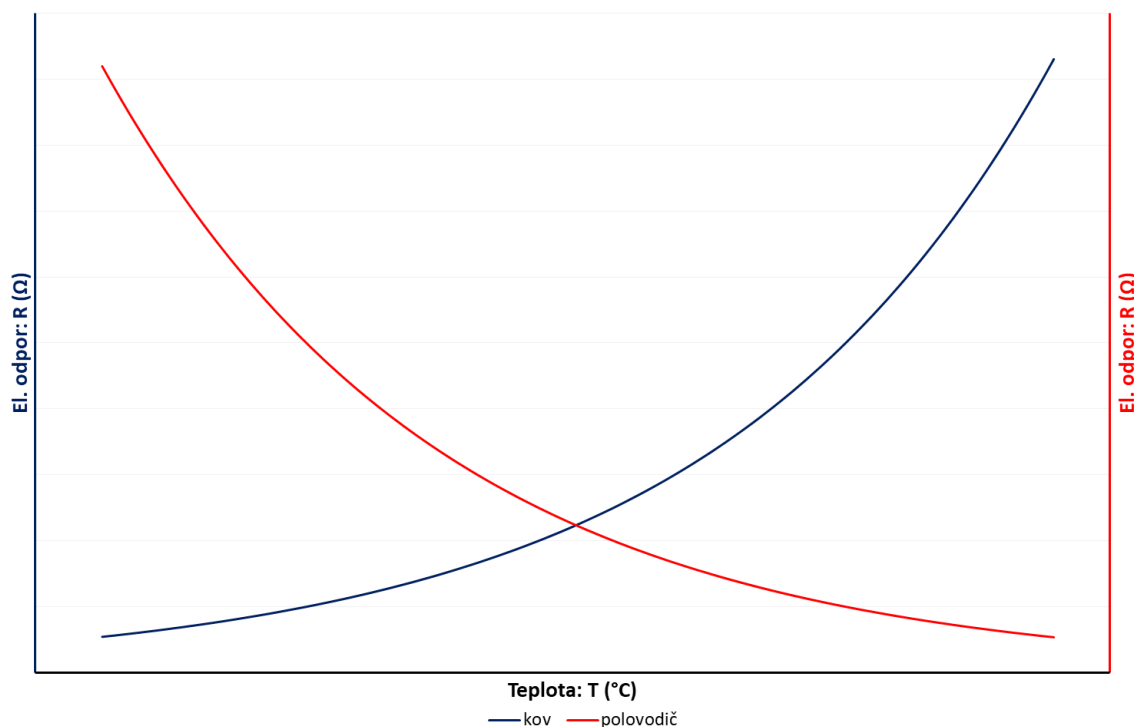
Měření teploty nebo přestupu tepla tzv. tepelného toku se provádí pomocí teplotně závislých materiálů. Teplotní závislost může být vztažena k rozměru či elektrickému odporu resp. vodivosti. Teplotní závislost rozměru resp. tepelná roztažnost je využívána k spínání zařízení teplotního ohřevu např. žehlička. Jev nárůstu rozměru v závislosti na zvětšení teploty je využit v bimetalech. Bimetal, jak název napovídá, je složen ze dvou kovů s rozdílnou teplotní roztažností. Kovy jsou navzájem pevně spojené, díky čemuž změna délky kovů zajistí prohnutí tvaru dvojice kovů, naznačeno na obr. 3.1. Na jednom z dvojice kovů je realizován kontakt a tak v závislosti na změnách teploty dochází k regulaci s hysterezí.





Obr. 3.1 Bimetalový proužek

Teplotní závislost elektrického odporu resp. vodivosti má v zásadě dva rozdílné charaktery – charaktery nárůstu či poklesu. Kovové vodiče s elektronovou vodivostí vykazují nárůst elektrického odporu se zvyšující se teplotou. Oproti tomu polovodiče vykazují pokles elektrického odporu se zvyšující se teplotou. Křivky obou rozdílných teplotních závislostí ukazuje obrázek 3.2.



Obr. 3.2 Graf teplotních závislostí elektrického odporu kovu a polovodiče

Principem odporových kovových teploměrů (RTD – Resistance Temperature Detector) je závislost elektrického odporu kovu na teplotě. Většina kovových vodičů se vyznačuje

přímou úměrou elektrického odporu a teploty. Jediným teplotně závislým parametrem je totiž relaxační čas elektronů  $\tau \sim 1/T$ . Požadavky na materiál použitý k výrobě odporových kovových teploměrů jsou minimální proměnlivost teplotního součinitele odporu v závislosti na čase, malá hystereze a netečnost kovů vůči izolačním nebo ochranným materiálům teploměru. Odporové kovové teploměry jsou nejčastěji tvořeny z čistých kovů platiny, niklu, mědi, stříbra a zlata a ze slitin stříbro-zlato a platina-iridium. Platina je vysokoteplotně tavitelná, velmi chemicky odolná a dosažitelná vysoké čistotě.

Citlivost závislosti elektrického odporu na teplotě může být popsána v absolutních i relativních hodnotách. Rovnice (1) ukazuje výpočet relativní citlivosti odporového kovového teploměru tzv. teplotní koeficient rezistivity (*TKR* nebo  $\alpha$ ) v rozsahu teplot 0 °C až 100 °C. Teplotní koeficient rezistivity (elektrického odporu) je uveden v jednotkách počtu bodů z milionu na stupeň Celsia (ppm/°C). Příklady hodnot teplotních koeficientů rezistivity vybraných materiálů ukazuje tab. 3.1. Rovnice (2) popisuje výpočet absolutní citlivosti odporového kovového senzoru  $K_{RTD}$  v jednotce ohm na stupeň Celsia. Rovnice (3) naznačuje výpočet elektrického odporu senzoru nenulové teploty. Druhá část součtu této rovnice vyjadřuje nárůst elektrického odporu v ohmech při změně teploty o  $\Delta T$ .

Tab. 3.1 Tabulka hodnot teplotních koeficientů rezistivity vybraných materiálů

materiál	platina	nikl	chrom-nikl	měď	zlato
<b>TKR (ppm/°C)</b>	3920	6000	400	3900	3400

$$TKR \text{ nebo } \alpha = 10^6 \frac{R_{100} - R_0}{(100 - 0)R_0} \quad (\text{ppm}/^\circ\text{C}) \quad (1)$$

kde  $R_0$  je elektrický odpor senzoru při 0 °C

a  $R_{100}$  je elektrický odpor senzoru při 100 °C

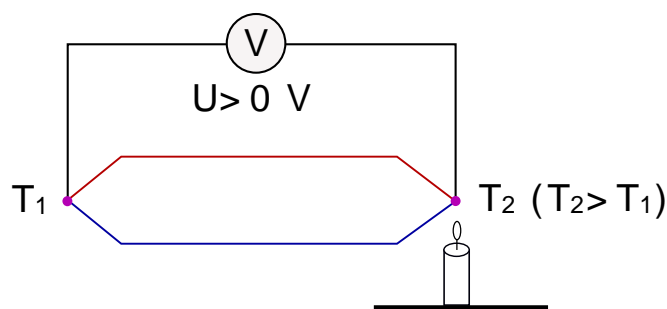
$$K_{RTD} = \alpha R_0 10^{-6} = \frac{R_{100} - R_0}{(100 - 0)} \quad (\Omega/^\circ\text{C}) \quad (2)$$

$$R_T = R_0 + (\alpha R_0 \Delta T) \cdot 10^{-6} \quad (\Omega) \quad (3)$$

Termistory jsou polovodičové prvky vyznačující se výraznou závislostí elektrického odporu na teplotě. Strmost změny elektrického odporu bývá u termistorů od pětinasobku až do padesátinasobku strmosti elektrického odporu odporových kovových teploměrů. Podle

charakteru závislosti elektrického odporu dělíme termistory na negativní a pozitivní. U negativních termistorů odpor s teplotou klesá, zatímco u pozitivních vzrůstá. Pozitivní termistory mají obdobnou charakteristiku závislosti elektrického odporu resp. vodivosti na teplotě jako kovové vodiče, zatímco negativní termistory vykazují opačnou závislost. Negativní termistory jsou nejčastěji tvořeny keramickými metodami z vhodné směsi oxidů kovů, např. železa, kobaltu, niklu, titanu, manganu, barya a mědi. Pozitivní termistory jsou tvořeny Seignettovými solemi.

Na rozdíl od teplotní závislosti jednotlivých materiálů termoelektrický jev (Seebeckův jev) je založen na teplotní závislosti spoje dvou kovů na teplotě. Mají-li dva spoje dvou kovů, které tvoří termočlánek, rozdílnou teplotu, jsou i kontaktní napětí obou rozhraní různá. Proto výsledné napětí měřené mezi těmito rozhraními je nenulové, a tudíž termočlánek lze využít, jako zdroj elektrického napětí viz obr. 3.3. Obvodem prochází elektrický proud a nastává tzv. Seebeckův jev [5].



Obr. 3.3 Znárodnění měření termoelektrického jevu [5]

### 3.1 Konvenční teplotní senzory

Na základě výše popsaných jevů lidstvo disponuje nespočtem variací teplotních senzorů využitelných v závislosti na aplikaci, přičemž nasazení v daném problému určujeme základními parametry jako maximální měřitelná absolutní teplota, teplotní rozsah, přesnost měření, citlivost měření na relativní vlhkost prostředí, chemické složení daného teploměru a možnosti nakontaktování senzoru atd.

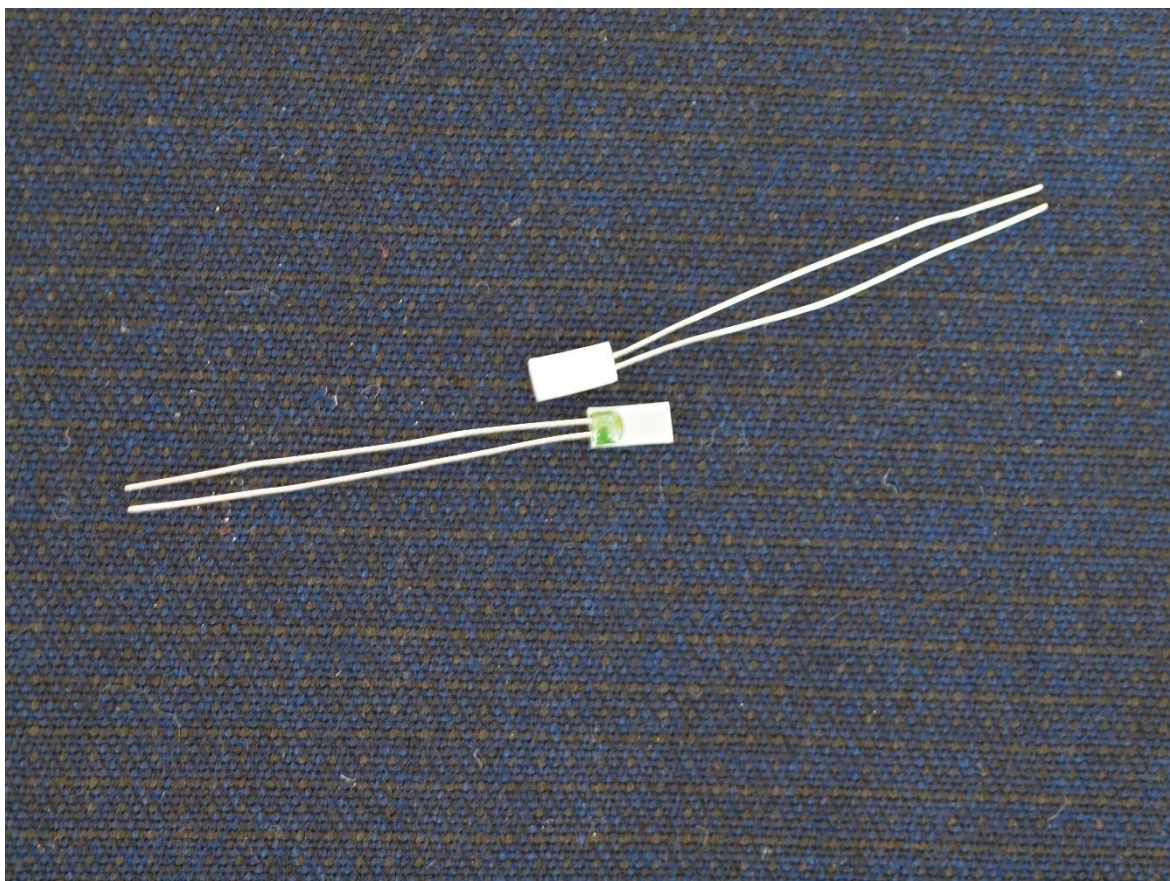
Teplotní závislost elektrického odporu je nejčastěji využita u platinových senzorů teploty. Jedná se o platinovou dráhu resp. meandr nanesený obvykle na keramickém tělísku a na okrajích kontaktovaný drátky. Takovéto platinové senzory se standardně vyrábějí

ve verzích Pt100, Pt500 a Pt1000 přičemž číselná hodnota uvádí velikost elektrického odporu v ohmech při teplotě 0 °C. Teplotní koeficient rezistivity Pt1000 je 3850 ppm/°C. Na obr. 3.4 je ukázka komerčních senzorů Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná, velikost keramického tělíska je 4,3 mm x 2 mm. Rovnice (4) slouží pro přepočet elektrického odporu platinového teploměru na teplotu.

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

kde pro platinu dosazujeme konstanty:

$$A = 3,908 \cdot 10^{-3} \quad (^\circ\text{C}^{-1}), B = 5,775 \cdot 10^{-7} \quad (^\circ\text{C}^{-2})$$



*Obr. 3.4 Fotografie senzorů Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná*

Teplotní závislost elektrického odporu je využívána také termistory. Termistory se vyrábějí ve dvou variantách PTC (positive temperature coefficient) a NTC (negative temperature coefficient). Termistory PTC mají obdobnou charakteristiku závislosti

elektrického odporu resp. vodivosti na teplotě jako kovové vodiče, zatímco termistory NTC vykazují opačnou závislost.

Termočlánky využívají termoelektrického jevu, což v praxi znamená aplikaci sváru dvou rozdílných kovů. Na volných koncích těchto kovů je měřeno termoelektrické napětí, k jehož definici je potřeba znát teplotu měřícího konce jednoho z kovů tzv. studeného konce. Mezi nejpoužívanější termočlánky se řadí typ J a K. Termočlánek typu J je tvořen svárem kovů železa a konstantanu, které umožňují měření v rozsahu 0 °C až 750 °C s citlivostí 52,3  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Termočlánek typu K je tvořen svárem kovů chromu a hliníku, které umožňují měření v rozsahu -200 °C až 1250 °C s citlivostí 40,8  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Hojně využívané senzory teploty jsou také dostupné v různých provedeních na čipu. Například integrovaný obvod Sensirion SHT15 dokáže měřit relativní vlhkost a teplotu v rozsahu -40 °C až 124 °C. Oba senzory jsou v čipu spojeny s analogově digitálním převodníkem a digitální výstup a ovládání čipu je zajištěno sběrnicí I<sup>2</sup>C. Jiným provedením senzoru teploty v integrovaném obvodu je Analog devices TMP05 produkující PWM signál v závislosti na teplotě. Rozsah TMP05 je -40 °C až 150 °C. Samozřejmě existuje nespočet dalších komerčních teplotních senzorů, jež především z důvodů vysoké ceny a velikosti vylučují.

### 3.2 Textilní teplotní senzory

V oblasti textilních senzorů není zatím dostatek informačních zdrojů a neexistují normy pro návrh aplikací. Komerční vyšívané senzory zatím nejsou k dispozici přesto lze v odborné literatuře najít některé zajímavé úvahy i technická řešení související s touto problematikou.

Polský vědec Maciej Sibinski s kolegy v článku „Flexible Temperature Sensors on Fibers“ představuje teplotní senzor – termistor vytvořený nanosením uhlíkových nanotrubic na nit. Výsledná sensorová nit vzniká nanosením uhlíkové polymerní pasty na nosné médium, následným kontaktováním a enkapsulováním, čímž je dosaženo malých rozměrů a dobré pružnosti [6].

Švýcarský vědec Danick Briand s kolegy v článku „Why Going Towards Plastic and Flexible Sensors?“ představuje teplotní senzory tištěné na plastické substráty a tkaný senzor plynů s teflonovou krycí vrstvou [7].

Švýcarský vědec Thomas Kinkeldei s kolegy v článku „Development and evaluation of temperature sensors for textile integration“ představuje odporové teplotní senzory na bázi platiny, které je možno velkoplošně vyrábět litografickou metodou na kaptonovém substrátu. Následně jsou elementy rozřezány na 500  $\mu\text{m}$  široké pruhy (tzv. thread-like structures) a integrovány do textilních pásů během výrobního procesu pomocí tkalcovského stroje [8].

Inovativní nitě, využitelné jako senzory či akční členy, integrované do textilií konvenčními nebo nově vzniklými textilními metodami mají velký potenciál v budoucnosti smart textilií zasahujících do několika disciplinárních oborů vědy a života. Velkou výhodou takovýchto senzorů a akčních členů je nekonečná variabilita tvarů a velikostí ploch snadno vyrobitelná změnou vektorového návrhu počítačového vzoru a následným vyšitím požadovanými parametry. Konvenční senzory teploty (Pt1000, termistory, termočlánky), stávající z pevných objemných součástí, musí být v současné době aplikovány pro potřeby plošného měření maticově. To znamená zanesení dalších přidaných materiálů, vyhodnocení (průměrování) hodnot několika senzorů pro pouhé zjištění teploty několika čtverečních centimetrů textilie. Odporová nit s relativně vysokým teplotním koeficientem elektrického odporu může být prošita libovolnou plochou a kontakty mohou být svedeny do vzájemné blízkosti. Přičemž uchycení samotné sensorové nitě obstarává právě tato nit a k ní zrcadlově přišívaná pomocná nevodivá nit.

## 4 Praktická část

Po rozsáhlé rešerši trhu a zamítnutí možnosti použití nití vrstvených uhlíkovými nanotrubicemi a obdobných technologií bylo rozhodnuto o užití nitě složené z polyesterových vláken a kovových mikrodrátků. V projektu ELTEX pracovníci Katedry technologií a měření (KET) a Regionálního inovačního centra elektrotechniky (RICE) vyvinuli několik takovýchto nití. Seznam výběru nití a jejich složení zobrazuje tabulka 4.1. Kde jemnost příze v jednotkách tex vyjadřuje hmotnost textilie na jednotku délky, konkrétně hmotnost 1 metru příze v miligramech.

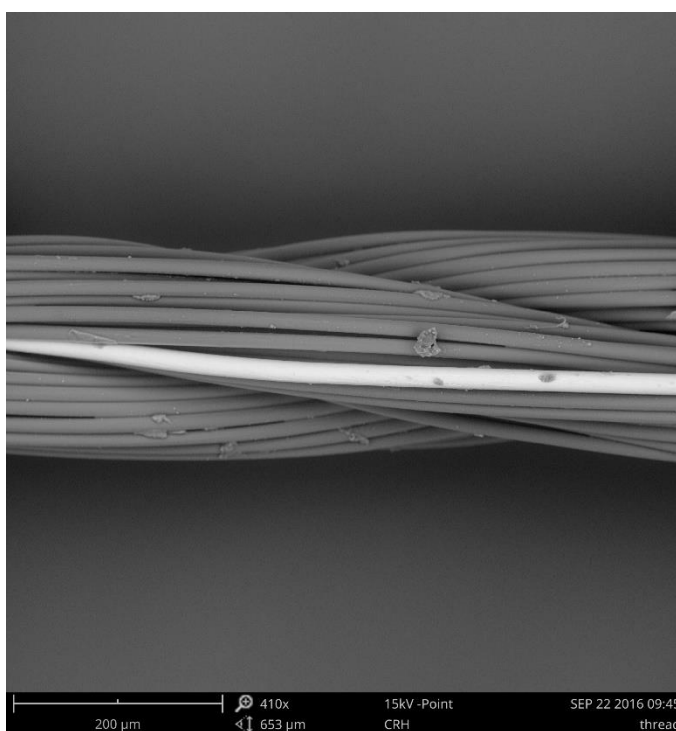
Tab. 4.1 Výběr nití z projektu ELTEX a jejich parametry

Název	Složení	Jemnost příze (tex)	Počet drátků (ks)	Elektrický odpor ( $\Omega/m$ )
7A	92% PES/ 8% kov 1.4301	38	1	2400
7B	85% PES/ 15% kov 1.4301	41	2	1200
25A	31% PES/ 69% mosaz	72	8	7,7
29A	48% PES/ 52% mosaz	48	4	19,6
32C	23% PES/ 51% mosaz/ 26% Silver-Stat	72	6	9,9
30C	42% PES/ 23% mosaz/ 35% Silver-Stat	54	2	29,7

Základní dělení zmíněných nití bylo třídění dle velikosti měrného elektrického odporu a to na nitě vodivé a odporové. Vzhledem k aplikaci nitě coby odporového kovového teploměru byly vhodnou volbou odporové nitě. Z tab. 4.1 se tedy nabízejí nitě s označením 7A a 7B, přičemž nit 7B byla zamítnuta ze zjevného důvodu nevýhody dvou mikrodrátků seskaných spolu s polyesterovými multifilamentními vlákny. V takovémto řešení bylo patrně velké množství sérioparalelních kombinací kontaktů mezi mikrodrátky, což vedlo k nahodilým změnám elektrického odporu senzoru nejen při mechanickém namáhání sensorového elementu, ale i například při teplotním namáhání vlivem teplotní roztažnosti. Za vhodnou nit tedy byla zvolena 7A, která byla použita pro všechny senzory vytvořené pro tuto diplomovou práci.

Nit 7A je inovativní hybridní odporová nit, která je určena především pro integraci elektronických součástek do textilií a je chráněna českým užitným vzorem CZ 28603 U1.

Hybridní nit je složena ze tří pramenů, z nichž každý obsahuje 33 polyesterových (PES) multifilamentních vláken. V jednom z pramenů je integrován mikrodrátek z nerezové oceli. Struktura hybridního odporového vlákna je znázorněna na obr. 4.1, kde světlejší vlákno je odporový mikrodrátek o průměru 20  $\mu\text{m}$  vyrobený z nerezové austenitické chrom-niklové oceli 1.4301 (AISI 304) a zbylá tmavá vlákna jsou vyrobena z PES kontinuálních monofilů se středním průměrem 14,5  $\mu\text{m}$  (každý monofil). Použitý 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 je odolný vodě, páře a nízké koncentraci anorganických a organických kyselin [11].



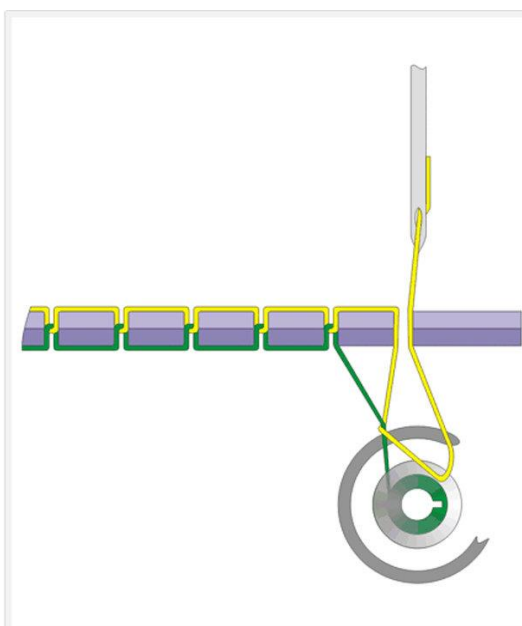
*Obr. 4.1 Struktura hybridní odporové nitě (snímek z elektronového mikroskopu)*

Mikrodrátek může být potažen smaltem pro zajištění dodatečné elektrické izolace. Silikonový lubrikační prostředek, který se používá k ochraně nití před třením vznikajícím během vyšívání, pokrývá povrch hybridního materiálu. Hybridní odporová nit byla vyvinuta a rozsáhle testována na Západočeské univerzitě v Plzni ve spolupráci s firmou VÚB a. s. (Ústí nad Orlicí, Česká republika).

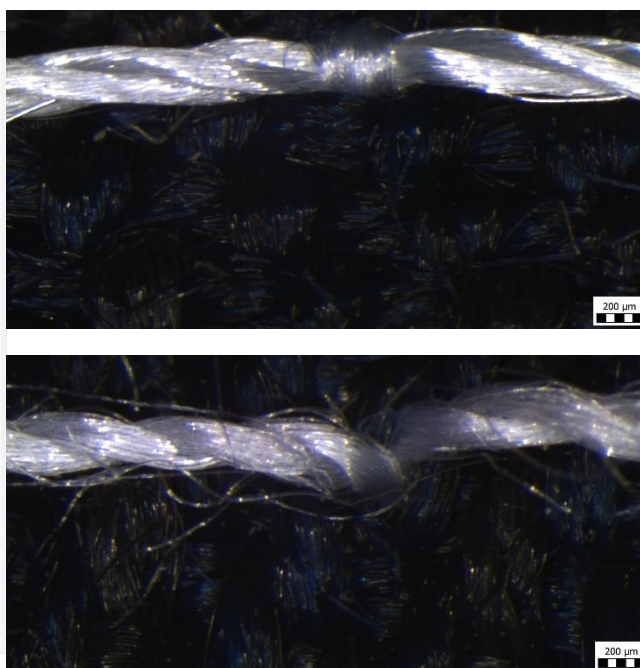


#### 4.1 Návrh topologií textilního teplotního senzoru

Při realizaci vyšívacích vzorů muselo být počítáno s několika faktory. Důležité bylo nedestruktivní vyšítí odporové nitě. Vrchní nit, která byla všívána šicím strojem pomocí cyklického pohybu jehly skrz nosný materiál, byla provlečena kolem člunku se spodní nití viz obr. 4.2. Vrchní nit byla více mechanicky namáhána a vniklo významně vyšší riziko vzniku mikrotrhlin ve struktuře mikrodrátku. Z toho důvodu a na základě provedených experimentů byla zvolena spodní nit jako vhodnější pro realizaci vyšívacího teploměru. Pro horní nit byla použita nevodivá polyesterová nit. Proto byla sensorová niť navinuta do člunku šicího stroje na pozici spodní nitě, přičemž napnutí nití bylo konfigurováno tak, aby spodní nit pokud možno nebyla vrchní nití vtahována do vnitřní struktury nosného substrátu viz obr. 4.3.



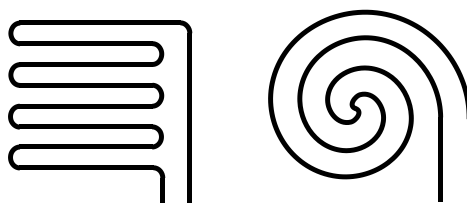
Obr. 4.2 Princip šicího stroje s člunkem. Průběh vyšívacího cyklu s nitmi stejného napnutí.



Obr. 4.3 Pohledy shora a zdola na přišíťí hybridní odporové nitě po konfiguraci napětí člunku šicího stroje

Za účelem testu vhodnosti vyšítých tvarů byly navrženy dva tvary meandrů viz obr. 4.4, které byly realizovány vyšítím na nosný materiál. Oba meandry byly navrženy k vyšítí sensorovým vláknem délky jednoho metru. První z meandrů hřebenového tvaru se zaoblenými rohy s celkovou plochu  $20 \text{ cm}^2$  je naznačen na obrázku 4.4 vlevo. Zaoblené rohy meandru byly navrženy z důvodu menšího namáhání nitě během vyšívání. Rozteč

mezi jednotlivými nitěmi meandru byla zvolena 2,5 mm. Druhý meandr, vykreslený na obrázku 4.4 vpravo, byl navržen do tvaru bifilární spirály, což optimalizovalo napnutí nitě a snižovalo pravděpodobnost poškození během procesu vyšívání. Vzdálenost jednotlivých vyšitých nití spirály byla zvolena na 3 mm a senzor zabíral plochu 24 cm<sup>2</sup>.



*Obr. 4.4 Dvě topologie navržených sensorových meandrů*

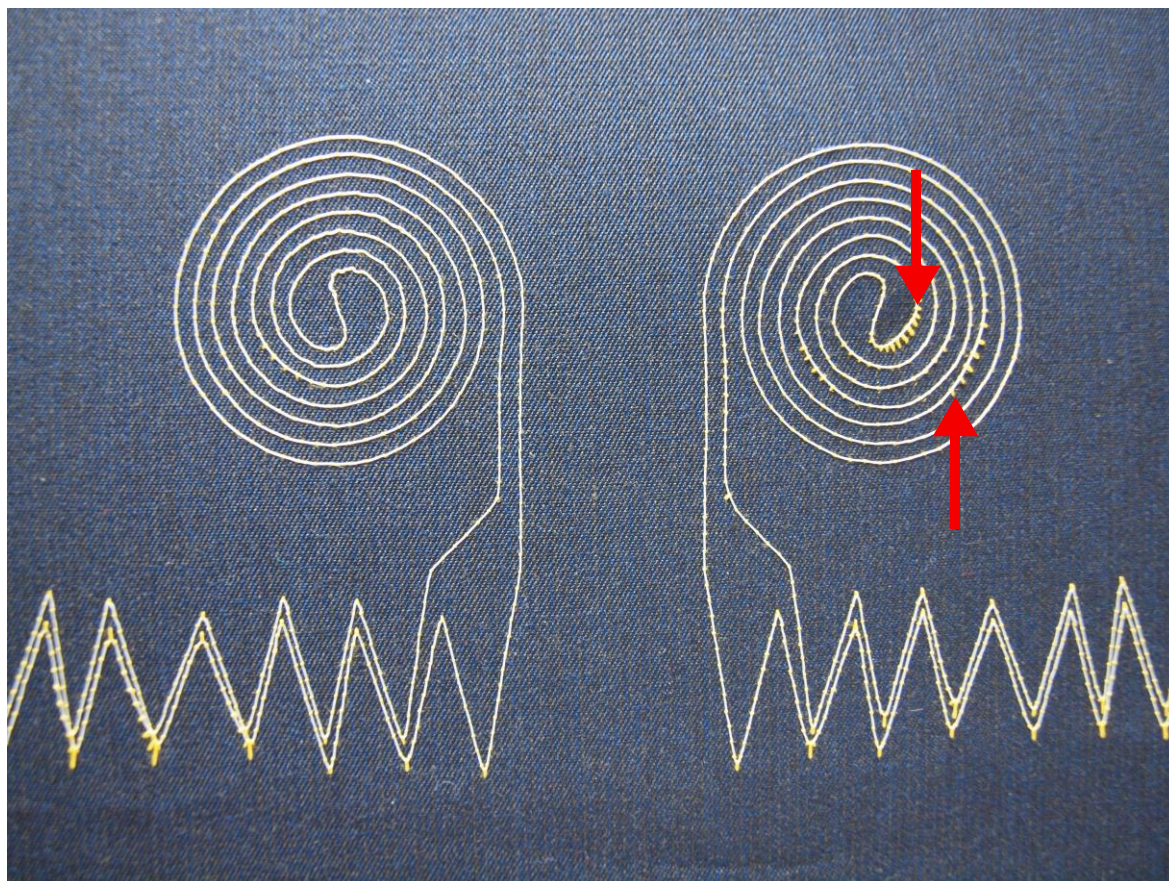
#### **4.2 Vyšítí, kontaktování a testování různých topologií senzoru**



*Obr. 4.5 Vyšívací stroj Bernina B 750*

Pro vyšití prototypů senzorů byl použit poloprofesionální šicí a vyšivací stroj Bernina B 750, který disponoval schopností vyšití elektronicky navržených tvarů ve vektorovém formátu a to tak, že osově i polohově stabilní patka sloužila k vedení vyšivací jehly s nití po pohybujícím se nosném materiálu.

Nosný materiál byl upevněn do rámu předem určené velikosti, který se dle programového nastavení pohyboval ve dvou osách. Vyšivací stroj Bernina B 750 s nosnou textilií upnutou do rámu ukazuje obrázek 4.5. Bohužel šicí stroj Bernina B 750 neumožňoval rotační pohyb rámu s nosným materiálem, což by umožnilo vyšívání ve stále dopředném pohybu a tedy konstantní napnutí a namáhání nitě v celé ploše sensorových meandrů. Z výsledků testu vyšitých motivů je patrné, že při šití v šikmém a zpětném směru je kvalita výšivky nižší než při šití v přímém směru. Následky takové nekvality jsou znázorněny na obr. 4.6.



Obr. 4.6 Vyšivaná spirála s naznačenými následky nekvality vyšívání

Textilním substrátem byl zvolen, dle plánovaného upotřebení senzoru v pracovních oděvech a především v hasičských zásahových kabátech, tkaný textil vyvinutý společností

Vochoc a využíváný na vrchní vrstvě hasičských obleků. Tento textil o plošné hustotě  $230 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  byl vyroben z následujících materiálů: 53% KERMEL®, 39% Lenzing™ FR, 6% Technora a 2% antistatická vlákna. Tkanina také obsahuje fluorokarbonovou úpravu pro odolnost vůči vodě a chemické kapalině. Tato úprava je nehořlavá. Tkanina může odolat teplotě  $250^\circ\text{C}$  po dobu 20 s.

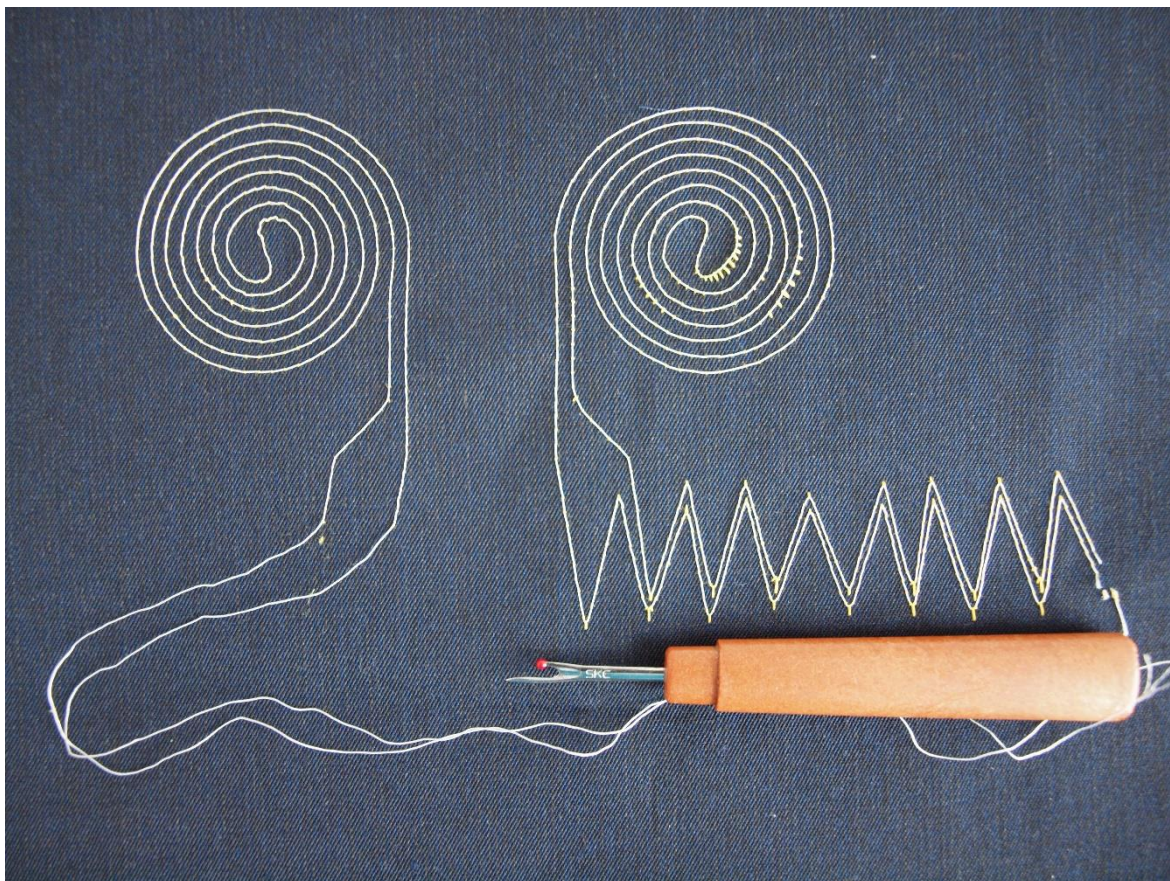
Vyšší počet oblouků menšího průměru u hřebenového meandru zvyšoval pravděpodobnost poškození mikrodrátku v průběhu vyšívacího cyklu. Toto poškození bylo zřejmě způsobeno následkem nehomogenního profilu mikrodrátku v celé jeho délce. Lokální zúžení průměru mikrodrátku bylo zapříčiněno vyšším namáháním nitě během vyšívacího procesu, když se významně měnil směr vyšívaného motivu. Z tohoto důvodu byl dále používán pro účely testování už jen spirálový motiv.

Následným krokem bylo logicky dosažení spolehlivého elektrického kontaktu. Pro vytvoření spolehlivého laboratorního kontaktu, nepoužitelného v cílové aplikaci, jen pro účely vývoje vyšívaného teplotního senzoru, bylo realizováno několik provedení kontaktů. Všechny dále popsané provedení kontaktů využívají volně vloženou, nijak nepřišitou odporovou nit. Volné konce odporové nitě vyšívaného teplotního senzoru byly dosaženy odpáráním nitě vyšité delším stehem do pilovitého tvaru. Obrázek 4.7 ukazuje nástroj použitý pro ruční páráni nitě, potřebné k realizaci kontaktu, a vlevo senzor s již odpáranou nití, vpravo senzor připravený na proces páráni.

Postup výroby prvního provedení laboratorního kontaktu zahrnoval odstranění polyesterových vláken v délce cca 2 cm pomocí žhavého pájecího hrotu, čímž vznikl konec nitě tvořený pouze odporovým mikrodrátkem. Následné vložení tohoto konce nitě do krimpovacího konektoru spolu s kovovým pinem a uzavření konektoru krimpovacími kleštěmi. Výsledkem bylo časté přerušování mikrodrátku již v průběhu krimpování, u provedených kusů byla pozorována náchylnost k snadnému přetržení nebo vytažení nitě z kontaktu.

Druhá metoda realizace laboratorního kontaktu zahrnovala také odstranění polyesterových vláken pro obnažení odporového mikrodrátku tentokrát v délce 10 cm. Tento konec odporové nitě tvořený samotným chromniklovým mikrodrátkem byl následně mnohonásobně obtočen kolem kovového pinu. Poslední závit byl tvořen již kompletní hybridní odporovou nití včetně polyesterových vláken zakončený uzlem. Pin byl následně

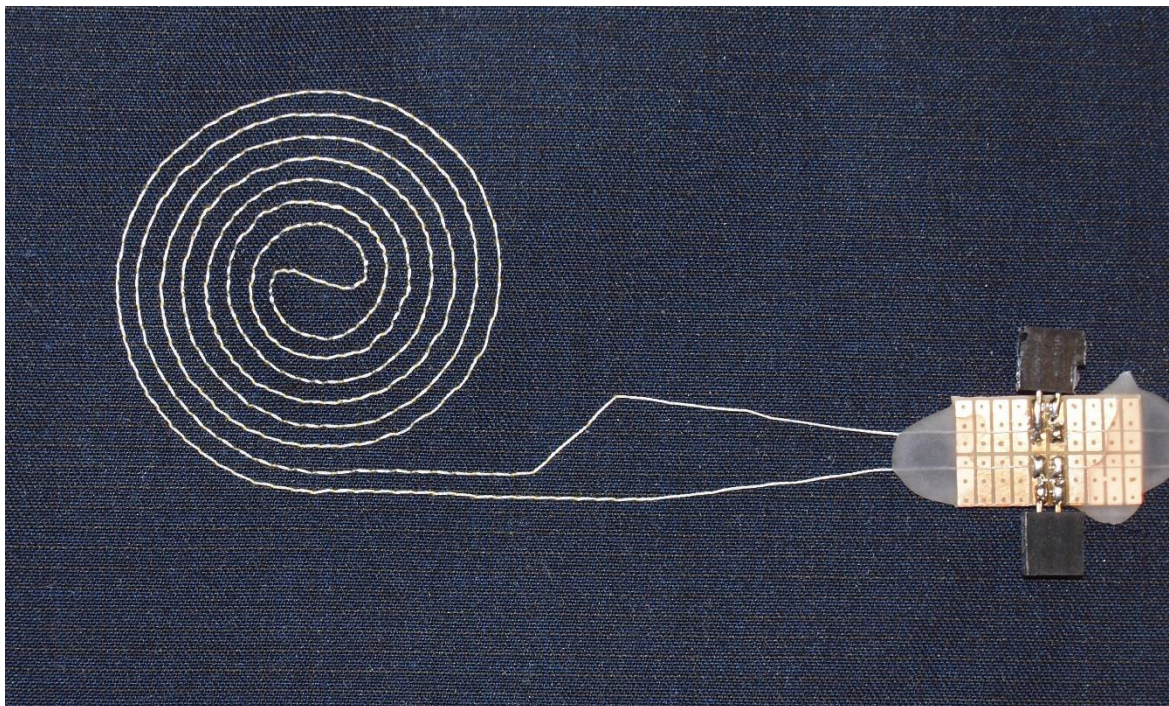
vložen do krimpovacího konektoru a zalisován pomocí krimpovacích kleští. Toto řešení představovalo relativně pevný ale elektricky nestabilní kontakt. Část pinu byla tedy zalita cínem, čímž však došlo k zkřehnutí přechodu kontakt – nit a tím se zvýšilo riziko snadného přetržení odporového mikrodrátku.



*Obr. 4.7 Výroba volných konců odporové nitě.*

Třetí nejefektivnější způsob realizace laboratorního kontaktu inovativní hybridní odporové nitě byl dosažen za pomoci vyleptané desky plošného spoje. Nejprve byla deska plošného spoje s měděným pokovením vyleptána do struktury tabulky obdélníků (kontaktních plošek) čítající dva sloupce a deset řádek, řádky byly navrženy v rozteči 2,54 mm. K prostředním dvojicím kontaktních plošek byla připájena z každé strany dvojice kontaktních dutinek. Následně byly odporové nitě vyšitého sensorového elementu napnuty přes celou délku jednotlivých sloupců. Na obou koncích byly nitě přes okraj desky plošného spoje pevně fixovány. Fixace byla provedena epoxidovou rychleschnoucí zalévací hmotou, určenou k zalévání součástek před vybroušením plochy pro destruktivní metody diagnostiky pájených spojů. Tím tedy byly připraveny natažené odporové nitě

vedoucí přes kontaktní plošky. Stabilního elektrického propojení nitě a plošky bylo dosaženo zakápnutím potřebné oblasti žhavým cínem. Vzhledem k měření čtyřbodovou metodou, každá nit byla zakápnuta cínem na dvou sousedních kontaktních ploškách, které byly předem připraveny letováním krajních kontaktních dutinek. Výsledný vyšívaný teplotní senzor topologie bifilární spirály s laboratorním kontaktem ukazuje obrázek 4.8.

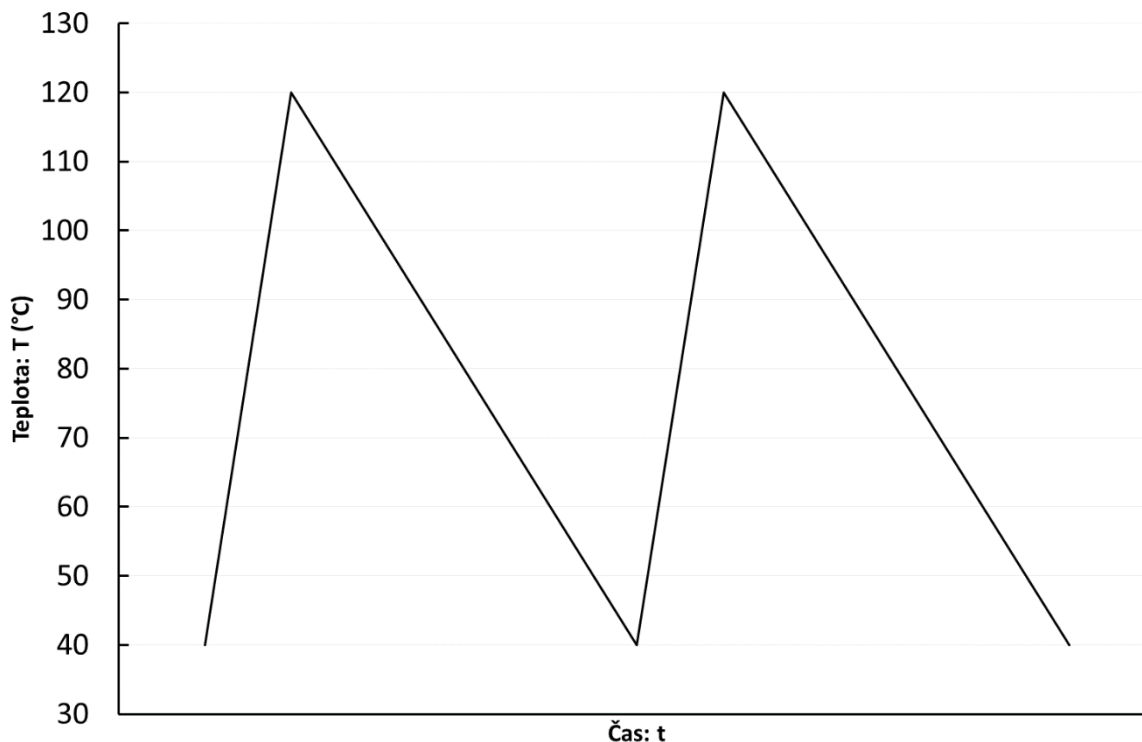


*Obr. 4.8 Vyšívaný teplotní senzor s laboratorním kontaktem*

### 4.3 Kalibrace vyšitých senzorů

Vyšité senzory byly nejprve měřeny rychlým nárůstem a následným poklesem teploty v rozsahu 40 °C až 120 °C viz obr. 4.9 v programovatelné laboratorní peci SalvisLAB thermocenter TC40. Během nárůstu teploty byl integrovaný ventilátor laboratorní pece spuštěn na 60 % svého výkonu, v průběhu poklesu teploty byl ventilátor spuštěn na 100 % svého výkonu. Měřicí zařízení bylo použito Keithley 2700 (multimeter / data acquisition system) rozšířené multiplexní měřicí kartou 7708. Tato měřicí soustava byla osazena měřicími kabely zakončenými piny rozteče 2,54 mm pro kontaktování vyšívaných teplotních senzorů a komerčních teplotních senzorů Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná. Měřicí zařízení bylo použito v režimu ukládání dat do připojeného počítače, s periodou odečtu všech kanálů 10 sekund. Všechny kanály měřily elektrický odpor čtyřbodovou metodou. Tímto rychlým testem byly vyřazeny nefunkční vzorky,

nefunkčnost mohla být způsobena přetržením odporového mikrodrátku v průběhu vyšívacího cyklu, nebo špatným provedením laboratorního kontaktu, jehož výroba byla popsána v kapitole 4.2.

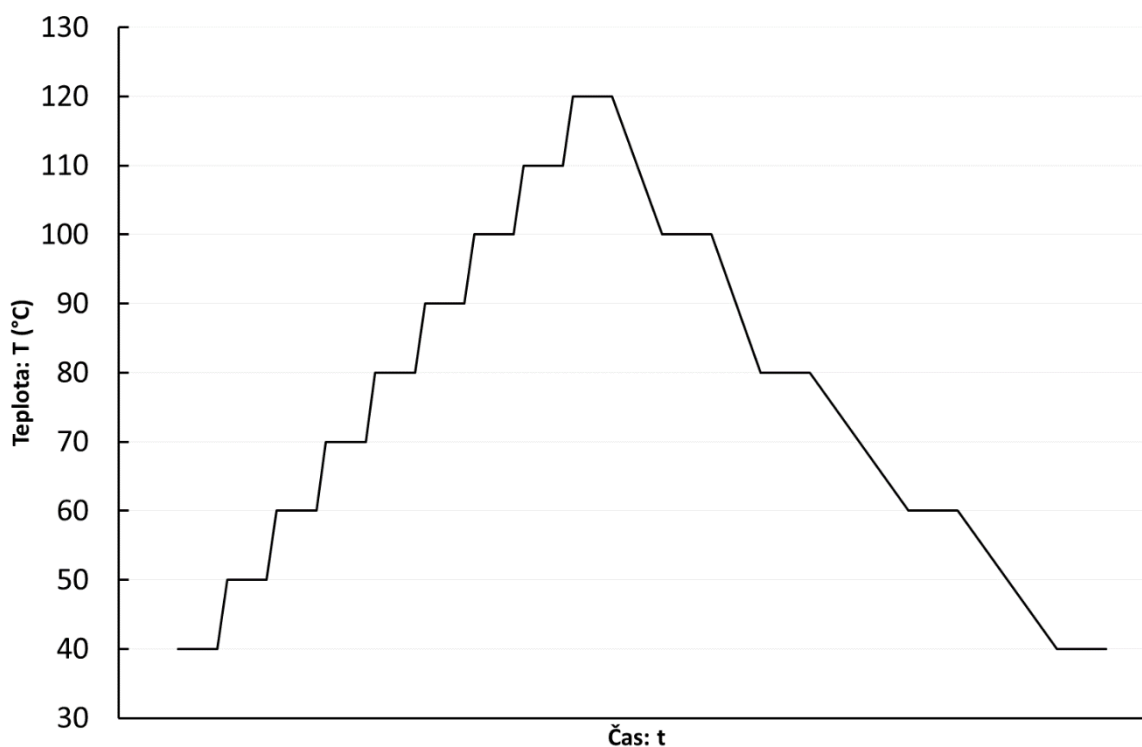


Obr. 4.9 Průběh teplot prvního kalibračního testu

Při měření hodnot ke kalibraci senzoru bylo nezbytné ustálení teplot v krocích určeného intervalu. Příčinou tohoto opatření byla rozdílná tepelná kapacita etalonu a kalibrovaného senzoru. V tomto případě jde o porovnání tepelné kapacity prodyšné textilie vrchní vrstvy hasičského obleku prošité hybridní odporovou nití, proti komerčnímu odporovému teploměru Pt1000. Tento teploměr sestává z keramického tělíska, meandru vakuově naprášené platiny, krycího laku a kontaktních drátků. Kontaktní struktura vyšívávaného teplotního senzoru, provedená poměrně maximalistickým způsobem, by svou vyšší tepelnou kapacitou neměla narušovat pozitivní vlastnosti senzoru. A to vzhledem k jejímu umístění mimo většinovou sensorovou oblast.

Z toho důvodu bylo další měření navrženo schodovitým nárůstem a poklesem teplot v intervalu 40 °C až 120 °C. Programovatelná laboratorní pec SalvisLAB thermocenter TC40 byla nastavena pro schodovitý nárůst teplot v krocích po deseti stupních Celsia. Ochlazování je proces zdlouhavější a to především při teplotách blížících se dolní mezní

teplotě 40 °C. Důvodem je, že není využito aktivní chladiivo, je pouze vháněn vzduch teploty okolního prostředí. Proto byl počet schodů poklesu teploty omezen na teploty 100 °C, 80 °C, 60 °C a 40 °C viz obr. 4.10. Během nárůstu teploty byl integrovaný ventilátor laboratorní pece spuštěn na 60 % svého výkonu, v průběhu poklesu teploty byl ventilátor spuštěn na 100 % svého výkonu. Měřicí zařízení bylo použito Keithley 2700 (multimeter / data acquisition system) rozšířené multiplexní měřicí kartou 7708. Tato měřicí soustava byla osazena měřicími kabely zakončenými piny rozteče 2,54 mm pro kontaktování vyšíváných teplotních senzorů a komerčních teplotních senzorů Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná. Měřicí zařízení bylo použito v režimu ukládání dat do připojeného počítače, s periodou odečtu všech kanálů 10 sekund. Všechny kanály měřily elektrický odpor čtyřbodovou metodou. Výsledné zapojení senzorů uvnitř pece SalvisLAB thermocenter TC40 při kalibraci ukazuje obr. 4.11.



Obr. 4.10 Schodovitý průběh teplot pro kalibraci senzorů





Obr. 4.11 Zapojení senzorů uvnitř pece SalvisLAB thermocenter TC40 při kalibraci

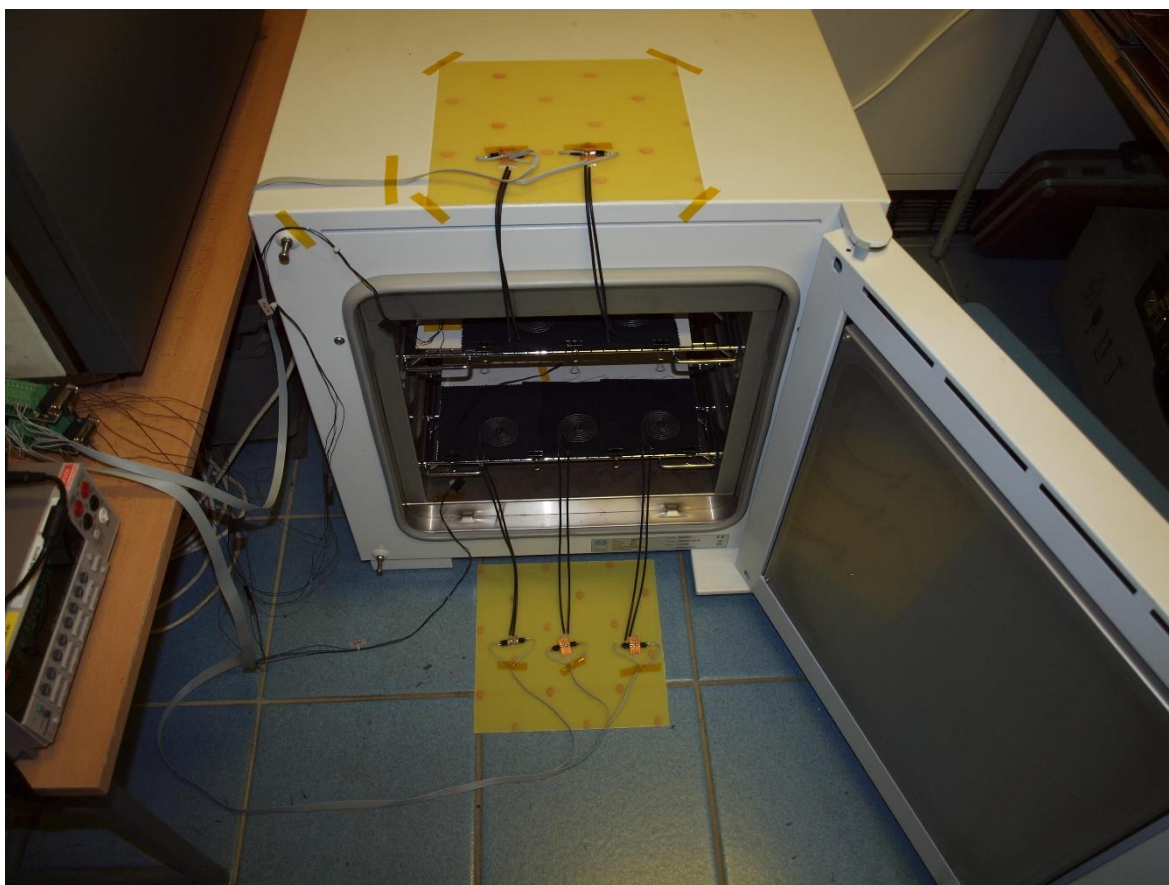
#### 4.4 Test dlouhodobé stability textilního senzoru

Pro měření dlouhodobé stability sensorových elementů byl využit postup obdobný urychlení stárnutí materiálů. Dále popsáný test probíhal v souladu s normou IEC 60068-2-2:2007 [12].

Vyšité senzory byly kontaktovány speciálně ve velké vzdálenosti od meandru. Výsledná délka nitě použité ke každému z pěti měřených senzorů se pohybovala mezi 1,67 m až 1,74 m. Volná nit sloužící k odstupu mezi sensorovým meandrem a kontaktní strukturou byla provlečena silikonovou bužírkou. Silikonová bužírka byla použita z důvodu mechanické ochrany nitě a ochrany před nahodilými elektrickými kontakty nití navzájem a s vodivými součástmi laboratorních zařízení. Sensorové elementy a kontrolní senzory Pt1000 byly vloženy do laboratorní pece Ecocell EC 55. Kontakty vyšíváných teplotních senzorů byly předsunuty před těsnění pece, kde byly propojeny s měřicí kabeláží. Vzhledem k použití pouze laboratorních kontaktů bylo rozhodnuto o nevystavení

těchto kontaktů testu dlouhodobé stability, kontakty by mohli zanést chyby do tohoto měření.

Suška Ecocell byla zapnuta na konstantní teplotu 125 °C po dobu 1000 hodin. Měřicí zařízení bylo použito Keithley 2700 (multimeter / data acquisition system) rozšířené multiplexní měřicí kartou 7708. Tato měřicí soustava byla osazena měřicími kabely zakončenými piny rozteče 2,54 mm pro kontaktování vyšíváných teplotních senzorů a komerčních teplotních senzorů Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná. Měřicí zařízení bylo použito v režimu ukládání dat do připojeného počítače, s periodou odečtu všech kanálů 10 minut. Všechny kanály měřily elektrický odpor čtyřbodovou metodou. Výsledné zapojení laboratorní úlohy ukazuje obr. 4.12.

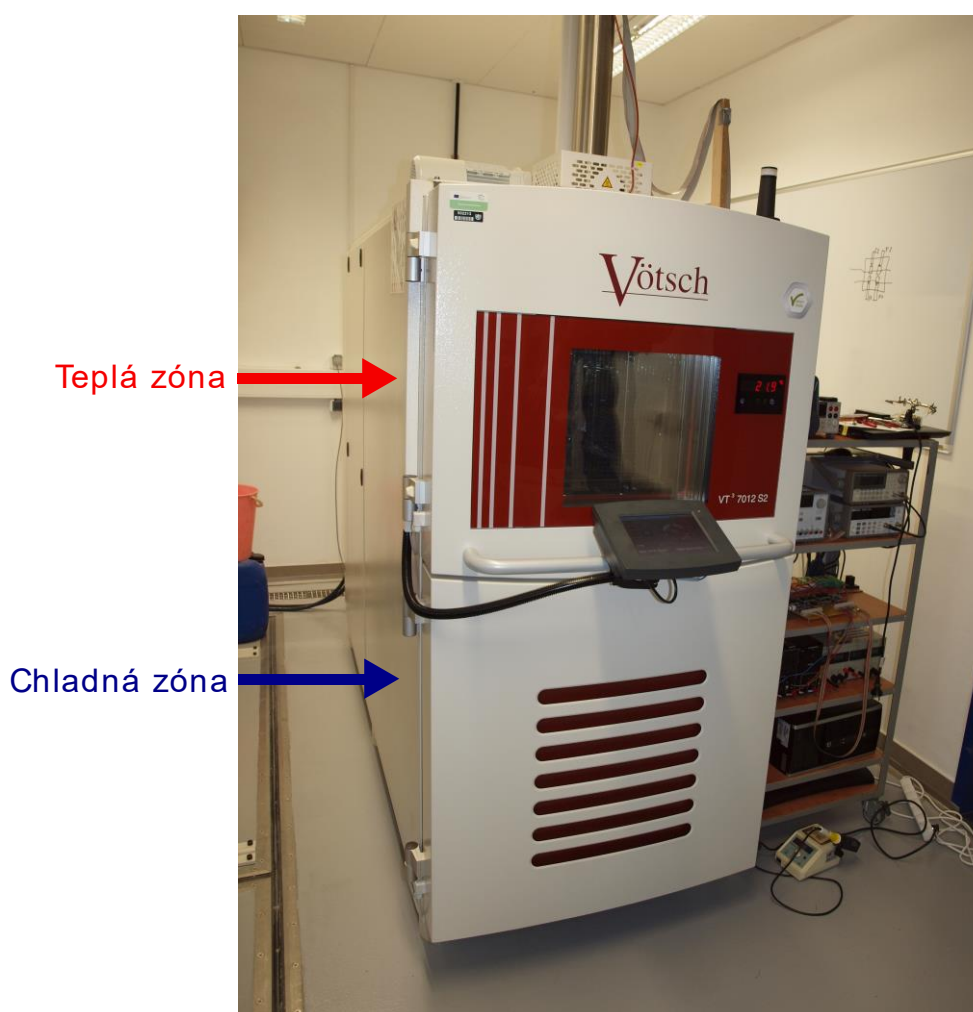


*Obr. 4.12 Zapojení senzorů v průběhu testu dlouhodobé stability*

#### **4.5 Měření reakce senzoru na skokovou změnu teploty**

Měření bylo konfigurováno pro test porovnání reakce na skokovou změnu teploty vyšíváného senzoru a komerčního senzoru Pt1000. Skoková změna teploty testovaných

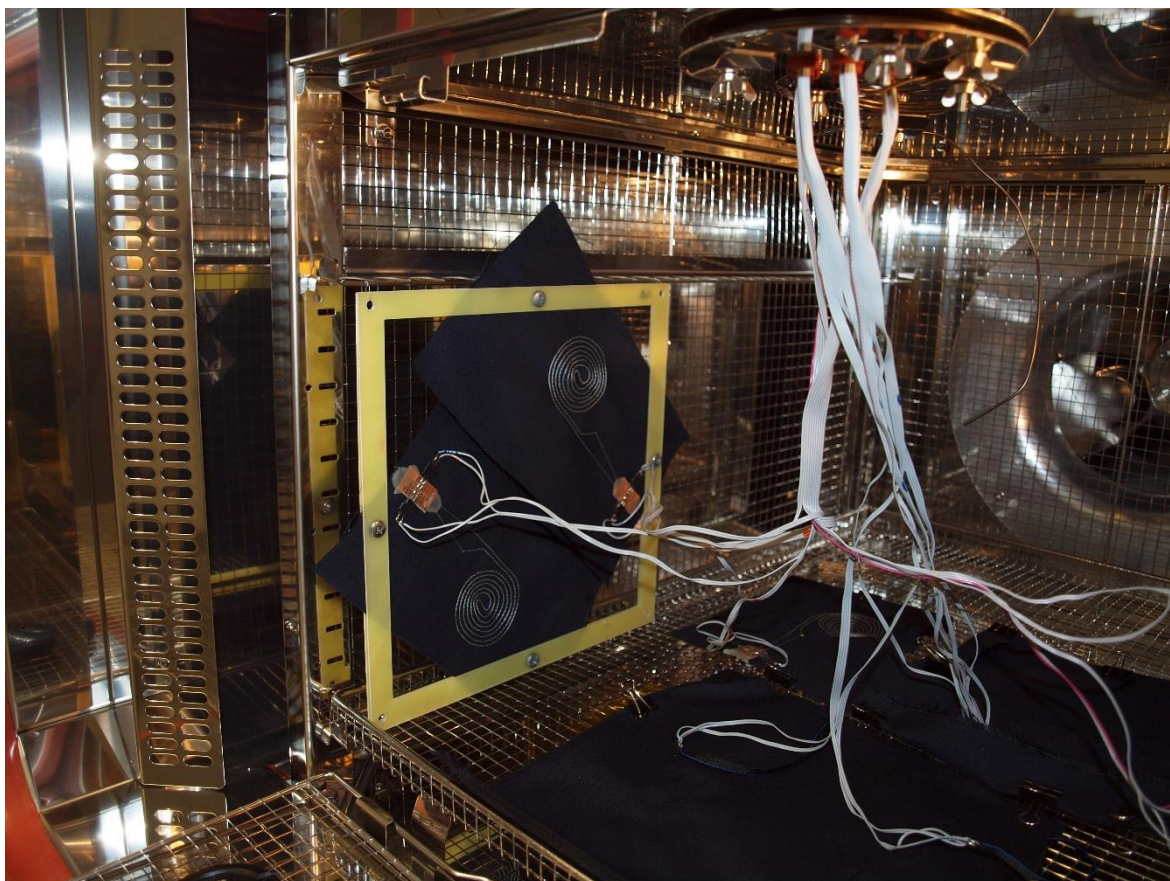
elementů byla zajištěna teplotní šokovou testovací komorou Vötsch VT3 7012 S2. Tato testovací komora viz obr. 4.13 je tvořena dvěma vertikálně uspořádanými nezávisle na sobě fungujícími komorami. Spodní z dvojice komor tzv. chladná zóna je koncipována pro udržení konstantní teploty nastavitelné od  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vrchní z dvojice komor tzv. teplá zóna je koncipována pro udržení konstantní teploty nastavitelné od  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dále teplotní šoková testovací komora obsahuje testovací prostor tvořený drátěným košem o objemu 120 l. Strop koše přechází kabelovými průchodkami ve vertikální komín, což je jediný vstup měřicí kabeláže. Koš je umístěn na vertikálním motorovém posuvu, kompletní přesun mezi zónami zvládá do deseti vteřin.



Obr. 4.13 Teplotní šoková testovací komora Vötsch VT3 7012 S2

Teplá zóna byla nastavena na konstantní teplotu  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Chladná zóna byla nastavena na konstantní teplotu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Test byl tvořen osmi cykly. Každý cyklus obsahoval patnáctiminutové ustálení v teplé zóně, desetivteřinový přejezd z teplé do chladné zóny.

Patnáctiminutové ustálení v chladné zóně a desetivteřinový přejezd z chladné do teplé zóny. Měřicí zařízení bylo použito Keithley 2700 (multimeter / data acquisition system) rozšířené multiplexní měřicí kartou 7708. Tato měřicí soustava byla osazena měřicími kabely zakončenými piny rozteče 2,54 mm pro kontaktování vyšíváných teplotních senzorů a komerčních teplotních senzorů Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná. Měřicí zařízení bylo použito v režimu ukládání dat do připojeného počítače, s periodou odečtu všech kanálů 2,5 sekundy. Všechny kanály měřily elektrický odpor čtyřbodovou metodou.



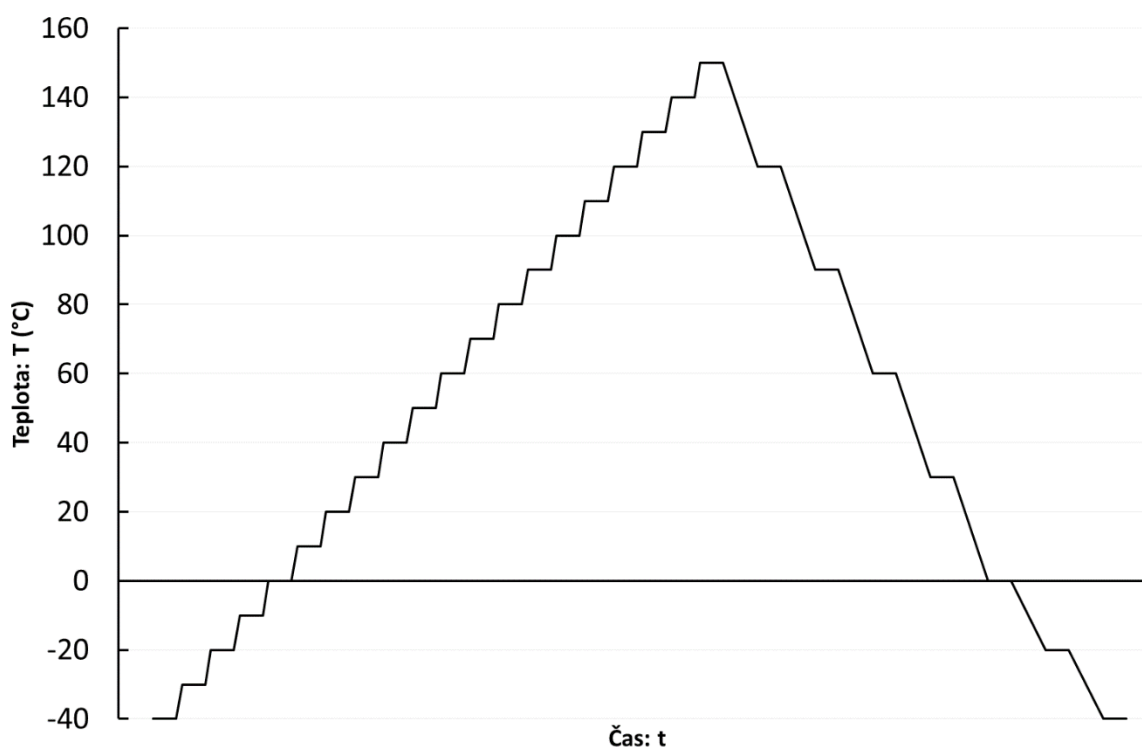
*Obr. 4.14 Umístění senzorů v teplotní šokové komoře*

Tři vyšíváné teplotní senzory byly upnuty do plastových rámečků a zavěšeny na boční stěnu drátěného koše uvnitř teplotní šokové testovací komory. Jeden vyšíváný teplotní senzor byl položen na dno drátěného testovacího prostoru. Komerční platinové senzory Pt1000 byli také položeny na dno testovacího prostoru. Pro porovnání reakcí senzorů na skokovou změnu teploty byl napodoben způsob uchycení komerčních senzorů teploty použitelný na skutečném hasičském obleku. Dva senzory Pt1000 byly pomocným textilním materiálem a lepidlem laminovány a obšity na textilii vrchní vrstvy hasičského obleku. Tři

senzory Pt1000 byly vloženy do kapsy tvořené přehnutím vrchní vrstvy hasičského obleku. Umístění senzorů v průběhu testu reakce senzorů na skokovou změnu teploty ukazuje obrázek 4.14.

#### 4.6 Opětovná kalibrace vyšších senzorů

Poslední provedený test byla opětovná kalibrace testovaných senzorů, ovšem ve větším teplotním rozpětí. Měření bylo navrženo schodovitým nárůstem a poklesem teplot v intervalu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Klimatická komora Vötsch VCV 7060-5 byla nastavena pro schodovitý nárůst teplot v krocích po deseti stupních Celsia. Ochlazování bylo nastaveno na schody v teplotách  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  viz obr. 4.15. Měřicí zařízení bylo použito Keithley 2700 (multimeter / data acquisition system) rozšířené multiplexní měřicí kartou 7708. Tato měřicí soustava byla osazena měřicími kabelem zakončenými piny rozteče 2,54 mm pro kontaktování vyšíváných teplotních senzorů a komerčních teplotních senzorů Pt1000 třídy A společnosti Tesla Blatná. Měřicí zařízení bylo použito v režimu ukládání dat do připojeného počítače, s periodou odečtu všech kanálů 10 sekund. Všechny kanály měřily elektrický odpor čtyřbodovou metodou.

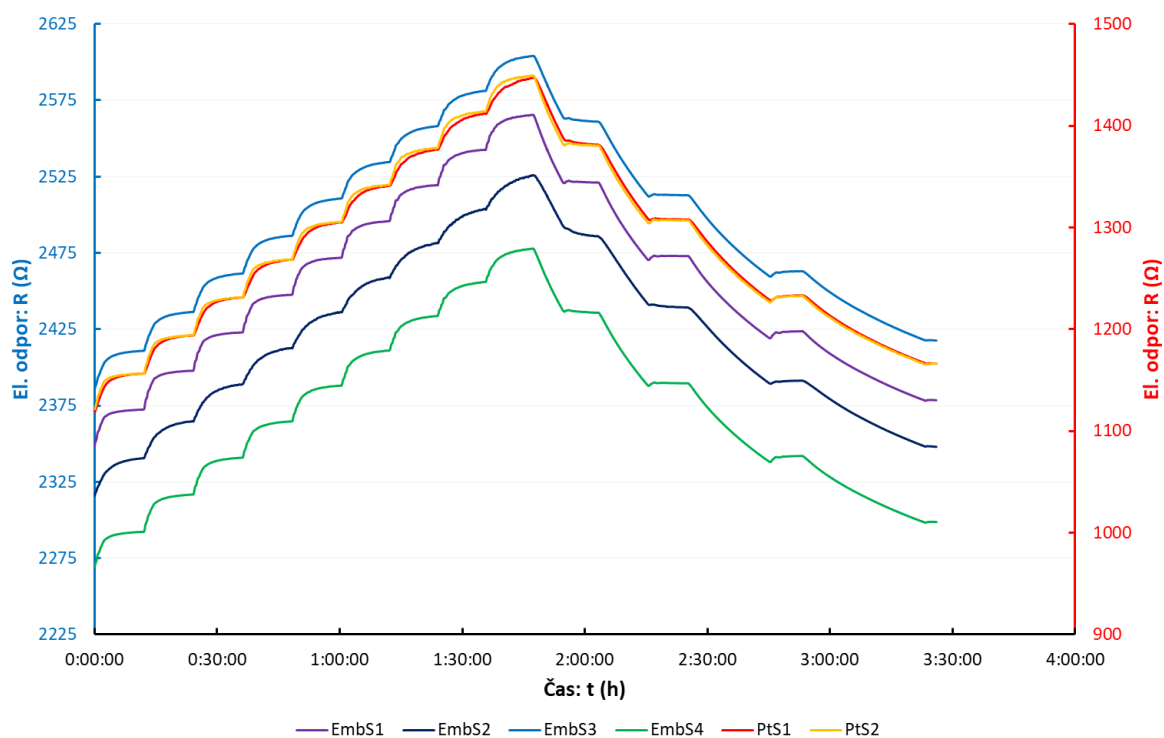


Obr. 4.15 Schodovitý průběh teploty pro opětovnou kalibraci senzorů

## 5 Výsledky a diskuze

### 5.1 Kalibrace vyšitých senzorů

Kalibrace byla v případě vyšíváných senzorů skutečně nezbytná. Procesem kontaktování a rozptylem celkové délky aktivní části teplotních senzorů byla způsobena odchylka absolutní hodnoty elektrického odporu o  $120 \Omega$  mezi čtyřmi testovanými senzory. Naměřené hodnoty elektrických odporů vyšitých senzorů (EmbS1 až EmbS4) a komerčních senzorů Pt1000 (PtS1 a PtS2), měřené pro účel kalibrace vyšitých senzorů, jsou vykresleny na obrázku 5.1. Tento graf disponuje dvěma vertikálními osami, přičemž levá osa patří vyšíváným senzorům, zatímco pravá osa patří komerčním senzorům.



Obr. 5.1 Graf závislosti elektrického odporu testovaných senzorů na čase

Hodnoty elektrického odporu v ohmech naměřené komerčními senzory Pt1000 byly dosažením do rovnice (4) přepočteny na hodnoty teploty ve stupních Celsia. Pomocí známé teploty změřené senzory Pt1000 a elektrického odporu vyšíváných senzorů byla sestavena kalibrační křivka. Kalibrační hodnoty elektrického odporu a teploty byly použity vždy z části schodu při ustálené teplotě. Tyto hodnoty vzdálené po deseti stupních Celsia byly aproximovány. Z obrázku 5.2 je patrná lineární závislost elektrického odporu na teplotě vyšíváného teplotního senzoru. Přímka vzniklá aproximací kalibračních bodů je

tedy popsána rovnicí přímky viz rovnice (5). Matematické zápisy jednotlivých kalibračních křivek vyšitých teplotních senzorů jsou ukázány v rovnicích (6) až (9).

$$y = kx + q \quad (5)$$

kde  $k$  je směrnice přímky a  $q$  je průsečík osy  $y$

EmbS1

$$y = 2,5178x + 2272,1 \quad (6)$$

EmbS2

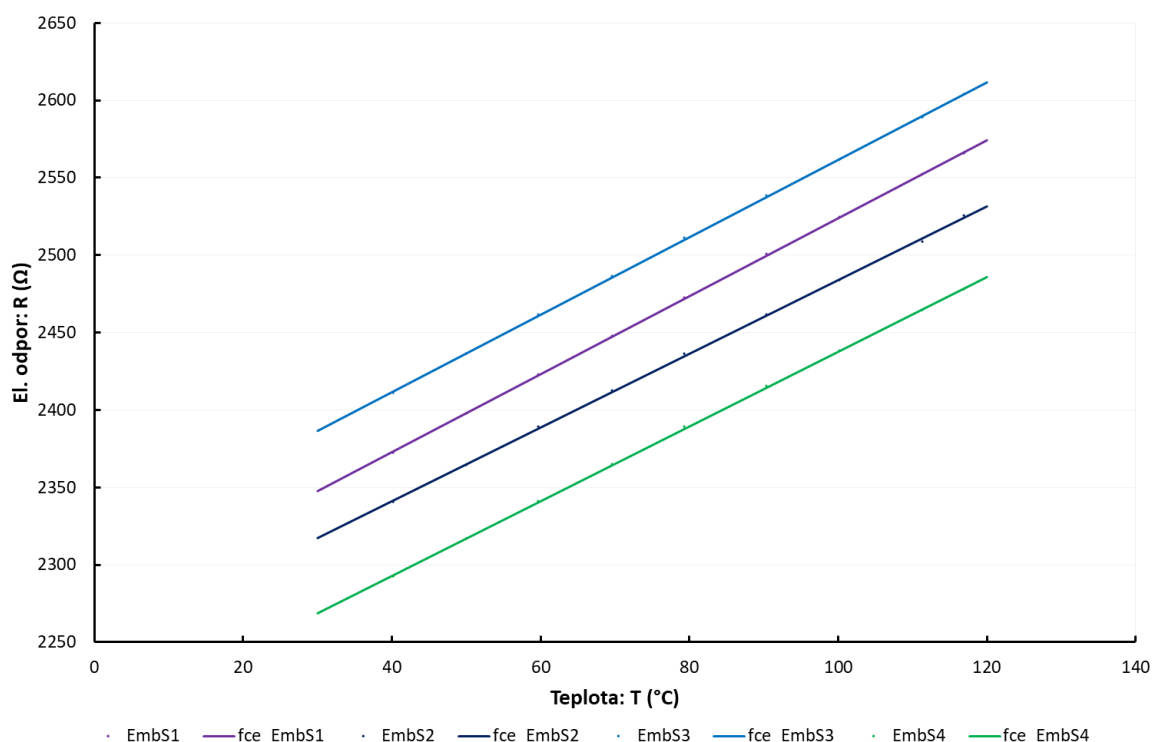
$$y = 2,3802x + 2245,9 \quad (7)$$

EmbS3

$$y = 2,5009x + 2311,5 \quad (8)$$

EmbS4

$$y = 2,4133x + 2196,3 \quad (9)$$



Obr. 5.2 Kalibrační křivky vyšitých senzorů

Teplotní koeficient rezistivity ( $TKR$ ) byl spočten dle rovnice (1) po drobné úpravě. Úprava rovnice výpočtu  $TKR$  byla vynucena kalibrací senzoru v nestandardním rozsahu teplot 40 °C až 120 °C. Rovnice použitá pro výpočet  $TKR$  je zobrazena v rovnici (10).

V tabulce 5.1 jsou zapsány vypočítané hodnoty  $TKR$  a absolutní citlivosti senzoru  $K_{RTD}$  testovaných vyšitých senzorů a testovaných komerčních senzorů Pt1000. Výpočet  $K_{RTD}$  koresponduje s rovnicí (2).

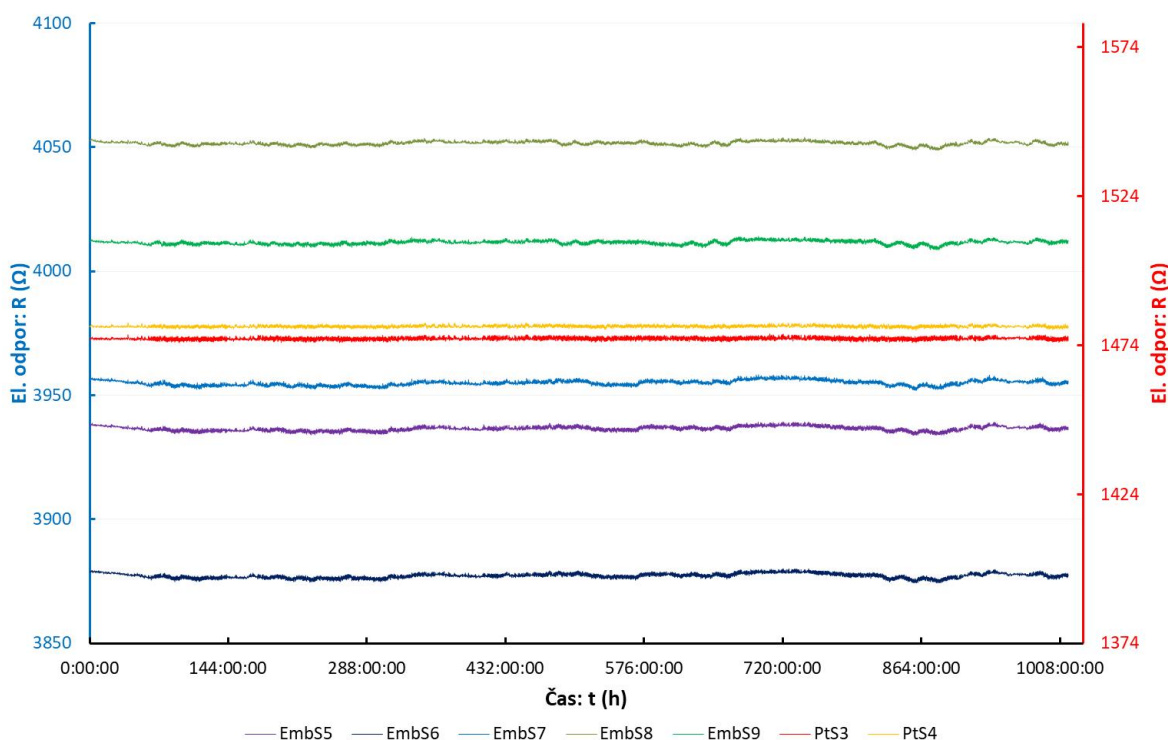
$$TKR \text{ nebo } \alpha = 10^6 \frac{R_{120} - R_{40}}{(120 - 40) \cdot R_{40}} \quad (\text{ppm}/^\circ\text{C}) \quad (10)$$

Tab. 5.1 Vypočítané parametry teplotních senzorů pro rozsah teplot 40 °C až 120 °C

Senzor	EmbS1	EmbS2	EmbS3	EmbS4	PtS1
TKR (ppm/°C)	1061,1	1016,7	1037,1	1052,5	3302,4
$K_{RTD}$ ( $\Omega/^\circ\text{C}$ )	2,52	2,38	2,50	2,41	3,82

Vyšité teplotní senzory v teplotním rozsahu 40 °C až 120 °C disponují lineární závislostí elektrického odporu na teplotě. To značně zjednodušuje jejich užití, protože výpočet velikosti teploty pomocí rovnice přímky zatíží výpočetní systém minimálně.

## 5.2 Test dlouhodobé stability textilního senzoru



Obr. 5.3 Graf závislosti elektrického odporu testovaných senzorů na čase v průběhu testu dlouhodobé stability textilních senzorů



Naměřené hodnoty elektrických odporů vyšitých senzorů (EmbS5 až EmbS9) a komerčních senzorů Pt1000 (PtS3 a PtS4), měřené v průběhu testu dlouhodobé stability, jsou vykresleny na obrázku 5.3. Tento graf disponuje dvěma vertikálními osami, přičemž levá osa patří vyšívaným senzorům, zatímco pravá osa patří komerčním senzorům. Jedním z možných přístupů k vyhodnocení tohoto měření je porovnání změny elektrického odporu testovaných senzorů z počátku testu s elektrickým odporem testovaných senzorů z konce testu. V tomto případě řešeno porovnáním aritmetického průměru hodnot měřených v průběhu počátečních 100 hodin testu ( $R_{P100}$ ) a závěrečných 100 hodin testu ( $R_{K100}$ ). Vypočítané průměrné hodnoty elektrického odporu včetně maximální odchylky dosažené v příslušném časovém intervalu jsou zobrazeny v tab. 5.2. Dále je v tabulce uveden rozdíl ( $\Delta R$ ) těchto aritmetických průměrů elektrického odporu z počátku a konce testu.

Tab. 5.2 Výsledné hodnoty testu dlouhodobé stability senzorů

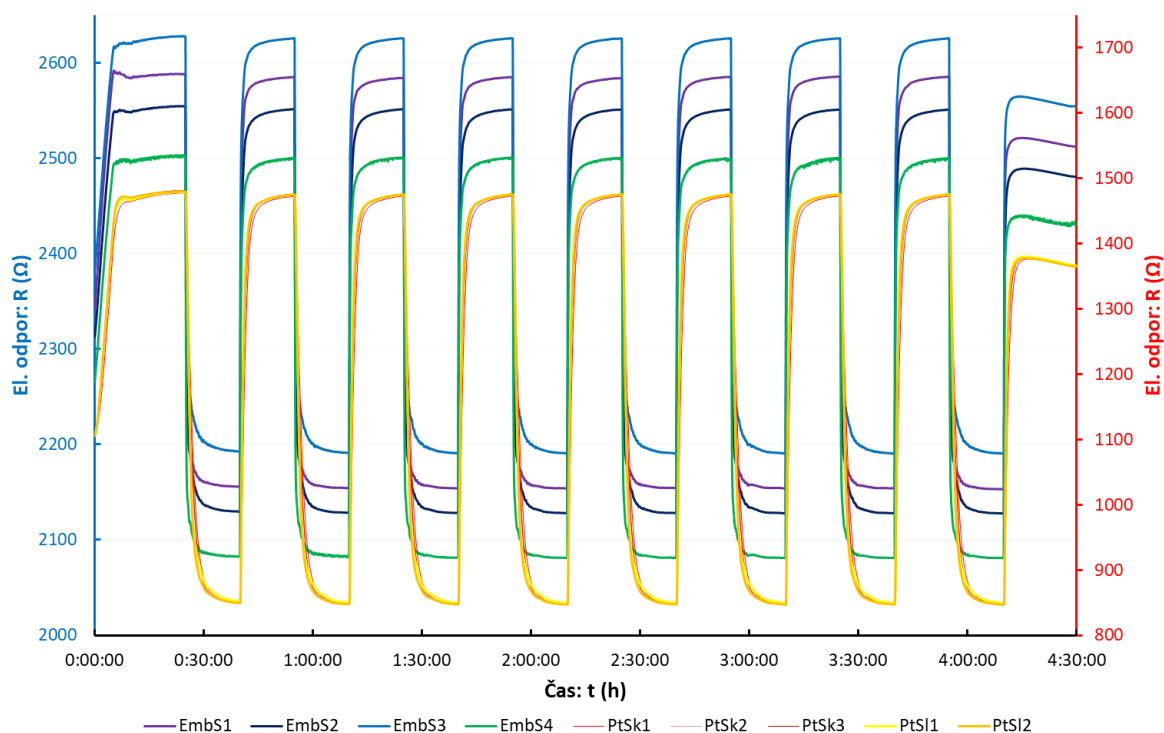
Senzor	$R_{P100}$ ( $\Omega$ )	$R_{K100}$ ( $\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\Omega$ )	$\Delta R$ (ppm)
EmbS5	3936,7 $\pm$ 2,1	3937,08 $\pm$ 2,09	0,38	97,6
EmbS6	3877,49 $\pm$ 2,71	3877,79 $\pm$ 2,08	0,30	77,1
EmbS7	3955,1 $\pm$ 1,97	3955,57 $\pm$ 2,6	0,46	117,4
EmbS8	4051,65 $\pm$ 1,6	4051,82 $\pm$ 1,86	0,18	43,7
EmbS9	4011,47 $\pm$ 1,36	4011,99 $\pm$ 1,68	0,52	130
PtS3	1476,1 $\pm$ 1,41	1476,3 $\pm$ 1,14	0,21	139,8
PtS4	1480,23 $\pm$ 1,34	1480,29 $\pm$ 1,05	0,06	38,5

K vyhodnocení tohoto testu byl zvolen přístup porovnání vyvíjených teplotních senzorů s komerčními teplotními senzory.  $\Delta R$  vyšitých senzorů dosahuje maximální hodnoty 0,52  $\Omega$  (EmbS9), zatímco  $\Delta R$  platinových senzorů Pt1000 třídy A dosahuje maximální hodnoty 0,21  $\Omega$  (PtS3). Ovšem porovnání absolutních hodnot není relevantní vzhledem k rozdílným absolutním hodnotám elektrického odporu testovaných senzorů. Po přepočtení do relativních hodnot  $\Delta R$  vyšitých senzorů dosahuje maximální hodnoty 130 ppm (EmbS9), zatímco  $\Delta R$  platinových senzorů Pt1000 třídy A dosahuje maximální hodnoty 139,8 (PtS3). Jelikož komerční senzor vysoké třídy přesnosti po 1000 hodinách stárnutí v teplotě 125  $^{\circ}\text{C}$  změnil svou hodnotu více než vyvíjený vyšívaný teplotní senzor,

může být test považován za úspěšný s kladným závěrem. Vyšité teplotní senzory jsou dlouhodobě stabilní.

### 5.3 Měření reakce senzoru na skokovou změnu teploty

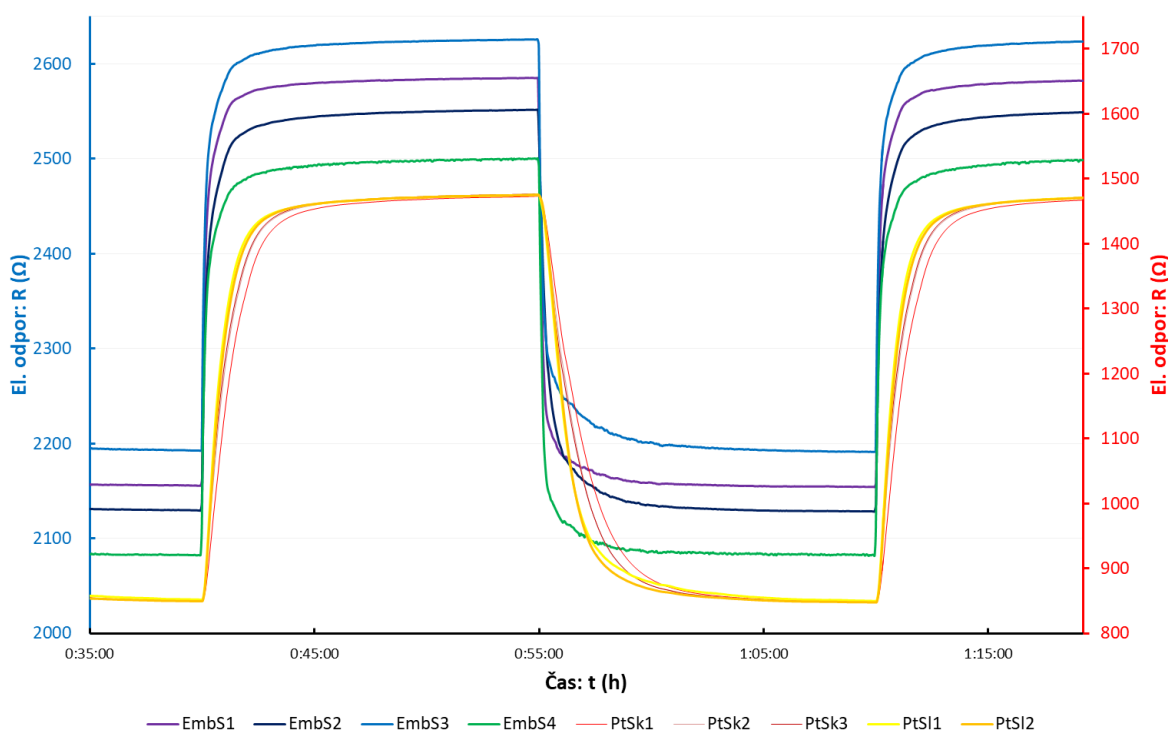
Časový průběh testu reakce senzoru na skokovou změnu teploty v šokové komoře ukazuje obr. 5.4. Detailní pohled na skokové (velmi rychlé) změny teplot v průběhu testu ukazuje obr. 5.5. Z obrázku je lehce patrná rychlejší saturace velikosti elektrického odporu vyšších teplotních senzorů oproti komerčním senzorům Pt1000. Za účelem znázornění rychlosti reakce na změnu sledované veličiny byla vertikální osa znázorněna jako elektrický odpor derivovaný časem v ohmech za sekundu. Výsledné grafy pro nárůst a pokles teploty jsou znázorněny na obrázcích 5.6 a 5.7.



Obr. 5.4 Graf závislosti elektrického odporu testovaných senzorů na čase v průběhu teplotního cyklování

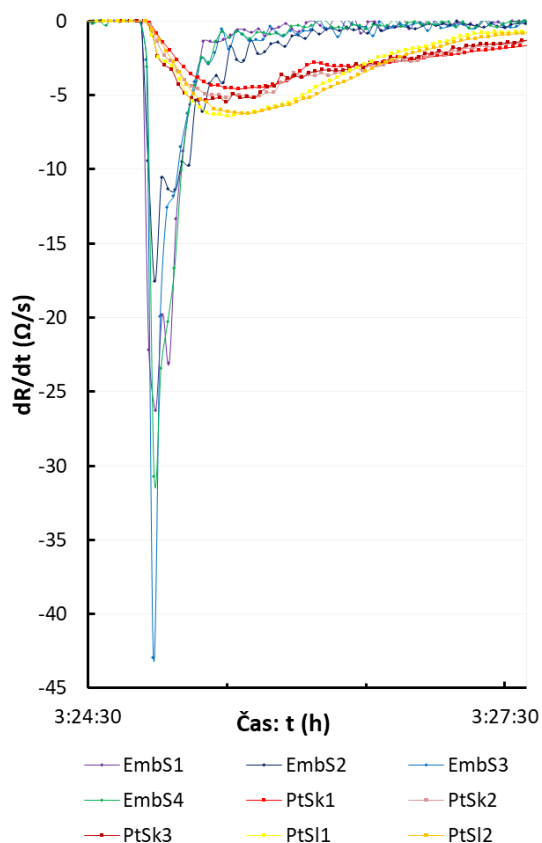
Z obrázků 5.6 a 5.7 je patrný propastný rozdíl reakce na skokovou změnu testovaných senzorů. V průběhu skokové změny chlazením dosáhl vyšitý teplotní senzor EmbS3 nejnižší hodnoty  $-42,93 \text{ } \Omega/\text{s}$  časové derivace elektrického odporu. Zatímco komerční teplotní senzor Pt1000 značený PtSI1 dosáhl nejnižší hodnoty  $-6 \text{ } \Omega/\text{s}$ . V průběhu skokové změny ohřátím dosáhl vyšitý teplotní senzor EmbS3 nejvyšší hodnoty  $41,4 \text{ } \Omega/\text{s}$  časové

derivace elektrického odporu. Zatímco komerční teplotní senzor Pt1000 značený PtSI1 dosáhl nejvyšší hodnoty 10,18  $\Omega/s$ .

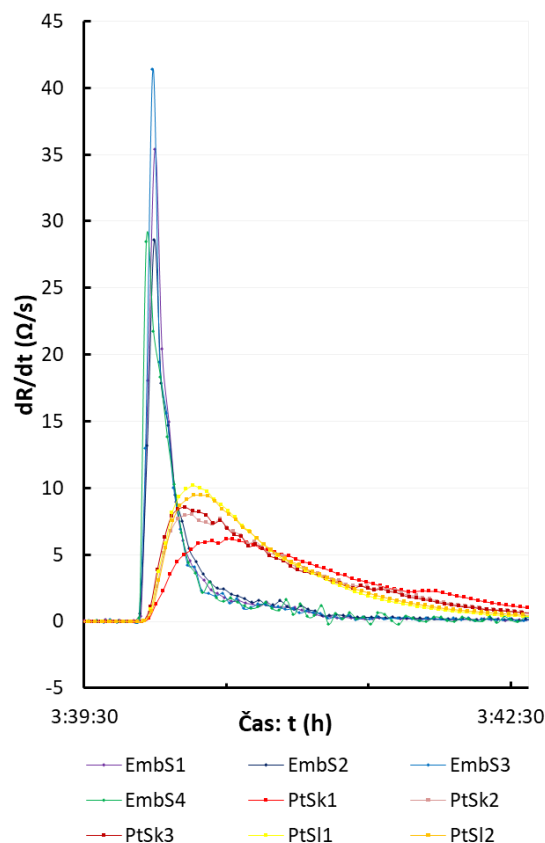


Obr. 5.5 Detail grafu závislosti elektrického odporu testovaných senzorů na čase v průběhu teplotního cyklování

Z toho je patrné, že reakce vyšitých teplotních senzorů na skokovou změnu teploty je více než čtyřnásobně rychlejší v obou směrech změny teploty. Vzhledem k rozmístění měřených hodnot na křivkách časově derivovaných průběhů elektrického odporu, je zřejmá nedostatečnost 2,5 sekundové periody odečtu všech kanálů. Při rychlejší měření hodnot by vznikla vyšší pravděpodobnost změření špičkové hodnoty všech vyšitých senzorů přibližně o hodnotě 40  $\Omega/s$  možná i vyšší. Na hodnotách měřených senzorů Pt1000 by se tato změna příliš neprojevila, jelikož jejich pozvolný nárůst byl bez problému změřen provedeným měřením. Další konfigurací s potenciálem ovlivnit výsledek testu je zrychlení přechodu mezi chladnou a teplou zónou teplotní šokové komory. Zrychlení ovšem v rámci použité teplotní šokové komory nelze, vyšší rychlost je předpokládána u stejného zařízení s menším objemem teplotních zón, případně u zcela jiného zařízení.



Obr. 5.6 Detail grafu závislosti časové derivace elektrického odporu testovaných senzorů na čase v průběhu teplotního cyklování



Obr. 5.7 Detail grafu závislosti časové derivace elektrického odporu testovaných senzorů na čase v průběhu teplotního cyklování

#### 5.4 Opětná kalibrace vyšitých senzorů

Naměřené hodnoty elektrických odporů vyšitých senzorů (EmbS1 až EmbS4) a komerčních senzorů Pt1000 (PtS1 a PtS2), měřené pro účel kalibrace vyšitých senzorů, jsou vykresleny na obrázku 5.8. Tento graf disponuje dvěma vertikálními osami, přičemž levá osa patří vyšívaným senzorům, zatímco pravá osa patří komerčním senzorům.

Hodnoty elektrického odporu v ohmech naměřené komerčními senzory Pt1000 byly dosazením do rovnice (4) přepočteny na hodnoty teploty ve stupních Celsia. Pomocí známé teploty změřené senzory Pt1000 a elektrického odporu vyšívaných senzorů byla sestavena kalibrační křivka. Kalibrační hodnoty elektrického odporu a teploty byly použity vždy z části schodu při ustálené teplotě. Tyto hodnoty vzdálené po deseti stupních Celsia byly aproximovány. Z obrázku 5.9 je patrná nelineární závislost elektrického odporu

na teplotě vyšivaného teplotního senzoru. Křivka vzniklá aproximací kalibračních bodů je popsána rovnicí (11). Matematické zápisy jednotlivých kalibračních křivek vyšitých teplotních senzorů jsou ukázány v rovnicích (12) až (15).

$$y = hx^2 + kx + q \quad (11)$$

kde  $h$ ,  $k$  a  $q$  jsou konstanty polynomické křivky druhého řádu

EmbS1

$$y = -0,0013x^2 + 2,7015x + 2265,2 \quad (12)$$

EmbS2

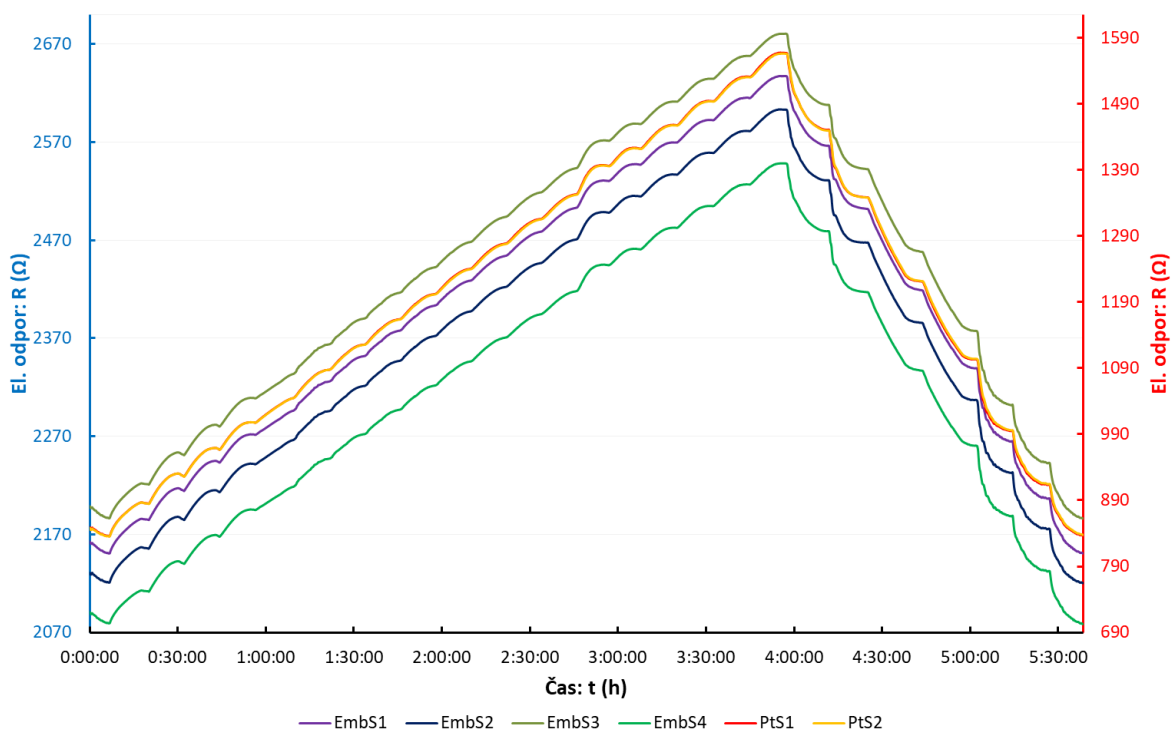
$$y = -0,0012x^2 + 2,7311x + 2302,3 \quad (13)$$

EmbS3

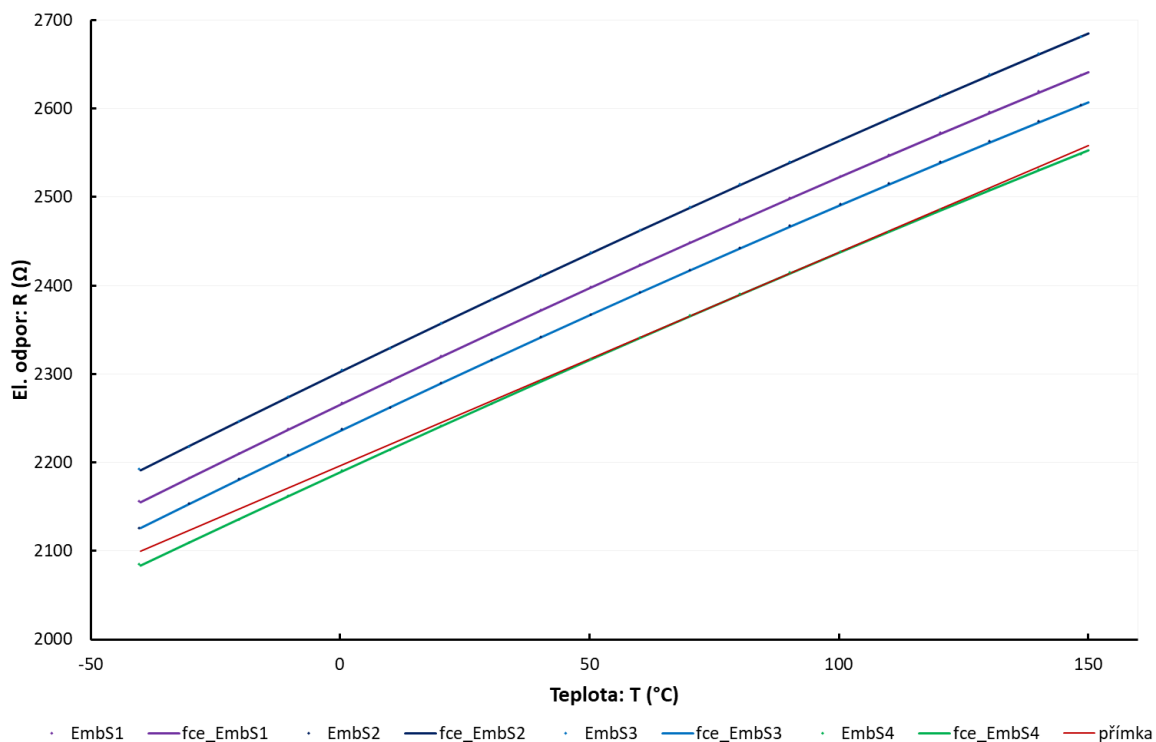
$$y = -0,0014x^2 + 2,6863x + 2235,6 \quad (14)$$

EmbS4

$$y = -0,0011x^2 + 2,5915x + 2188,9 \quad (15)$$



Obr. 5.8 Graf závislosti elektrického odporu testovaných senzorů na čase



Obr. 5.9 Kalibrační křivky vyšitých senzorů

Teplotní koeficient rezistivity ( $TKR$ ) byl spočten dle rovnice (1). Absolutní citlivost senzoru  $K_{RTD}$  byla spočtena dle rovnice (2). V tabulce 5.3 jsou zapsány vypočítané hodnoty  $TKR$  a absolutní citlivosti senzoru  $K_{RTD}$  testovaných vyšitých senzorů a testovaných komerčních senzorů Pt1000.

Tab. 5.3 Vypočítané parametry teplotních senzorů pro rozsah teplot  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Senzor	EmbS1	EmbS2	EmbS3	EmbS4	PtS1
$TKR$ (ppm/ $^{\circ}\text{C}$ )	1135,2	1134,1	1139	1133,7	3850
$K_{RTD}$ ( $\Omega/^{\circ}\text{C}$ )	2,57	2,61	2,55	2,48	3,85

Kalibrační křivka vyšitých teplotních senzorů lze v teplotním rozsahu  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximovat přímkou. Ovšem ve větším rozsahu teplot je již patrná nelinearita a byla tedy aproximována polynomickou křivkou druhého řádu.

## 6 Závěr

V této práci byl popsán vývoj vyšíváných teplotních senzorů založený na inovativní hybridní odporové niti. Hybridní nit je složena ze tří pramenů, z nichž každý obsahuje 33 polyesterových multifilamentních vláken. V jednom z pramenů je integrován mikrodrátek z nerezové oceli. V rámci práce byly navrženy dvě topologie pro vyšítí senzorů, realizované na nosný substrát tvořený vrchní vrstvou hasičského obleku. Vyšítí senzorů bylo realizováno poloprofesionálním vyšívacím strojem. Následně byl vytvořen spolehlivý laboratorní kontakt, jen pro účely vývoje vyšíváného teplotního senzoru.

Kalibrace byla v případě vyšíváných senzorů skutečně nezbytná. Procesem kontaktování a rozptylem celkové délky aktivní části teplotních senzorů byla způsobena odchylka absolutní hodnoty elektrického odporu o  $120 \Omega$  mezi čtyřmi testovanými senzory. Kalibrační křivky vyšítých teplotních senzorů lze v teplotním rozsahu  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  aproximovat přímkami. Ovšem ve větším rozsahu teplot je již patrná nelinearita a bylo tedy nutné kalibrační křivky aproximovat polynomicou křivkou druhého řádu. Relativní citlivost vyšíváného teplotního senzoru tzv. teplotní koeficient rezistivity ( $TKR$ ) dosahuje hodnot  $1133,7 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  až  $1139 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Zatímco  $TKR$  komerčního teplotního senzoru Pt1000 třídy A dosahuje hodnoty  $3850 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Absolutní citlivost vyšítých senzorů  $K_{RTD}$  dosahuje hodnot  $2,48 \Omega/^\circ\text{C}$  až  $2,61 \Omega/^\circ\text{C}$ , zatímco  $K_{RTD}$  komerčního teplotního senzoru Pt1000 dosahuje hodnot  $3,85 \Omega/^\circ\text{C}$ . Citlivost senzory tedy poskytuje dostatečně velkou změnu elektrického odporu v závislosti na teplotě. Takové senzory je tedy možné kvalitně měřit běžně dostupnými měřicími přístroji.

Test dlouhodobé stability teplotních senzorů proběhl při teplotě  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 1000 hodin. K vyhodnocení tohoto testu byl zvolen přístup porovnání vyvíjených teplotních senzorů s komerčními teplotními senzory.  $\Delta R$  vyšítých senzorů dosahuje maximální hodnoty 130 ppm (EmbS9), zatímco  $\Delta R$  platinových senzorů Pt1000 dosahuje maximální hodnoty 139,8 (PtS3). Jelikož komerční senzor vysoké třídy přesnosti A po 1000 hodinách stárnutí při teplotě  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  změnil svou hodnotu více než vyvíjený vyšíváný teplotní senzor, může být test považován za úspěšný s kladným závěrem. Vyšíté teplotní senzory jsou dlouhodobě stabilní.

Měření reakce na skokovou změnu teploty testovaných elementů proběhlo v teplotní šokové testovací komoře. Teplá zóna byla nastavena na konstantní teplotu  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Chladná

zóna byla nastavena na konstantní teplotu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V průběhu skokové změny chlazením dosáhl vyšitý teplotní senzor EmbS3 nejnižší hodnoty časové derivace elektrického odporu  $-42,93\text{ }\Omega/\text{s}$ . Zatímco komerční teplotní senzor Pt1000 značený PtS11 dosáhl nejnižší hodnoty  $-6\text{ }\Omega/\text{s}$ . V průběhu skokové změny ohřátím dosáhl vyšitý teplotní senzor EmbS3 nejvyšší hodnoty časové derivace elektrického odporu  $41,4\text{ }\Omega/\text{s}$ . Zatímco komerční teplotní senzor Pt1000 značený PtS11 dosáhl jen hodnoty  $10,18\text{ }\Omega/\text{s}$ . Z toho je patrné, že reakce vyšitých teplotních senzorů na skokovou změnu teploty je více než čtyřnásobně rychlejší v obou směrech změny teploty.

Měření reakce senzorů na skokovou změnu mohlo být nepřesné kvůli dvěma faktorům. Zaprvé při rychlejším odečítání hodnot z důvodu nedostatečné vzorkovací frekvence měření může vzniknout vyšší pravděpodobnost, že nebude změřena nejvyšší hodnota skokové hodnoty vyšitých teplotních senzorů (jedná se o stavy, kdy je časové derivace elektrického odporu vyšší než  $40\text{ }\Omega/\text{s}$ ). Na hodnotách měřených senzorů Pt1000 se tato změna příliš neprojevila, jelikož jejich pozvolný nárůst byl bez problému změřen provedeným měřením. Za druhé výsledek testu by bylo možné zpřesnit zrychlením přechodu mezi chladnou a teplou zónou teplotní šokové komory. Zrychlení ovšem v rámci použité teplotní šokové komory nelze, vyšší rychlost je možná u stejného zařízení s menším objemem teplotních zón, případně u zcela jiného zařízení.

V budoucnosti navrhuji pracovat především na vývoji kontaktů těchto vyšívaných teplotních senzorů. A to technikami, které jsou slučitelné s textilními procesy a jsou vhodné pro sériovou výrobu. Dále je pro E-textilie důležitým krokem úspěšně vyřešit odolnost vyšitých senzorů vůči dlouhodobé údržbě praním. V případě neúspěchu jako například potrhání nitě v průběhu pracích cyklů by bylo možné zvážit návrh jiné topologie senzoru či plošnou enkapsulaci sensorového meandru vzhledem k integraci senzorů do hasičských obleků.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] POLANSKÝ, R., R. SOUKUP, J. ŘEBOUN, J. KALČÍK, et al. A novel large-area embroidered temperature sensor based on an innovative hybrid resistive thread. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2017, 265, 111-119 [cit. 2018-04-11]. DOI: 10.1016/j.sna.2017.08.030. ISSN 09244247. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424717302984>
- [2] EUFINGER, Karin. Standardization of smart textiles and wearable intelligence: CENTEXBEL [online]. 2016 [cit. 2018-04-18].
- [3] KŘEMENÁKOVÁ, Dana a Jiří MILITKÝ, DENKOVÁ, Helena, ed. VÝVOJOVÉ TRENDY TEXTILNÍHO A ODĚVNÍHO OBORU: ODBORNÝ INSPIROMAT Publikace pro skupinu oborů vzdělání 31 Textilní výroba a oděvnictví [online]. 2015, , 15 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [http://www.nuv.cz/uploads/POSPOLU/publikace\\_31.pdf](http://www.nuv.cz/uploads/POSPOLU/publikace_31.pdf)
- [4] HARNIČÁROVÁ, Marta. Teplo, teplota: Multimediální texty předmětu Bakalářská fyzika pro HGF [online]. 2014 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://if.vsb.cz/bf/41.html>
- [5] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie fyziky: Seebeckův jev [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [6] SIBINSKI, Maciej, Malgorzata JAKUBOWSKA a Marcin SLOMA. Flexible Temperature Sensors on Fibers. *Sensors* [online]. 2010, 10(9), 7934-7946 [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.3390/s100907934. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/9/7934>
- [7] BRIAND, Danick, Francisco MOLINA-LOPEZ, Andrés Vásquez QUINTERO, Caglar ATAMAN, Jérôme COURBAT a Nico F. DE ROOIJ. Why Going Towards Plastic and Flexible Sensors?. *Procedia Engineering* [online]. 2011, 25, 8-15 [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.004. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811056736>

- [8] KINKELDEI, Thomas, Christoph ZYSSET, Kunigunde CHERENACK a Gerhard TROESTER. Development and evaluation of temperature sensors for textile integration. In: 2009 IEEE Sensors [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 1580-1583 [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1109/ICSENS.2009.5398488. ISBN 978-1-4244-4548-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5398488/>
- [9] Smart Textiles/Fabrics Market Analysis By Product (Active Smart Textile, Passive Smart Textile, Very Smart Textile), By Application (Architecture, Fashion And Entertainment, Medical, Defense & Military, Sports & Fitness, Transportation) And Segment Forecasts To 2024 [online]. 2015-01 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-textiles-industry>
- [10] SOUKUP, Radek, Tomas BLECHA, Petr KASPAR, Jan REBOUN a Ales HAMACEK. Smart Firefighter Protective Suit and Gloves: 8th European Conference on Protective Clothing. Citeve, 2018, 142-143.
- [11] A.G. Elektrisola Feindraht, ELEKTRISOLA: Stainless Steel 304 [online]. 2011, , 3 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [http://www.elektrisola.com/fileadmin/webdata/english/Downloads/ELEKTRISOLA\\_Datasheet\\_Steel304.pdf](http://www.elektrisola.com/fileadmin/webdata/english/Downloads/ELEKTRISOLA_Datasheet_Steel304.pdf)
- [12] Environmental testing - Part 2-2: Tests - Test B: Dry heat