

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam UHLÍŘ**
Osobní číslo: **E19N0014P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Flexibilní senzor teploty pro aplikace v chytrých textiliích**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši dostupných metod vhodných pro měření teploty v oblasti chytrých textilií.
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 věnujete 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 diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené 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.

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

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



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



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

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem flexibilního teplotního senzoru v chytrých textiliích. Úvodní část se zabývá seznámením s možnými způsoby měření teploty a se smart textiliemi. V další kapitole byla provedena literární rešerše textilních teplotních senzorů a průzkum nabízených produktů na trhu. Dále byly tyto senzory porovnány a vyhodnoceny. Hlavní část práce spočívá v návrhu a výrobě praktického senzoru. V této části jsou popsány navržené parametry senzoru, použité materiály a jeho kontaktování. V sekci měření jsou diskutovány změřené kalibrační křivky senzorů. Na konci práce jsou vzorky kriticky zhodnoceny na základě výsledků zátěžových testů.

Klíčová slova

Smart textilie, E–textilie, teplotní textilní senzor, textilní termočlánek

Abstract

This diploma thesis deals with the design of a flexible temperature sensor in smart textiles. The possible methods of temperature measurement and smart textiles are presented in the introduction of this work. In the next chapter, a scientific literature review of textile temperature sensors and a market survey of offered products were performed. Further, these sensors are compared and evaluated. The main part of the thesis is focused on the design and fabrication of the test samples of sensors. It contains the proposed sensor parameters, used materials, and contacting of the sensors. Sensor calibration curve and stress tests are described in the measurement section. Finally, the samples are critically evaluated based on stress tests.

Key words

Smart textiles, E-textiles, temperature textile sensor, textile thermocouple

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 26.5.2021

Adam Uhlíř

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Soukupovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Kalčíkovi za profesionální rady, připomínky a pomoc při praktické části práci. Dále bych chtěl poděkovat členům Katedry technologií a měření za pomoc při přípravě a realizaci vzorků.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 SMART TEXTILIE	11
1.1 DEFINICE A STANDARDIZACE SMART TEXTILIÍ.....	13
1.2 E-TEXTILIE.....	14
1.3 POŽADAVKY NA E-TEXTILIE.....	16
1.4 APLIKACE SMART TEXTILIÍ.....	17
2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ TEPLoty	19
2.1 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty.....	19
2.1.1 Termoelektrické měření teploty.....	19
2.1.2 Odporové měření teploty.....	21
2.1.3 Polovodičové odporové měření teploty.....	22
2.1.4 Polovodičové měření teploty.....	23
2.1.5 Měření teploty pomocí Braggových vláknově optických mřížek.....	24
2.2 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty.....	25
2.3 TECHNICKÉ PARAMETRY SENZORŮ.....	27
2.3.1 Statické parametry senzoru.....	27
2.3.2 Dynamické parametry senzoru.....	29
2.3.3 Kalibrační křivka senzoru.....	30
2.3.4 Třídy přesnosti senzorů.....	30
3 PŘEHLED TEXTILNÍCH SENZORŮ TEPLoty	32
3.1 LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	32
3.1.1 Optický textilní senzor (Braggova mřížka).....	32
3.1.2 Termistor zapouzdřený do přize.....	33
3.1.3 Flexibilní fóliový teplotní senzor.....	34
3.1.4 Látková snímací síť pro průběžné měření teploty kůže.....	35
3.1.5 Tištěné termočlánky na textilním podkladu.....	36
3.1.6 Komerční odporový senzor.....	36
3.2 ZHODNOCENÍ TEXTILNÍCH TEPLotNÍCH SENZORŮ.....	38
3.3 APLIKACE TEXTILNÍCH SENZORŮ TEPLoty.....	42
4 PRAKTICKÁ ČÁST	47
4.1 POŽADOVANÉ PARAMETRY TEPLotNÍHO SENZORU.....	48
4.2 PRVNÍ NÁVRH TEXTILNÍCH TERMOČLÁNKŮ TC1-TC3.....	48
4.2.1 Návrh vhodných materiálů termočlánku.....	48
4.2.2 Návrh kontaktování sensorových prvků.....	50
4.2.3 Měření testovacích vzorků.....	51
4.2.4 Zhodnocení prvního návrhu.....	57
4.3 DRUHÝ NÁVRH TEXTILNÍCH TERMOČLÁNKŮ TC4-TC7.....	59
4.3.1 Návrh materiálů termočlánků.....	60
4.3.2 Kontaktování a měření testovacích vzorků.....	60
4.3.3 Zhodnocení druhého návrhu.....	62
5 ZÁVĚR	66
SEZNAM LITERATURY	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	73
PŘÍLOHY	76

Seznam symbolů a zkratek

α	Seebeckův koeficient	Seebeck coefficient
FBG	Braggova vláknová mřížka	Fiber Bragg grating
NTC	Negativní teplotní koeficient.....	Negative temperature coefficient
PANI.....	Polyanilín	Polyaniline
PCM.....	Materiály měnící fázi	Phase change materials
PEDOT: PSS	Poly(3,4-etylendioxythiofen)-polystyrenulfonát Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)	
PES	Polyester	Polyester
PESh	Polyesterové hedvábí	
PPE	Osobní ochranné prostředky	Personal protective equipment
PTC.....	Kladný teplotní koeficient.....	Positive temperature coefficient
RTD	Odporový senzor teploty	Resistance temperature detectors
SEM.....	Rastrovací elektronový mikroskop	Scanning electron microscope
SMA	Slitiny s tvarovou pamětí	Shape-memory alloy
SMM.....	Materiály s tvarovou pamětí.....	Shape-memory materials
TKR	Teplotní koeficient el. odporu	Temperature coefficient of resistance
TP	Třída přesnosti.....	Accuracy class
TPU.....	Termoplastický polyuretan.....	Thermoplastic polyurethane
UV	Ultrafialové záření.....	Ultraviolet rays

Úvod

Oblečení nás obklopuje ze všech stran a využíváme ho každý den. Původní funkcí oblečení byla ochrana proti přírodním živlům, rostlinám, zvířatům a také zvýšení tepelného komfortu nositele. Základním materiálem používaným pro výrobu oblečení jsou textilie. Vývoj oblečení je spjat s vývojem textilií. Postupným vývojem textilií se vyvinuly smart textilie, které ke standardním funkcím přidaly další, jednou z funkcí může být například měření teploty.

Textilní měření teploty může být zaměřeno na měření okolní teploty nebo na měření tělesné teploty. Měření tělesné teploty se obvykle používá v lékařském prostředí, ať už k měření celkové tělesné teploty nebo k měření lokální teploty. Naproti tomu měření okolní teploty najde uplatnění v ochranných oblecích. V současné době je většina textilních teplotních senzorů stále ve fázi vývoje.

Cílem práce je vytvořit textilní teplotní senzor, který najde uplatnění v ochranných hasičských oblecích. Hlavními požadavky pro tento typ aplikace jsou dostatečný teplotní rozsah, přesnost, flexibilita a odolnost vůči pracovním cyklům.

Text této práce je rozdělen do čtyř kapitol. V první kapitole je představena problematika smart textilií včetně jejich standardizace, požadavků a základních aplikací. Druhá kapitola je zaměřena na různé způsoby měření teploty. Ve třetí kapitole je shrnut přehled textilních teplotních senzorů, které jsou následně porovnány a zhodnoceny. Dále tato kapitola obsahuje možné aplikace textilních teplotních senzorů. Čtvrtá kapitola představuje začátek praktické části a je věnována samotnému návrhu a realizaci textilního teplotního senzoru. Dále je zde popsáno kalibrační měření teploty senzorů a tři zátěžové testy, kterými senzor prošel. Nakonec jsou v této práci zobrazeny grafy a zhodnoceny dosažené výsledky.

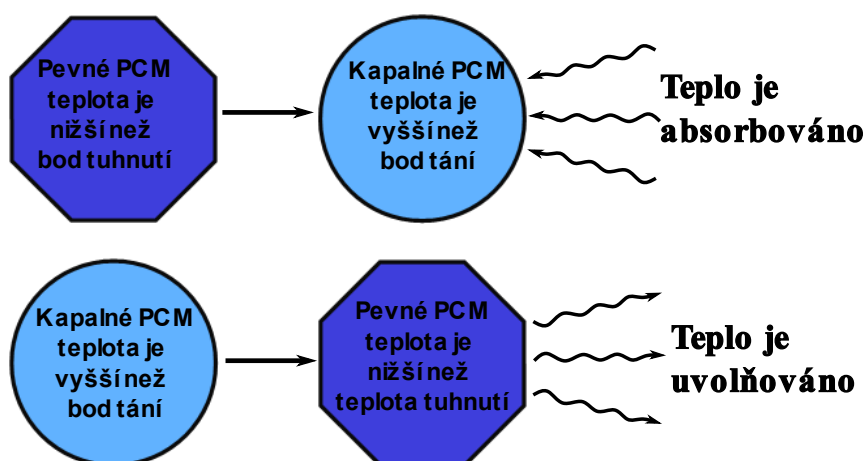
1 Smart textilie

Pojem „*smart textilie*“ lze jednoduše popsat jako textilie, které poskytují nositeli další přidané funkce pomocí zahrnutých technologií. Tento termín je odvozený od chytrých materiálů. Pojem "*chytrý materiál*" byl poprvé použit v Japonsku v roce 1989. Prvním chytrým materiálem označeným jako smart textilie bylo hedvábné vlákno s efektem tvarové paměti. Až koncem 90.let byly chytré materiály zavedeny do textilií. [1,2]

Smart textilie můžeme rozdělit do čtyř skupin, podle druhu jejich reakce na vnější podněty:

- Materiály měnící fázi (PCM)
 - Materiály s tvarovou pamětí (SMM)
 - Materiály měnící barvu
 - E-textilie
- **Materiály měnící fázi (PCM)**

Změna fáze je proces, při kterém materiál přechází z jednoho fyzického stavu do druhého. Odlišujeme tři základní skupenství hmoty: pevné, kapalně a plynné. PCM materiály mohou absorbovat, ukládat a uvolňovat velké množství energie ve formě latentního tepla, přičemž mění fázi nebo svůj stav. [3] Tato technologie pochází z výzkumu NASA ze 70. let 20. století, kdy cílem projektu bylo zajistit astronautům lepší ochranu proti extrémnímu kolísání teplot ve vesmíru. V dnešní době se používají v mnoha aplikacích (solární systémy pro akumulaci tepla, řízení tepla v elektronice či telekomunikacích, regulace teploty v textiliích a další). [4,5]

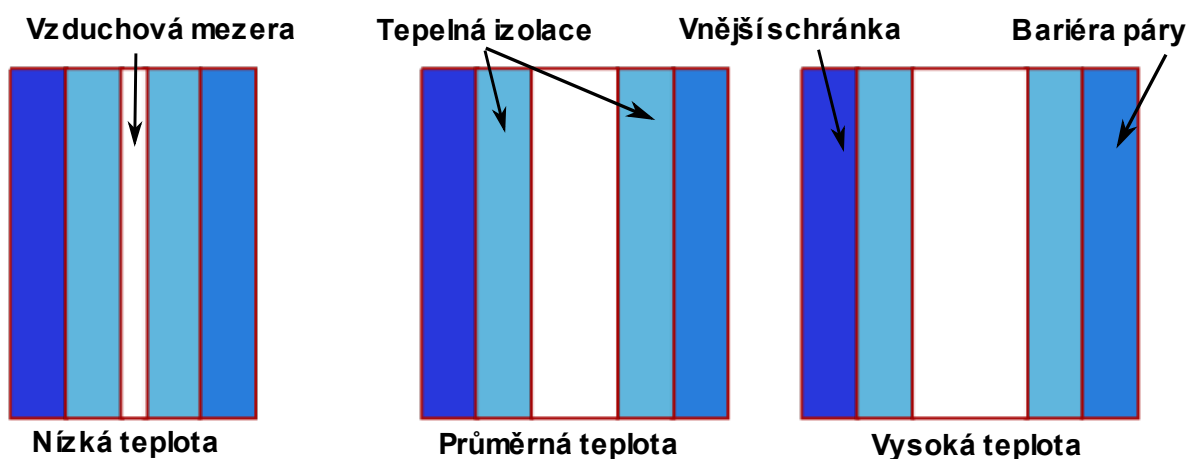


Obr. 1.1: Příklad funkce PCM (překresleno z [6])

- **Materiály s tvarovou pamětí (SMM)**

Materiály s tvarovou pamětí reagují na vnější stimul změnou svého tvaru z nějakého dočasně deformovaného tvaru na dříve „naprogramovaný“ tvar. Změna tvaru se nejčastěji aktivuje pomocí změny okolní teploty, určitým tlakovým namáháním, magnetickým či elektrickým polem aj. Pokud je materiálu zabráněno v obnově počátečního tvaru, je vyvoláno zotavovací napětí a materiál může vykonat práci. Nejrozšířenější oblastí využití takových materiálů je bioinženýrství a biomedicína, dále letectví a automobilový průmysl.

SMA (slitiny s tvarovou pamětí) lze aplikovat do hasičských oděvů. Při nízké okolní teplotě je oděv lehký a tenký, při vysoké teplotě se ale tloušťka stává silnější a zajišťuje nezbytnou izolaci. Při použití daných materiálů se prodlužuje doba ochrany přibližně o 30 %. [4,5]



Obr. 1.2: Princip SMM (překresleno z [7])

- **Materiály měnící barvu**

Jsou to materiály, které umějí měnit či vyzařovat barvy. Tento jev je způsoben vnějším podnětem různých forem: [1]

- | | |
|---------------------|------------------|
| ➤ Fotochromismus | Světlo |
| ➤ Termochromismus | Teplo |
| ➤ Elektrochromismus | Elektrický proud |
| ➤ Piezochromismus | Tlak |
| ➤ a další | |

Velmi známé jsou materiály luminiscenční, které mění barvu. Používají se v bezpečnosti jako speciální uniformy pro policisty a hasiče, dále ve sportu jako běžecké a cyklistické oblečení. [4]

1.1 Definice a standardizace smart textilií

Definice dvou termínů podle standardizace SIST-TP CEN/TR 16298:2012:

- Smart textilní materiál: Funkční textilní materiál, který aktivně interaguje s okolním prostředím, reaguje nebo se přizpůsobuje změnám v prostředí. [8]
- Smart textilní systém: Textilní systém, který vykazuje zamýšlenou a využitelnou odezvu jako reakci na změnu okolního prostředí nebo na externí vstupní signál. [8]

Definice smart textilií podle Lieva Van Langenhove a Carla Hertleer: Smart textilie lze popsat jako textilie, které jsou schopné vnímat podněty z prostředí, reagovat na ně a adaptovat se integrací určité funkce do textilní struktury. Podnět i reakce mohou být elektrické, tepelné, chemické, magnetické aj. [1]

Smart textilie lze rozdělit do čtyř typů podle inteligence použitých materiálů:

- **Pasivní inteligentní materiály**

Pasivní inteligentní materiály jsou materiály nebo systémy, které snímají pouze podněty okolního prostředí. Tyto systémy obsahují jen senzory. Podnětem může být například změna teploty, elektrického odporu, barvy. [9,10]

- **Aktivní inteligentní materiály**

Aktivní inteligentní materiály jsou materiály nebo systémy, které dokáží vnímat a následně i reagovat na podněty okolního prostředí. Systém je složen ze senzoru a akčního členu. [9,10]

- **Velmi inteligentní materiály**

Velmi inteligentní materiály jsou materiály nebo systémy, které mohou vykonávat až tři funkce. Mohou přijímat podněty z okolního prostředí a reagovat na ně, a navíc se mohou přizpůsobit a přetvořit podle podmínek okolního prostředí. [9,10]

- **Materiály s ještě vyšší úrovní inteligence**

Tyto druhy materiálů a systémů jsou ještě pouze ve fázi výzkumu, mohou být získány sloučením velmi inteligentních materiálů a struktur s pokročilým počítačovým rozhraním. [9]

Stupeň integrace E–textilií popisuje rozsah, v němž jsou elektronické součástky nebo zařízení integrovány do textilního materiálu nebo výrobku. Jsou definovány 4 stupně integrace:

- **1. úroveň integrace (odnímatelné řešení)**

Elektronické zařízení je přidáno způsobem, aby nedošlo k poškození produktu např. kapsa, suchý zip a další. [11]

- **2. úroveň integrace (přípevněné řešení)**

Elektronické zařízení je přípevněno k textilu a nelze jej odstranit, aniž by došlo ke zničení produktu např. sešívání, svařování, lepené aj. [11]

- **3. úroveň integrace (smíšené řešení)**

Elektronické zařízení se skládá z jednoho nebo z více součástí, které jsou vyrobeny z textilie nebo textilních povrchů a kombinovány s trvalým nebo odnímatelným připojením elektronických součástí. Např. V ochranných hasičských oblecích, kde jsou prvky, které je nutné vyjmout před praním (baterie, senzory výbušných plynů) a zároveň prvky, které jsou integrovány po celou životnost obleku (teplotní senzory). [11]

- **4. úroveň integrace (komplexní textilní řešení)**

Všechny součásti elektronického zařízení jsou vyrobeny z textilie nebo textilních povrchů. [11]

1.2 E–textilie

E–textilie mohou snímat informace o nositeli, zobrazovat je nositeli nebo získané informace ukládat či posílat na vzdálené místo. Zároveň mohou nositele informovat o možných službách nebo informacích z vnějšího světa. První zmínky se začaly objevovat na začátku 90. let. Jedna z prvních E–textilií byla bunda, která monitorovala držení horní části těla nositele pomocí jedenácti senzorů natažení. [1]

E–textilie představují moderní směr elektrotechniky. Jedná se o elektroniku, která je přímo integrována do textilního výrobku. Elektricky vodivé materiály mají proto v oblasti inteligentních textilií zásadní význam.



Obr. 1.3: Jednotlivé funkce E–textilií (převzato z [12])

E–textilní systém může zahrnovat: rozhraní, komunikační síť, komponenty pro správu dat a energie a další. [4]

- **Technologie rozhraní**

Rozhraní zajišťuje přenos informací mezi zařízeními a nositelem (prostředím). Rozhraní rozdělujeme na vstupní a výstupní. Vstupním rozhraním můžeme například označit tlačítka či klávesnici. Tyto prvky lze relativně snadno implementovat do oděvu. U složitějších úkolů využijeme senzory, které mohou monitorovat fyzický stav nebo jiné údaje. Výstupní rozhraní předkládá nositeli informace, které mohou být například vizuální či sluchové. [4]

- **Komunikace**

Komunikace se týká přenosu informací a energie mezi komponenty E–textilie. Komunikaci můžeme rozdělit na drátovou a bezdrátovou a podle vzdálenosti na krátkou a dlouhou vzdálenost. Krátkou komunikací se rozumí komunikace uvnitř zařízení, naproti tomu dlouhá je mezi dvěma či více uživateli (zařízeními). [4]

- **Správa dat**

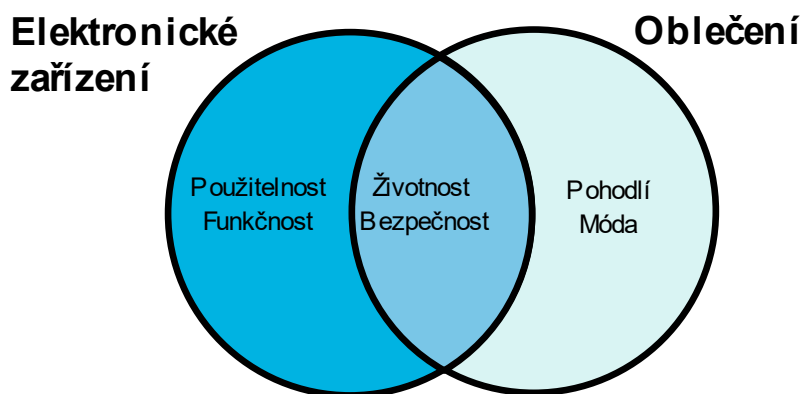
Správou dat rozumíme práci s pamětí, výpočtem a zpracováním dat. [4] Zpracování dat bývá velmi náročný proces, který je vyžadován, pokud je potřeba chytrá a adekvátní reakce. První fází je interpretace údajů. Problém může být velmi jednoduchý, teplota přesahující určitou úroveň, přítomnost chemikálií atd. Druhá fáze se skládá ze zpětné vazby a řídicích algoritmů. Pasivní zpětná vazba pouze rozesílá varování či vytváří poplach. Aktivní zpětná vazba vyžaduje doplnit kontrolní strategie. [2]

- **Správa energie**

Hlavním problémem nositelné elektroniky je napájení. Snímání a zpracování dat, ovládání, komunikace, všechny tyto procesy potřebují ke své činnosti elektrickou energii. Části spravující skladování a dodávání energie jsou obvykle největší a nejtěžší částí nositelného zařízení. Baterie navíc potřebuje čas na dobití určitého množství energie. Napájení musí být flexibilní a lehké, aby šlo lehce začlenit do oděvu a nebylo pro uživatele přítěží. [4]

1.3 Požadavky na E–textilie

K efektivnímu používání E–textilií musíme vzít v úvahu lidské aspekty. Při návrhu je nutné brát ohled na to, co uživatelé chtějí, jaké chtějí funkce, a nikoliv pouze miniaturizovat elektroniku. Na obrázku 1.4. jsou označeny hlavní vlastnosti oblečení a elektronických zařízení. Jako hlavní vlastnosti u elektroniky jsou: použitelnost, funkčnost, životnost a bezpečnost. Oproti tomu hlavními vlastnostmi u oblečení jsou: pohodlí, móda, životnost a bezpečnost. E–textilie by měly vyhovovat jak požadavkům elektronických zařízení, tak i požadavkům na oblečení. [4]



Obr. 1.4.: Hlavní vlastnosti pro smart textilie (překresleno z [4])

- **Použitelnost**

Ovládání systému by mělo být intuitivní, aby se k němu mohl uživatel vrátit i po dlouhé době a nemusel si funkce znovu osvojovat. [4]

- **Funkčnost**

E–textilní oděvy v budoucnu pojmu širokou škálu aplikací, s konkrétními kombinacemi přizpůsobenými potřebám a preferencím nositelů. Počet aplikací pravděpodobně překročí počet oděvů, které je uživatel ochoten nosit. Oděvy, které pojmu více aplikací, musí zajistit správné fungování všech funkcí. [4]

- **Životnost**

Oblečení by mělo odolávat drsným podmínkám během pracích cyklů a každodenního užívání. Je nutné otestovat životnost textilní elektroniky vůči všem vnějším vlivům, které mohou nastat během jejího užívání. [4]

- **Bezpečnost**

Bezpečnost se týká ochrany před fyzickými či jinými druhy poškození. K fyzickým poruchám E-textilií, jako jsou například jejich přehřátí či elektrický šok, může dojít při funkční chybě zařízení. Poskytování bezpečných smart textilií vyžaduje zvážení fyzických norem, elektromagnetického záření, elektřiny atd. [4]

- **Pohodlí**

Pohodlí lze rozdělit na termofyziologický, neurofyziologický komfort a pohodlí při pohybu. Termofyziologický komfort souvisí se způsobem, jakým oblečení ovlivňuje přenosy tepla, vlhkosti a vzduchu a také způsob interakce těla a oblečení. Neurofyziologický komfort se vztahuje k pocitu spotřebitele při kontaktu oděvu s pokožkou. Pohodlí při pohybu souvisí se schopností oděvu umožnit volný pohyb, snížit zátěž a podporovat tělo. [4]

- **Móda**

E-textilie musejí být integrovány do každodenního života jejich uživatelů. Jejich vzhled by měl odpovídat preferencím jednotlivce, nebo by měl být co nejvíce nenápadný. [1,2]

1.4 Aplikace smart textilií

Využití smart textilií pokrývá mnoho oblastí, které lze rozdělit do pěti hlavních skupin:

- **Ve zdravotnictví**

Mezi hlavní použití smart textilií pro zdravotnictví patří textilní senzory (teplota, vlhkost, okysličení krve a pH, srdeční tep, rychlost dýchání, pohyb aj.), ovladače a nositelné elektronické systémy zabudované do textilií, které umožňují snímání a přenos fyziologických dat a následnou bezdrátovou komunikaci mezi pacientem a lékařem. Tyto systémy zajišťují při dlouhodobém sledování pacienta větší pohodlí. Kromě toho nacházejí uplatnění v nemocničních oděvech pro zdravotnické pracovníky, v chytrých obvazech a náplastích, při podávání léků atd. [13]

- **V osobních ochranných prostředcích (PPE)**

Osobní ochranné prostředky mohou hrát velkou roli v mnoha zaměstnání (hutě, hasiči, vojáci, zdravotníci, policisté atd.). Hlavními účely jsou upozornění pracovníka na škodlivé vlivy prostředí, na jeho fyzický stav, dále pak ovlivnění pracovního prostředí způsobem, které předejde nebezpečné životní situaci. [1]

- **V dopravě**

Použití v pozemní dopravě (automobilová a železniční), v leteckém a kosmickém průmyslu (letadla, satelity, kosmické lodě atd.). V dnešní době je hlavním cílem snížení hmotnosti dopravních prostředků s cílem zlepšit jejich účinnost a chování. [14]

- **V energii**

Energetické problémy jsou dnes stále důležitější. E-textilie mohou nabídnout důležité příspěvky pro získávání a výrobu energie (flexibilní fotovoltaické články) a pro skladování energie (flexibilní baterie). [14]

- **Pro volný čas (sport, zábava, pohodlí)**

Sport je nedílnou součástí lidské společnosti a aktivně sportuje čím dál větší část lidské populace. Ať už se jedná o sport amatérský či profesionální, trendem je se ve sportu zlepšovat. K tomu je potřeba měřit a zaznamenávat sportovní výkony (uběhnuté kilometry, rychlost pohybu, srdeční tep, teplota těla, došlap, poloha těla atd.), které napomáhají jak sportovnímu růstu, tak i předcházení zdravotních problémů.

Ke zvýšení pohodlí a zábavě patří elektronické zařízení zabudované do textilií (vyhřívané textilie, zobrazovací panely v textiliích a další).

2 Způsoby měření teploty

S pojmem teplota je úzce spjat pojem teplo. Teplo je energie, která vyjadřuje celkové množství energie (kinetické a potenciální), kterou mají molekuly v části hmoty. Teplota se vztahuje k průměrné (kinetické) energii mikroskopických pohybů jedné částice v systému na stupeň volnosti. [15] Termodynamická teplota T je jednou ze základních fyzikálních jednotek SI. Základní stupnicí teploty je Kelvinova stupnice se základní jednotkou Kelvin (K). Nejznámější používanou stupnicí je Celsiova stupnice, která používá za jednotku stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$), označuje se ϑ . Vztah mezi těmito stupnicemi je dán vzorcem (1.1.):

$$T = \vartheta + 273,15 \quad (1.1.)$$

Teplota vyjadřuje směr toku tepla, tok tepla proudí z oblasti s vyšší teplotou do oblasti s nižší teplotou. Pokud máme dvě oblasti v tepelném kontaktu, které mají stejnou teplotu, nedochází mezi nimi k žádné výměně vnitřní energie. [16]

Základní princip všech senzorů teploty spočívá v reakci určité veličiny na změnu teploty. Nejzákladnější rozdělení je na kontaktní (dotykové) a bezkontaktní (bezdotykové). [17]

2.1 Kontaktní měření teploty

Kontaktní teploměry měří teplotu pomocí přenosu tepla v místě dotyku. Vyžadují fyzický kontakt s měřeným objektem, aby se tělo senzoru dostalo na stejnou teplotu jako má objekt. Tato podskupina senzorů se dále dělí na:

- Elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, termoelektrické a další). Jejich funkce bude popsána v následujících podkapitolách.
- Dilatační (kapalinové, plynové, parní, bimetalové).
- Speciální (akustické, šumové, magnetické, tekuté krystaly, aj). [17]

2.1.1 Termoelektrické měření teploty

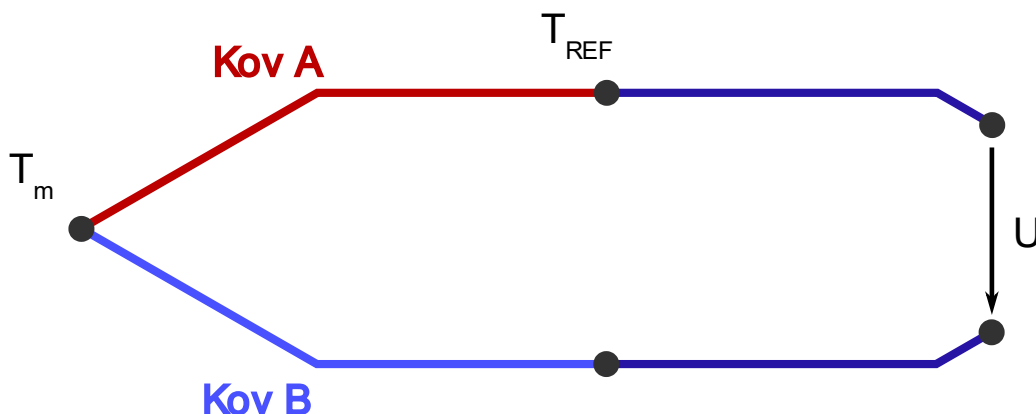
Termoelektrické měření teploty využívá termoelektrického jevu popsaného Seebeckem v roce 1826. Termočlánek se skládá ze dvou odlišných vodivých materiálů, které jsou spojeny v jednom bodě a tvoří uzavřený obvod. Další možností vytvoření termočlánku jsou dva stejné vodivé materiály, které ale mají rozdílnou tloušťku.

Spojený bod se nazývá měřicí a druhý referenční. Pokud je obvod uzavřen a tyto dva body mají odlišnou teplotu, obvodem protéká proud. Je-li obvod rozpojen, vytvoří se mezi dvěma

konci vodičů napětí, které odpovídá rozdílu teplot (velikost napětí μV až mV). Tento princip pracuje i obráceně, pokud na svorky připojíme napětí, na referenčním a měřícím bodě naměříme rozdílnou teplotu. [18] Výstupní napětí je dáno podle rovnice:

$$\Delta U = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1.2.)$$

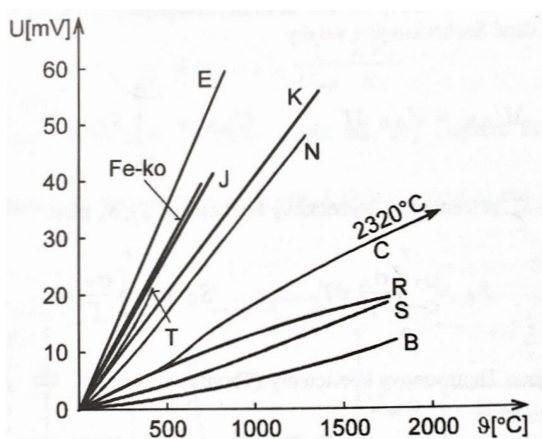
kde α ($\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) je Seebeckův koeficient a ΔT ($^\circ\text{C}$) je rozdíl teplot mezi měřícím a referenčním bodem. [19]



Obr. 2.1: Model termočlánku

Nosiče nábojů v materiálech (elektrony v kovech, elektrony a díry v polovodičích, ionty v iontových vodičích) budou difundovat, pokud má jeden konec vodiče rozdílnou teplotu než druhý. Horké nosiče difundují z horkého konce na studený konec, protože na studeném konci vodiče je nižší hustota horkých nosičů. Chladné nosiče se chovají opačně.

Pokud by byl vodič ponechán k dosažení termodynamické rovnováhy, měl by tento proces za následek rovnoměrné rozložení tepla po vodiči. Pohyb tepla (ve formě nosičů horkého náboje) z jednoho konce na druhý se nazývá tepelný proud. Protože se nosiče náboje pohybují, je to také elektrický proud. [18]



Obr. 2.2: Statické charakteristiky vybraných typů termoelektrických článků (převzato z [17])

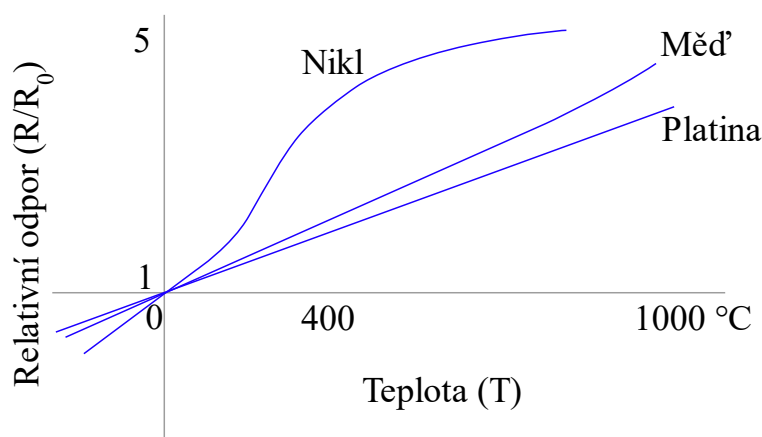
Označení:	E: NiCr-CuNi	N: NiCrSi-NiSi
	Fe-ko	C: WRe5-WRe26
	J: Fe-CuNi	R: PtRh13-Pt
	T: Cu-CuNi	S: PtRh10-Pt
	K: NiCr-NiAl	B: PtRh30-PtRh6

2.1.2 Odporové měření teploty

Odporové měření teploty používá RTD (odporový senzor teploty) senzor. Tento senzor využívá změnu odporu kovu v závislosti na změně teploty. Závislost odporu kovů na teplotě v širokém teplotním rozsahu (s výjimkou nízkých teplot) můžeme přesně popsat polynomem druhého stupně. Pro užší teplotní rozsahy je možné závislost vyjádřit vztahem:

$$R = R_0 \cdot [1 + TKR \cdot (\vartheta - \vartheta_0)], \quad (1.3.)$$

kde R (Ω) je odpor kovu, R_0 (Ω) je odpor kovu při teplotě 0°C , TKR ($^\circ\text{C}^{-1}$) je teplotní součinitel odporu a ϑ ($^\circ\text{C}$) je teplota.



Obr. 2.3: Závislost relativního odporu kovu na teplotě (převzato z [20])

Dalším parametrem, který úzce souvisí s parametrem TKR a můžeme se s ním často setkat, je citlivost RTD senzoru, značená K_{RTD} ($\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). Vyjadřuje změnu odporu senzoru vztahenou ke změně teploty o 1°C . [21]

$$K_{RTD} = R_0 \cdot TKR \quad (1.4.)$$

Měření odporu se obvykle aplikuje pomocí dvoubodové metody. Elektrický proud tekoucí přes RTD prvek umístěný v měřené oblasti vytvoří úbytek napětí na daném prvku, podle kterého se zjistí odpor prvku. Tento způsob měření není nejpřesnější, protože nelze kompenzovat odpor přívodních vodičů. Pro velmi přesné měření se používá čtyřbodové měření, které eliminuje vliv přívodních vodičů. [22]

RTD prvky se běžně specifikují podle jejich odporu při 0 °C, nejběžnějšími hodnotami jsou 100Ω a 1000Ω. Nejpoužívanějším kovem je platina, a to kvůli několika faktorům: téměř lineární závislosti teploty a odporu, chemické netečnosti a časové stabilitě. [19]

Tab. 2.1: Materiály pro odporový způsob měření teploty (převzato z [23])

Materiál čidla	Základní odpor R_0 (Ω)	Poměr odporů $\frac{R_{100\text{ °C}}}{R_0}$	Měřicí rozsah (°C)	TCR (°C ⁻¹)
Platina	100	1,3850	-200 až 850	3,85 až 3,93 · 10 ⁻³
Níkl	100	1,6180	-60 až 250	6,17 až 6,70 · 10 ⁻³
Měď	100	1,4260	-200 až 200	4,26 až 4,33 · 10 ⁻³

2.1.3 Polovodičové odporové měření teploty

Polovodičové odporové senzory teploty využívají závislosti odporu na teplotě podobně jako odporové senzory zmíněné v kapitole (2.1.2). Rozdílem je, že se jedná o odpor polovodiče nikoliv kovu. Tyto senzory lze rozdělit do dvou skupin: [17]

- Termistory
 - ❖ NTC (negativní teplotní koeficient) – termistory (negastory)
 - ❖ PTC (pozitivní teplotní koeficient) – termistory (pozistory)
- Monokrystalické odporové senzory
- **Negastory**

Negastory jsou nejpoužívanějším zástupcem této kategorie. Jsou vyráběny spékáním oxidů niklu, manganu, železa a dalších. Závislost odporu na teplotě je nelineární a odpor s teplotou klesá podle vztahu: [17]

$$R_1 = R_r \cdot e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r}\right)}, \quad (1.5.)$$

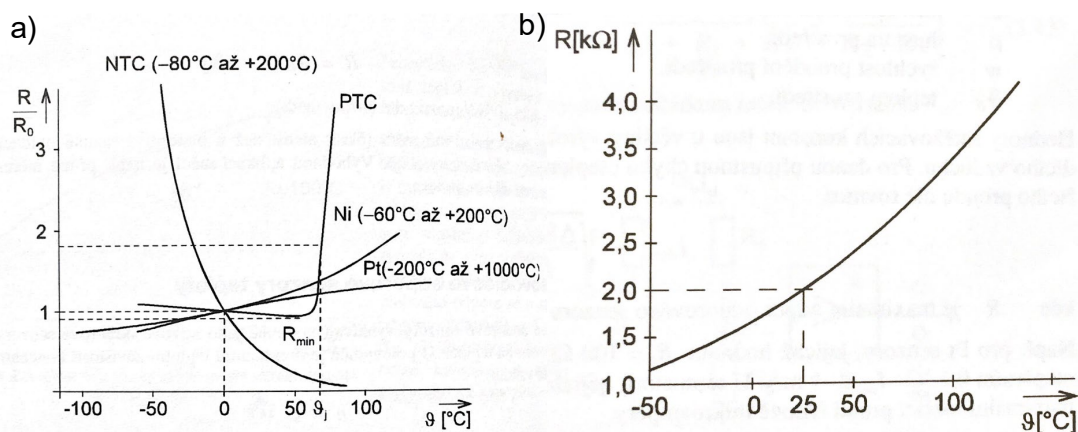
kde R_1 (Ω) je odpor termistoru při teplotě T_1 (°C), R_r (Ω) je odpor termistoru při teplotě T_r (°C), B (°C⁻¹) je teplotní konstanta, která závisí na příslušném materiálu.

- **Pozistory**

Se vyrábějí z polykrystalické feroelektrické keramiky. Většinou se používají pro měření teploty ve velmi úzkém intervalu, kvůli tvaru jejich charakteristiky. [17]

- **Monokrystalické odporové senzory**

Jsou vytvořeny nejčastěji z křemíku, ale i z germania či india. Monokrystalický křemík je vhodný k měření teploty v rozsahu od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odpor senzoru se v závislosti na teplotě parabolicky zvyšuje. [17]



Obr. 2.4: a) Teplotní závislost odporových senzorů teploty b) charakteristika Si senzoru teploty (převzato z [17])

2.1.4 Polovodičové měření teploty

Tento způsob měření teploty využívá teplotní závislost napětí PN přechodu v propustném směru. Ze Shockleyho rovnice vyjádříme vztah: [17]

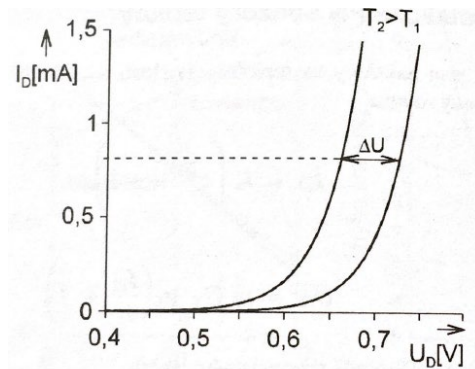
$$U_D = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right), \quad (1.6.)$$

kde U_D je napětí na PN-diodě v propustném směru, I_S je saturační proud PN-diody v závěrném směru, I_D je proud PN-diodou v propustném směru, m je rekombinační koeficient polovodiče ($1 \leq m \leq 2$), U_T je teplotní napětí dané vztahem $U = \frac{k \cdot T}{e}$, kde k je Boltzmannova konstanta, e je elementární náboj a T je teplota v Kelvinech.

Po vyjádření teplotní závislosti saturačního proudu získáme vztah: [17]

$$\left(\frac{\partial U_D}{\partial T}\right)_{I_D} = m \cdot \frac{k}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_{S0}}\right) - \frac{U_{g0}}{T_0} \quad (1.7.)$$

Pro vztažnou teplotu $T_0 = 298\text{ K}$ je $\left(\frac{\partial U_D}{\partial T}\right)_{I_D} = -(2,0 \text{ až } 2,5)\text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}$. Tento efekt se dále využívá u tranzistoru na přechodu báze-emitor (proudové zrcadlo). [17]



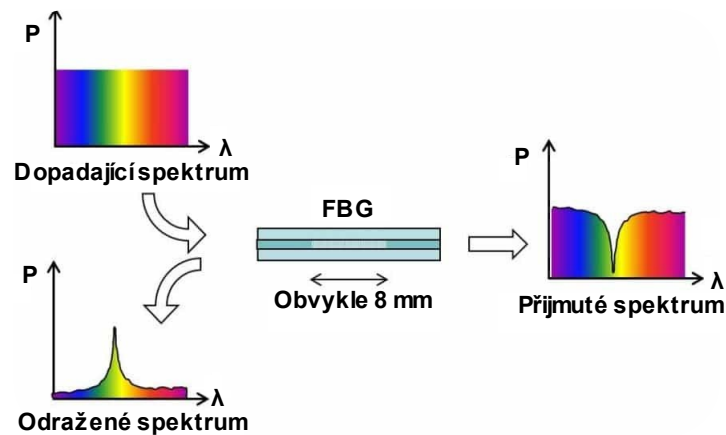
Obr. 2.5: Teplotní závislost napětí $\Delta U_D = f(T)$ PN-diody (převzato z [17])

2.1.5 Měření teploty pomocí Braggových vláknově optických mřížek

Technologie FBG (Braggova vláknová mřížka) je jednou z nejoblíbenějších možností využití optických vláken jako senzorů pro měření napětí nebo teploty. Optické vlákno je tvořeno periodicky opakujícími se mřížkami v jeho podélném směru uvnitř jádra vlákna. Tyto mřížky lze vyrobit různými technikami (obvykle se používá UV laserový paprsek). FBG odráží úzkopásmovou spektrální složku zdroje světla připojeného do vlákna, která odpovídá λ_B Braggově vlnové délce. Tato spektrální složka bude ve vysílaném signálu chybět, zbytek tohoto světla prochází až na konec vlákna. [24]

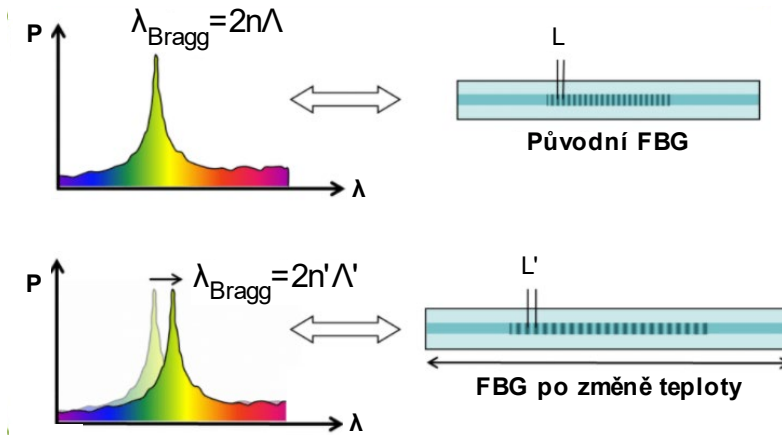
$$\lambda_b = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (1.8.)$$

kde λ_B (m) je Braggova vlnová délka, n_{eff} (–) je index lomu světla ve vláknu a Λ (m) je perioda mřížky.



Obr. 2.6: Princip Braggových vláknově optických mřížek (překresleno z [25])

V důsledku závislosti parametrů n a Λ na teplotě se změní i vlnová délka odražené složky. Tato závislost je dobře známá, což umožňuje určit teplotu pomocí odražené λ_B . [24,25]



Obr. 2.7: Odezva FBG na změnu teploty (překresleno z [25])

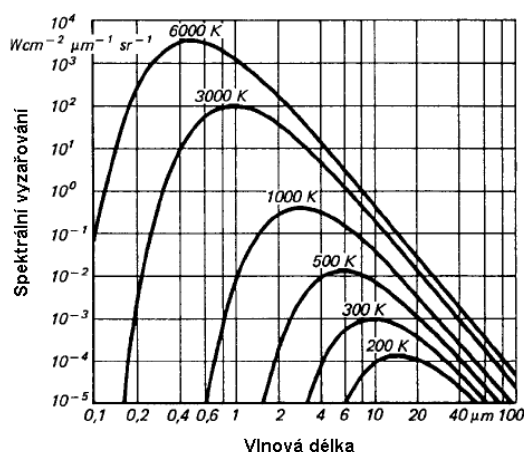
2.2 Bezkontaktní měření teploty

Každé těleso s vyšší teplotou, než je teplota absolutní nuly ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$), vyzařuje ze svého povrchu elektromagnetické záření, které je úměrné vnitřní teplotě: [26]

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1.9.)$$

kde h je Planckova konstanta, f (Hz) je frekvence elektromagnetického záření, c ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je rychlost světla a λ (m) je vlnová délka elektromagnetického záření.

Jednou částí tohoto takzvaného vnitřního záření je infračervené záření, které lze použít k měření teploty. S pomocí objektivu jsou paprsky zaostřeny na detektorový prvek, který generuje elektrický signál úměrný záření. [26] Infračervené záření pokrývá omezenou část elektromagnetického spektra (přibližně od $0,78\text{ }\mu\text{m}$ do $1000\text{ }\mu\text{m}$). Pro infračervené měření teploty jsou nejdůležitější vlnové délky v rozmezí od $0,7$ do $20\text{ }\mu\text{m}$ (při $\lambda > 20\text{ }\mu\text{m}$ je úroveň energie velmi nízká a detektory nejsou schopné tyto vlnové délky odhalit). Infračervené záření se šíří od zdroje po přímkách a může být odraženo nebo absorbováno překážkami. Většina těles bude částečně absorbovat a odrážet část dopadajícího záření, dále bude vyzařovat část energie, kterou absorbovalo. [27] Všechny tyto funkce přispívají k faktoru emisivity tělesa nebo povrchu materiálu. Množství energie, které bude těleso odrážet a/nebo absorbovat, velmi závisí na povaze jeho povrchu (např. hladkost a struktura). [27]



Obr. 2.8: Vyzářovací charakteristika černého tělesa v závislosti na jeho teplotě (převzato z [28])

- **Černé těleso**

Černé těleso je abstraktní fyzické těleso, které absorbuje veškeré přicházející záření. Nevykazuje reflektivní, ani transmisivní vlastnosti $a = \varepsilon = 1$ (a absorpce, ε emisivita), vyzářuje maximální možnou energii pro každou vlnovou délku. Je základem porozumění fyzickým základům bezkontaktního měření teploty a pro kalibraci bezkontaktního teploměru. [26]

- **Šedé těleso**

Pouze několik těles splňuje požadavek ideálního černého tělesa. Mnoho těles vyzářuje při stejné teplotě mnohem méně záření. Emisivita ε definuje vztah hodnoty záření ve skutečném a černém tělese, může nabývat hodnot mezi 0 (lesklé zrcadlo) a 1 (černé těleso). Infračervený senzor přijímá emitované záření z povrchu objektu, ale také odražené záření z okolí a infračervené záření, které proniká měřeným objektem: [26]

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (1.10.)$$

kde ε je emisivita, ρ je odraz, τ je propustnost.

Většina těles nevykazuje propustnost v infračervené oblasti, proto platí následující:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (1.11.)$$

Předchozí diskuze objasňuje, že emisivita je obzvláště důležitým parametrem při bezkontaktním měření teploty. Přesný odečet teploty lze zajistit, pokud známe konkrétní emisivitu objektu (lze získat z tabulek či ji určit srovnávacím měřením). Většina neprůhledných nekovových materiálů má relativně vysoký a konstantní faktor emisivity mezi 0,85 a 0,95 (kůže, dřevo, textil, keramika apod.). U většiny neoxidovaných kovových

materiálů se emisivita pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5. Proto je velmi obtížné měřit jejich teplotu pomocí infračervených teploměrů. [27]

Výhody bezkontaktního měření teploty:

- Měření teploty při pohybu a předmětů v nebezpečném prostředí.
- Velmi rychlá doba odezvy a expozice.
- Neinteraktivní měření, žádný vliv na měřicí objekt.
- A další.

Existují dvě hlavní skupiny infračervených detektorů.

- **Tepelné**

U těchto detektorů se mění teplota citlivých prvků v důsledku absorpce elektromagnetického záření. [17]

- **Kvantové**

Využívají přímou interakci dopadajícího elektromagnetického záření na strukturu senzoru. Rozhodujícím rozdílem mezi kvantovými detektory a tepelnými detektory je jejich rychlejší reakce na absorbované záření. Režim činnosti kvantových detektorů je založen na fotodiodách ve fotonapět'ovém režimu. [17]

2.3 Technické parametry senzorů

Parametry nám pomáhají charakterizovat stav či proces určitého senzoru. Parametry senzorů se rozdělují na dvě hlavní skupiny, a to na statické a dynamické. Dále můžeme hovořit o kalibrační křivce a třídách přesnosti senzoru.

2.3.1 Statické parametry senzoru

- **Citlivost**

Citlivost senzoru je definována jako minimální vstup fyzického parametru, který vytvoří detekovatelnou změnu na výstupu. [29]

$$\text{Citlivost} = \Delta y / \Delta x \quad (1.12.)$$

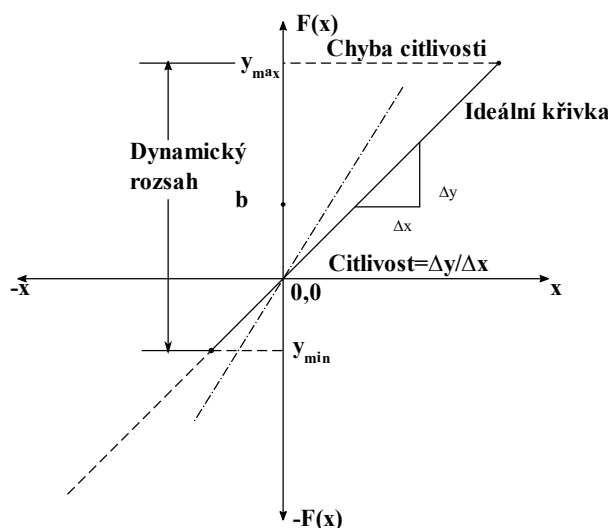
- **Práh citlivosti**

Je dán hodnotou snímané veličiny, při níž je na výstupu senzoru signál odpovídající střední kvadratické odchylce šumu senzoru. [17]

- **Rozsah**

Rozsah snímače je maximální a minimální hodnota dané veličiny, kterou lze měřit. [30] Velmi často není rozsah symetrický, ale mívá jiný rozsah kladných a záporných hodnot. Například u rtuťového teploměru je měřený rozsah obvykle od 35 °C do 42 °C. Z obrázku 2.9 můžeme vyčíst, že rozsah snímače je:

$$R = Y_{max} - Y_{min} \quad (1.13.)$$



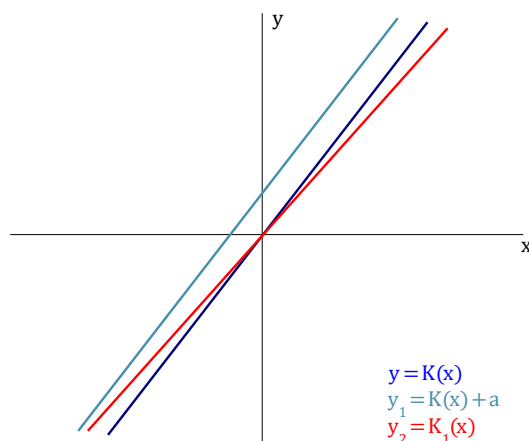
Obr. 2.9: Základní parametry senzorů (překresleno z [29])

- **Reprodukovatelnost**

Je definována jako schopnost senzoru produkovat stejné výstupní hodnoty při použití stejného vstupu za neměnných okolních podmínek. [30]

- **Aditivní a multiplikační chyby**

Aditivní chyba se projevuje posunem jmenovité lineární charakteristiky. Ta může být způsobena vlivem teplotního, časového, napájecího či jiného driftu. [17] Oproti tomu multiplikační chyba se projevuje ekvivalentní změnou citlivosti senzoru. Tato chyba je závislá na hodnotě měřené veličiny a mění sklon statické charakteristiky. Je způsobena změnou odporové sítě zesilovačů, vlivem jiných odporových veličin a dalších. Na obrázku 2.10 je zeleně znázorněna aditivní chyba a červeně multiplikační chyba.



Obr. 2.10: Znárodnění aditivní a multiplikativní chyby

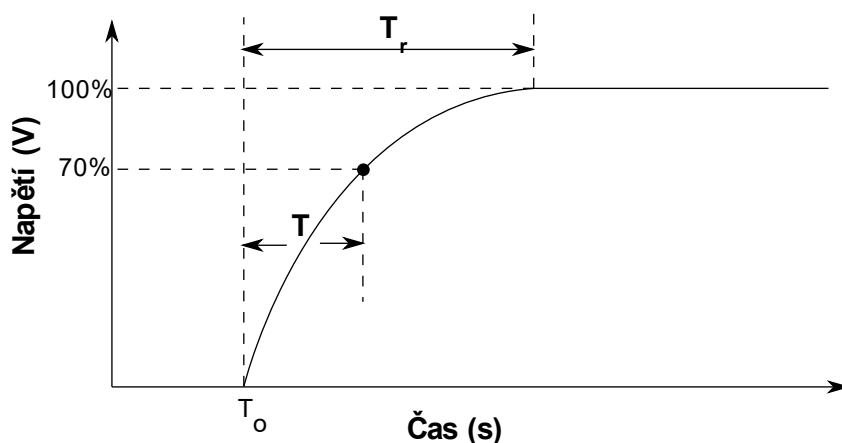
- **Linearita**

Linearita je maximální odchylka mezi naměřenými hodnotami snímače od ideální křivky.

2.3.2 Dynamické parametry senzoru

- **Časová konstanta**

Senzory nemění stav výstupu okamžitě po změně vstupního parametru. Na nový stav se změní až po určité době, která se nazývá doba odezvy T_r na obrázku 2.11. Čas odezvy lze definovat jako čas potřebný k tomu, aby se výstup snímače změnil z předchozího stavu na konečnou ustálenou hodnotu s ohledem na toleranční pásmo nové hodnoty. Oproti tomu časová konstanta T systému je definována podobným způsobem jako u kondenzátoru nabíjeného odporem. Obvykle je kratší než doba odezvy přibližně o 70 % z celkové změny. [29]



Obr. 2.11: Příklad časové konstanty (překresleno z [29])

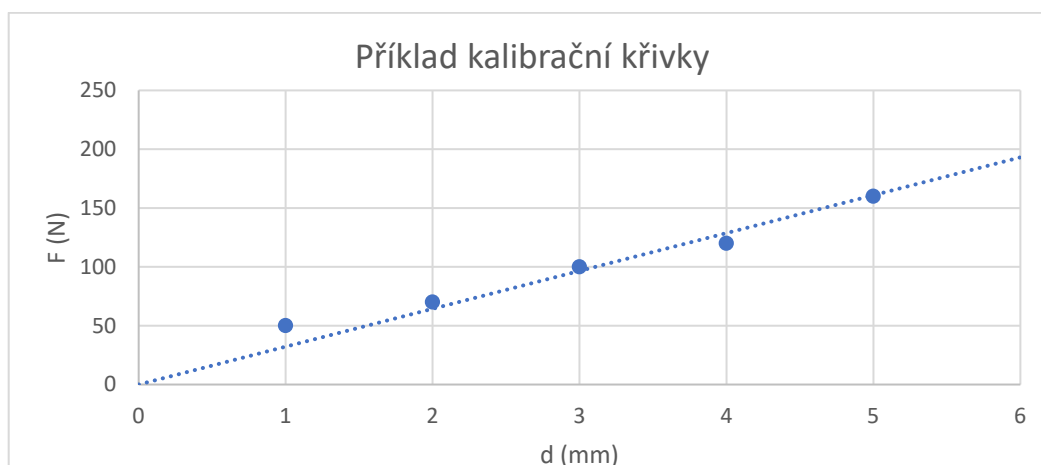
- **Parametry šumu**

Šum je náhodná odchylka signálu, která se mění v čase. Šum může být způsoben mnoha vlivy (špatný kontakt, elektromagnetické rušení, oteplení vlivem procházejícího proudu atd.).

2.3.3 Kalibrační křivka senzoru

Kalibrační křivka stanovuje vztah mezi signálem generovaným měřicím přístrojem a měřenou veličinou. Při měření neznámé hodnoty se neznámý signál převede na známý pomocí kalibrační křivky.

K vytvoření kalibrační křivky se změří hodnota signálu generovaného měřicím přístrojem a pomocí dalšího referenčního přístroje se zaznamená měřená veličina. Vytvoří se graf s příslušnými body a nakreslí se přímka co nejlépe všem bodům. Přímku lze vytvořit podle celkového chování jednotlivých bodů a jim příslušejícím matematických vzorců. [31,32]



Obr. 2.12 Příklad kalibrační křivky

2.3.4 Třídy přesnosti senzorů

TP (třída přesnosti) měřicích přístrojů určuje maximální chyby měření, které zůstanou za stanovených provozních podmínek ve stanovených mezích. TP je obecně identifikována (kladným) číslem, znakem nebo symbolem. TP slouží k porovnání podobných senzorů jako souhrnné (a výrazně zjednodušující) kritérium výběru. [33]

Tab. 2.2: Shrnutí tříd přesnosti senzorů RTD (převzato z [34])

TP čidla RTD	Hodnota odporu při 0 °C	Přípustná změna měřené teploty
AA	$\pm 0,04 \%$	$\pm [0,1 \text{ °C} + (0,0017 \cdot T)]$
A	$\pm 0,06 \%$	$\pm [0,15 \text{ °C} + (0,002 \cdot T)]$
B	$\pm 0,12 \%$	$\pm [0,3 \text{ °C} + (0,005 \cdot T)]$
C	$\pm 0,23 \%$	$\pm [0,6 \text{ °C} + (0,01 \cdot T)]$

Tab. 2.3: Vybrané třídy přesnosti pro termočlánky podle ČSN EN 60584-2 (převzato z [35])

Typ	Rozsah (°C)	TP 1	Rozsah (°C)	TP 2
T	-40 – 350	$\pm 0,5 \text{ °C}$ nebo $0,004 \cdot (t)$	-40 – 350	$\pm 1,0 \text{ °C}$ nebo $0,075 \cdot (t)$
E	-40 – 800	$\pm 1,5 \text{ °C}$ nebo $0,004 \cdot (t)$	-40 – 900	$\pm 2,5 \text{ °C}$ nebo $0,075 \cdot (t)$
J	-40 – 750	$\pm 1,5 \text{ °C}$ nebo $0,004 \cdot (t)$	-40 – 750	$\pm 2,5 \text{ °C}$ nebo $0,075 \cdot (t)$
K	-40 – 1000	$\pm 1,5 \text{ °C}$ nebo $0,004 \cdot (t)$	-40 – 1200	$\pm 2,5 \text{ °C}$ nebo $0,075 \cdot (t)$
N	-40 – 1000	$\pm 1,5 \text{ °C}$ nebo $0,004 \cdot (t)$	-40 – 1200	$\pm 2,5 \text{ °C}$ nebo $0,075 \cdot (t)$
S/R	0 – 1600	$\pm 1,0 \text{ °C}$ nebo $1,0 + 0,003(t - 1100) \text{ °C}$	0 – 1600	$\pm 1,5 \text{ °C}$ nebo $0,075 \cdot (t)$
B	-----		600 – 1700	$\pm 1,5 \text{ °C}$ nebo $0,075 \cdot (t)$

3 Přehled textilních senzorů teploty

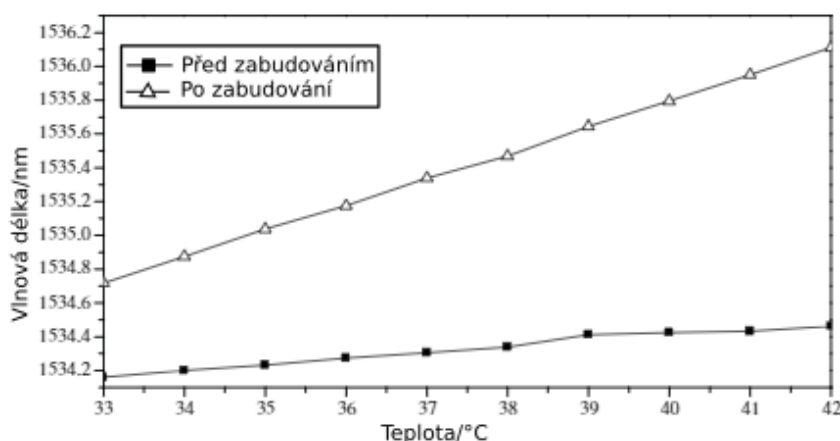
Tato kapitola představuje textilní senzory teploty. Nejprve jsou popsány typy textilních senzorů teploty v rámci výzkumu, dále je představen komerčně dostupný textilní teplotní senzor, nakonec jsou všechny senzory porovnány podle kritérií a vyhodnoceny.

3.1 Literární rešerše

V této podkapitole je postupně představeno pět typů textilních teplotních senzorů ve fázi výzkumu a jeden komerční senzor. Jedná se o textilní teplotní senzor pracující v optickém vláknu na principu Braggových mřížek kapitola 3.1.1., dále o termistorovém provedení kapitola 3.1.2, dva RTD textilní senzory kapitoly 3.1.3 a 3.1.4 a nakonec textilní senzor pracující na termoelektrickém jevu kapitola 3.1.5. Komerční senzor pracuje na principu RTD kapitola 3.1.6.

3.1.1 Optický textilní senzor (Braggova mřížka)

Tento článek představuje textilní nositelný senzor pro měření teploty lidského těla, který využívá senzory na bázi FBG. Holé FBG senzory mají velmi nízkou teplotní citlivost $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ při vlnové délce asi 1550 nm . Zlepšení teplotní citlivosti FBG senzoru se docílilo pomocí jeho částečného zabudování do pásu naplněného polymerem. Jak ukazuje obrázek 3.1, s polymerem je teplotní citlivost FBG $150 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, což je téměř 15krát vyšší než citlivost holých FBG senzorů.



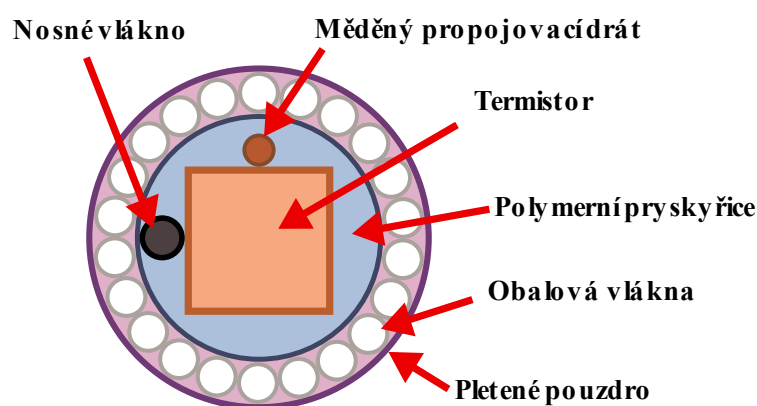
Obr. 3.1: Příklad změny teploty a vlnové délky pro senzory FBG zabalené v polymeru a holé senzory FBG (překresleno z [36])

Tyto textilní FBG senzory lze zabudovat do textilních tkanin, které mohou být tkané, netkané nebo pletené. Celkem je rozmístěno pět měřících bodů, které poskytují vážený průměr pro

střední teplotu pokožky. Při použití váhových koeficientů je přesnost senzoru $\pm 0,18$ °C. Sensory FBG jsou malé, přenosné, kompatibilní s přízí a snadno se proplétají do textilií. [36]

3.1.2 Termistor zapouzdřený do příze

V této studii byla použita technologie zapouzdření malých termistorů do přízí a následně do textilií k vytvoření oděvů schopných měřit teplotu. Proces zapouzdření je nezbytný k ochraně termistoru před mechanickým a chemickým namáháním. Proces zapouzdření používá tři vrstvy: polymerní pryskyřice, výplňová vlákna a pletený plášť, jak je uvedeno na obrázku 3.2. Výplňová vlákna a pletený plášť by měly mít co nejmenší vliv na přenos tepla termistoru.



Obr. 3.2: Schématické znázornění zapouzdření termistoru do příze (převzato z [37])

Celkový průměr elektronické příze používané pro kalibrační experimenty je 0,87 mm. V teplotním rozsahu 22,25 až 62,15 °C bylo 89 % hodnot měření příze v rozmezí $\pm 1,0$ °C od hodnot kalibračního termistoru a 63 % v požadovaných $\pm 0,5$ °C. Při odstranění třetí příze z pěti (hodnoty se lišily více než u ostatních) 98 % hodnot se vyskytovalo v rozmezí $\pm 1,0$ °C a 73 % pro $\pm 0,5$ °C. Maximální doba skokové reakce je $0,17 \pm 0,07$ s pro ohřev a $0,19 \pm 0,01$ s pro chlazení.

Příze byly následně integrovány do prototypu ponožky snímající teplotu. Prototyp ponožky byl vyroben pomocí pěti elektronických teplotních přízí umístěných do různých míst. Naměřené hodnoty se lišily maximálně o 0,7 °C. [37]

- **Vývoj nových oděvů snímání teploty k aplikacím pro monitorování zdraví**

Tato práce se zabývá praktickými aspekty měření teploty na těle a zaměřuje se na vytváření inovativních oděvů (páska na ruku, rukavice a ponožka) snímajících teplotu. Výzkumný tým

a snímající element je shodný s prací popsanou výše (začátek kapitoly 3.1.2). Zkušenost z výroby pásky na ruku se uplatnila při návrhu rukavice a ponožky. [37]

- **Rukavice**

Byly zkoumány tři polohy na ruce (dlaň, hřbet ruky, strana ruky), přičemž každá z těchto pozic poskytovala jiné kontaktní povrchy pro přízi. Průměrný teplotní rozdíl tří dobrovolníků mezi teplotou měřicí příze a termočlánkem byl 2,1 °C pro dlaň, 1,6 °C pro hřbet ruky a 1,0 °C pro bok ruky. Dále se práce zabývala chybou měření při měnícím se tlaku na snímané příze. Na snímané příze byly přidány závaží, které zvyšovaly tlak snímané příze na ruku. Chyba měření se snižovala se zvyšující se hmotností závaží. [38]

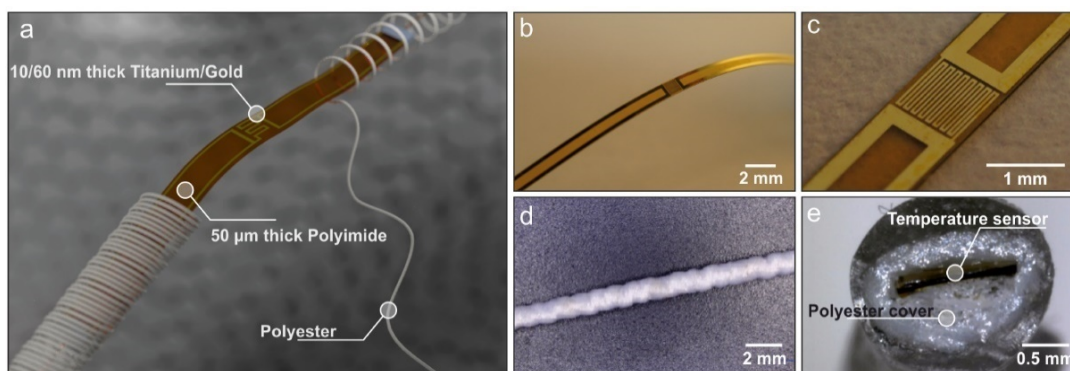
- **Ponožka**

Ponožka dokáže detekovat teplotu v pěti různých bodech. Pokud velikost ponožky odpovídala velikosti nohy měřeného subjektu rozmezí teplot bylo maximálně ± 1 °C, pokud ponožka subjektu neodpovídala, chyba se samozřejmě zvyšovala. [38]

3.1.3 Flexibilní fóliový teplotní senzor

Tato práce zkoumá účinky zabudování flexibilních RTD fólií do vláken textilní příze. V této práci byly prototypové příze vytvořeny pomocí tří různých technik: pletené opletení, opletení a zakrytí. Nakonec byla pletená snímající příze integrována do pásky, která byla pletena pomocí průmyslového pletacího stroje.

Teplotní senzory byly vyrobeny na 50 μm silném polyimidovém substrátu. Jednotlivé senzory byly 75 mm dlouhé a 1 mm široké. Aktivní vrstva těchto zařízení se skládá z 10/60 nm titanu/zlata. Titan byl nanesen za účelem zlepšení adheze zlata k polyimidovému substrátu, zatímco zlato bylo použito jako tepelně citlivá vrstva.

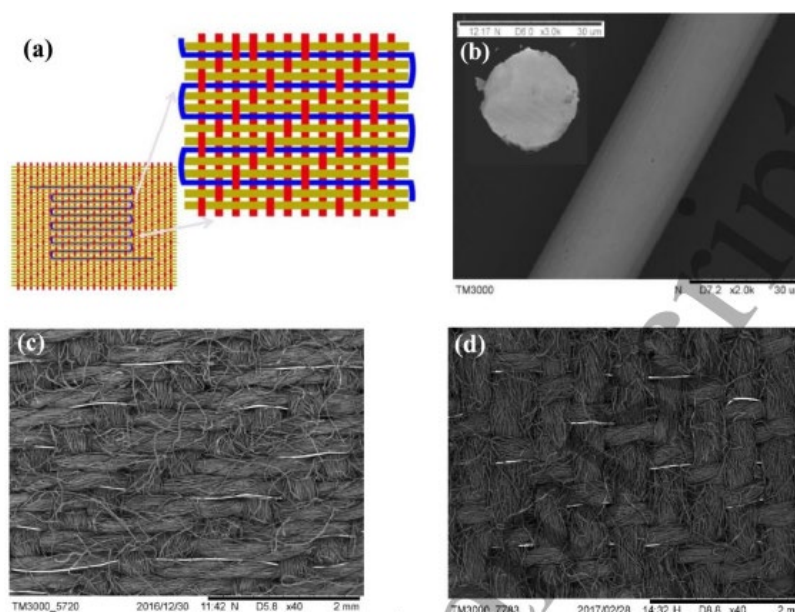


Obr. 3.3: a) Koncept flexibilního teplotního senzoru zabudovaného do textilní příze. b) Ohýbání nekrytých flexibilních RTD fólií c) Detailní záběr na snímací oblast RTD fólie. d) RTD zabudovaný do pletené polyesterové příze. e) Průřez pletené příze (převzato z [38])

Citlivost krytých senzorů zůstala lineární a maximální snížení efektivní citlivosti bylo pouze 14 %. Kromě toho bylo upozorováno, že účinky různých technik výroby příze na odezvu a dobu zotavení senzorů jsou zanedbatelné ve srovnání s rychlostí změny teploty kůže. Tepelné časové konstanty pro všechny příze byly <10 s pro zahřívání a chlazení. Všechny tři příze nebyly ovlivňovány jednosměrným ohýbáním. [38]

3.1.4 Látková snímací síť pro průběžné měření teploty kůže

Textilní senzor teploty se vyrábí integrací spojitého kovového vlákna do strukturované tkaniny složené z nevodivých přízí konvenční technologií tkaní pomocí poloautomatického tkacího stroje. Výsledný snímač teploty tkaniny pracuje na základě změny odporu kovového vlákna při změně teploty. Obrázek 3.4 a) ukazuje strukturu tkaniny a obrázek 3.4 b) snímek výsledného vzorku pomocí SEM (rastrovací elektronový mikroskop), který se skládá ze dvou sad vláken, tj. platinových kovových vláken v organizovaném plovoucím vzoru v tkanině, kde jsou příze z přírodní bavlny, jak příčné (podél šířky), tak podélné (podél délky). Kontinuální kovové vlákno, jako další příčná část, je primárně prokládáno s podélnými vlákny a jejich prokládání vede k soudržné a stabilní sestavě (obrázek 3.4a).



Obr. 3.4: a) Struktura tkaniny teplotního senzoru. b) Snímek vlákna pomocí SEM (rastrovacího elektronového mikroskopu). c-d) Přední a zadní pohled na tkaný teplotní senzor. (převzato z [40])

Snímací plocha je $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ s počátečním odporem $\sim 60 \Omega$ a průměrnou délkou kovového vlákna asi 150 mm; vzdálenost mezi jednotlivými řádky je mezera $\sim 800 \mu\text{m}$. Tloušťka tkaniny je $686 \mu\text{m}$; hmotnost je 160 g/m^2 ; a hustota je 20 vláken na centimetr ve vodorovném i svislém směru.

Výsledná sestava textilní látky vykazuje stabilní teplotní citlivost ($3,92 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$), vynikající flexibilitu a prodyšnost, vysokou přesnost (chyba: $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$), krátkou dobu odezvy, velmi nízkou hysterezi v cyklických podmínkách, elektrickou stabilitu při namáhání 40 % (20 % až 30 % napětí je průměrný poměr prodloužení lidské kůže). Dále látka vykazuje velmi dobrou únavovou životnost (více než 10 000 cyklů při 30% namáhání). [40]

3.1.5 Tištěné termočlánky na textilním podkladu

Tento článek pojednává o tištěných termočláncích z organických vodivých polymerů na textilním podkladu. Jedná se o dva typy vodivých polymerů, PEDOT: PSS a PANI (polyanilin). Výhodou polymerů je, že jsou pružné, potenciálně omyvatelné. Dále jsou odolnější vůči únavě než kovové ekvivalenty. Termočlánky jsou vyrobeny sítotiskovou metodou, která je levnější a poskytuje vysokou flexibilitu v uspořádání vodičů a senzorů.

Byly vyrobeny tři kombinace materiálů, měď/PANI, měď/PEDOT: PSS a PEDOT: Bylo zjištěno, že elektrický odpor je v rozmezí 20 k Ω /m pro PEDOT: PSS a 8 M Ω /m pro PANI při pokojové teplotě. Elektrický odpor v závislosti na teplotě se snižuje u PEDOT: PSS i PANI. Hlavní změna odporu byla reverzibilní, ale došlo k malému posunu odporu při vícenásobné změně teploty.

Seebeckův koeficient je přibližně 18 $\mu\text{V/K}$ pro PEDOT: PSS (platné v celém měřeném teplotním rozsahu od 235 do 350 K) a 15 $\mu\text{V/K}$ pro PANI (platné pro teploty až 335 K), kdy byly termočlánky realizovány v kombinaci s mědí. Když byly polymerní termočlánky vytvořeny kombinací PEDOT: PSS a PANI, bylo pozorováno termoelektrické napětí asi 10 $\mu\text{V/K}$.

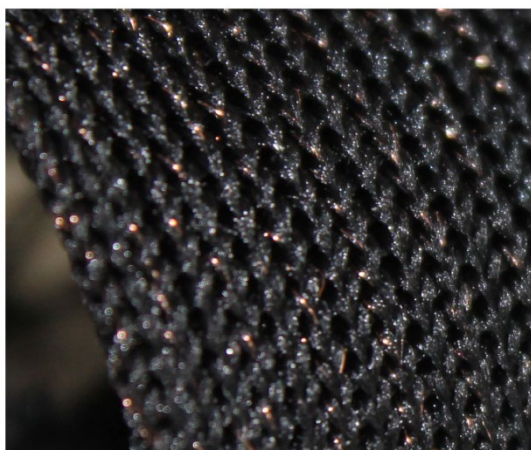
Odhadnutá přesnost měření je řádově $\pm 1 \text{ K}$, ale účinky statické elektřiny a výrazné protažení nebo ohnutí termočlánců ji mohou snížit. [41]

3.1.6 Komerční odporový senzor

Firma Knitronix vyvinula měkký senzor teploty, který je schopný měřit teplotu i na nerovném povrchu. Celo-textilní provedení zaručuje pružnost, prodyšnost, přizpůsobivost a roztažitelnost. Senzor může být umístěn do přímého kontaktu s pokožkou. Pracuje na RTD principu, teplota je zprůměrována z celého povrchu snímače. Senzor má velmi nízkou tepelnou setrvačnost a hysterezi. Je to kvalitní nástroj pro měření teploty mezi lidským tělem a měkkým povrchem jako je matrace nebo polštář. [42]

Tab. 3.1: Technické parametry teplotního senzoru od firmy Knitronix (převzato z [42])

Parametr	Hodnota
Maximální měřitelná teplota	125 °C
Minimální měřitelná teplota	-50 °C
Odpor při 25 °C	570 k Ω
Roztažitelnost (podélná)	15 %
Roztažitelnost (příčná)	15 %
Hmotnost	6 g
Odolnost vůči praní	Volitelné
Rozměry	7x8 cm
Maximální rozměry	50x50 cm



Obr. 3.5: Přibližná struktura textilního senzoru od firmy Knitronix (převzato z [42])

3.2 Zhodnocení textilních teplotních senzorů

Ke zhodnocení vybraných textilních teplotních senzorů bylo vybráno sedm kritérií, které rozlišují vlastnosti oděvu a elektrické vlastnosti:

- Snadnosti integrace do textilií
- Cena
- Mechanická odolnost
- Odolnost proti praní
- Přesnost měření
- Flexibilita
- Prodyšnost

Každé kritérium je váhově vyjádřeno. Váhové vyjádření bylo získáno pomocí srovnávací matice (tabulka 3.2), která postupně porovnává významnost dvou kritérií proti sobě. Postupně se kladou otázky, zda je pro daný cíl více důležité kritérium jedna nebo kritérium dva atd. Z matice se zjistí frekvence výskytu jednotlivých kritérií a pomocí vzorce se získá váhový koeficient:

$$(\text{Váhový koeficient}) = \frac{(\text{frekvence daného cíle}) \cdot 10}{(\text{nejvyšší frekvence})} \quad (1.14.)$$

Tab. 3.2: Porovnávací matice kritérií teplotních senzorů

	Kritéria	Frekvence	Váha							
1	Cena	3	5							
2	Snadnost integrace	1	2	1						
3	Mechanická odolnost	5	8	3	3					
4	Odolnost proti praní	2	3	1	4	3				
5	Přesnost měření	6	10	5	5	5	5			
6	Flexibilita	3	5	6	6	3	6	5		
7	Prodyšnost	1	2	1	2	3	4	5	7	

Pomocí výše vypočtených váhových koeficientů se získá celkový výsledek hodnocení senzoru. Každému kritériu lze udělit body od 1 do 5 (1–nejhorší, 5–nejlepší). Body se poté vynásobí s příslušným váhovým koeficientem, výsledky se následně sečtou a my získáme celkové číselné zhodnocení senzoru.

Tab. 3.3: Zhodnocení senzorů zahrnutých v rešerši

	<i>Textilní FBG senzor</i>	<i>Textilní termistor</i>	<i>Textilní RTD senzor (tištěný na fólii)</i>	<i>Textilní RTD senzor (vyšíváný)</i>	<i>Textilní termočlánek</i>	<i>Textilní komerční senzor</i>
<i>Snadnost integrace</i>	1 2 3 4 X	1 2 3 4 X	1 2 3 4 X	1 2 3 4 X	1 2 X 4 5	1 2 3 4 X
<i>Cena</i>	X 2 3 4 5	1 2 3 X 5	1 2 X 4 5	1 2 3 X 5	1 2 X 4 5	1 X 3 4 5
<i>Mechanická odolnost</i>	1 2 X 4 5	1 2 3 X 5	1 2 X 4 5	1 2 3 X 5	1 2 X 4 5	1 2 3 4 X
<i>Odolnost proti praní</i>	1 2 X 4 5	1 2 3 X 5	1 X 3 4 5	1 2 3 X 5	1 X 3 4 5	1 2 3 4 X
<i>Přesnost měření</i>	1 2 3 4 X	1 2 X 4 5	1 2 3 X 5	1 2 3 X 5	1 2 X 4 5	1 2 X 4 5
<i>Flexibilita</i>	1 2 X 4 5	1 2 3 4 X	1 2 3 X 5	1 2 3 4 X	1 2 3 X 5	1 2 3 4 X
<i>Prodyšnost</i>	1 2 3 4 X	1 2 3 4 X	1 2 3 X 5	1 2 3 4 X	1 2 X 4 5	1 2 3 4 X
<i>Celkem</i>	144	157	141	167	119	164

Nejlépe z porovnání vyšel vyšívaný RTD senzor (kapitola 3.1.4), který díky jednoduchému výrobnímu procesu je levným, ale zároveň i velmi přesným textilním teplotním senzorem. Senzor je velmi odolný vůči mechanickému poškození a pracím cyklům. Při oděru vlákna se jeho mechanická odolnost snižuje. Senzor nelze použít v bodovém provedení, ale pouze v plošném.

Na druhém místě se umístil komerční senzor od firmy Knitronix (kapitola 3.1.6), který lze zakoupit za 10 €. Jelikož senzor pracuje na stejném principu jako vyšívaný RTD senzor (kapitola 3.1.4), lze s ním měřit teplotu pouze plošně. Vykazuje dobrou mechanickou odolnost a odolnost vůči pracím cyklům díky svojí struktuře.

Třetí místo patří textilnímu termistoru (kapitola 3.1.2), který kvůli jednoduché výrobě (zapouzdření SMD termistoru do textilní nitě), je levným textilním teplotním senzorem a lze ho velmi snadno integrovat do různých druhů oděvů. Příze má kvalitní mechanickou odolnost, ale problém může nastat u svaru termistoru s vodivým drátkem. Přesnost měření není dostatečná pro měření tělesné teploty, ale senzor může být použit pro měření vysokých teplot, kvůli jeho rychlé odezvě na změnu teploty. Plošné měření není možné, lze měřit pouze bodově v místech umístění termistorů.

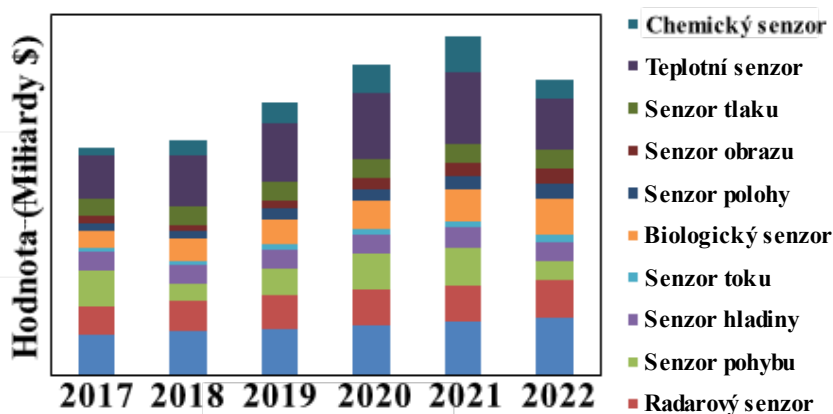
Čtvrté místo obsadil FBG optický senzor, který spadá do kategorie velmi drahých senzorů, kvůli použití optických vláken a složitosti vyhodnocovací elektroniky. Další nevýhodou je jeho nízká odolnost proti praní a mechanická odolnost kvůli lámavosti vláken. Jeho výhodou je velmi vysoká přesnost měření a vysoká odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Senzor umožňuje plošné měření.

Předposlední místo patří tištěnému fóliovému senzoru, který patří mezi dražší senzory, kvůli náročnějšímu výrobnímu procesu a zapouzdření odporové fólie. Další nevýhodou může být odolnost fólie uvnitř příze (například při nízkých teplotách), může fólie praskat či vykazovat jiné problémy. Výhodou je vysoká přesnost měření. Příze může být méně flexibilní a prodyšná než tkané senzory. Lze měřit teplotu plošně i bodově.

Nejhůře dopadl textilní termočlánek, který lze hůře integrovat do textilií než ostatní zmíněné typy. Nevýhodou je i vyšší cena kvůli použití organického polymeru a nižší mechanická odolnost a odolnost vůči pracím cyklům. Lze měřit bodově, k plošnému měření by bylo nutné spojit více termočlánků.

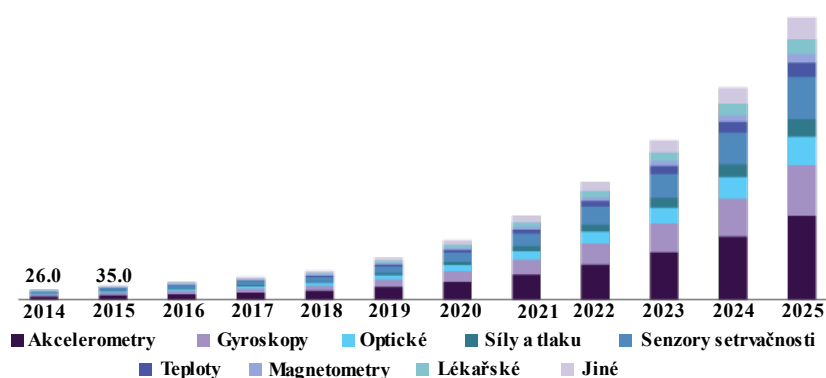
3.3 Aplikace textilních senzorů teploty

Trh prodeje senzorů v posledních letech ročně roste (2017-2022) o 9,2 %. [43] Pokud se podíváme na celkový podíl prodeje jednotlivých typů senzorů, zjistíme, že největší podíl tržeb mají teplotní senzory (obrázek 3.6.).



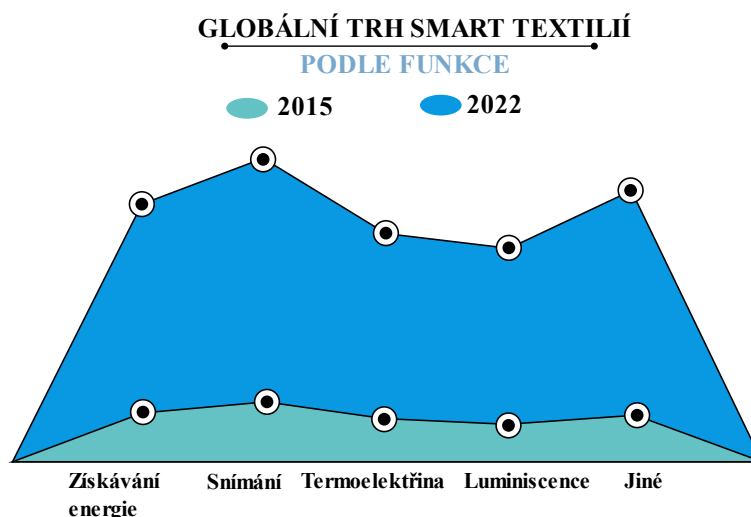
Obr. 3.6: Graf vyjadřující prodej různých druhů senzorů (převzato z[43])

Další porovnání vidíme na obrázku 3.7, které vyjadřuje zastoupení nositelných senzorů (smart textilie, chytré náramky, telefony, hodinky, aj.). Zde je výsledek z mého pohledu hodně ovlivněn především chytrými telefony a hodinkami, proto již zde nejsou tolik zastoupeny teplotní senzory.[44]



Obr. 3.7: Trh zastoupení nositelných senzorů ve Spojených státech amerických v milionech amerických dolarů (převzato z [44])

Poslední porovnání vyjadřuje prognózu trhu smart textilií podle jejich funkce. Největší podíl má funkce snímání, dále pak výroba energie. Nejvíce lukrativní funkcí je luminiscence. [45]



Obr. 3.8: Trh rozdělení smart textilií podle jejich funkce [45]

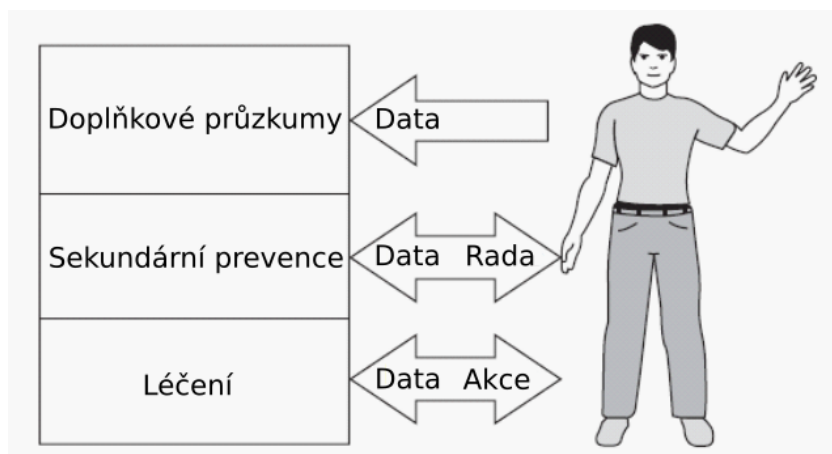
Rozsah využití teplotních textilních senzorů je z velké části podobný použití smart textilií.

Celkem aplikace můžeme rozdělit na tyto hlavní oblasti:

- Aplikace v lékařském prostředí
- Aplikace v ochranných oděvech
- Vyhřívání textilie
- a ostatní

- **Lékařské prostředí**

V lékařském prostředí se uplatňují senzory v několika situacích. Jednou z možností může být monitorování na nemocničním lůžku. Textilní senzory zvyšují pohodlí pacienta a zajistí jeho nepřetržité sledování. V případě náhlého zhoršení stavu může dojít k rychlému zásahu. Další možností je vzdálené monitorování pacienta, který se tak aktivně účastní při léčbě a nepotřebuje nepřetržitou lékařskou péči. V tomto modelu je hlavním spotřebitelem naměřených dat lékař. Zdravotní stav osamocené staršího pacienta může být na dálku monitorován, aby se zjistilo možné zhoršení zdravotního stavu pacienta nebo zjištění náhlých problémů, jako jsou pády nebo jiná zdravotní rizika. [46] Teplotu lze sledovat lokálně například jako varování před vředy na nohách u diabetiků. Je známo, že u vysoce rizikových pacientů s cukrovkou dochází k lokalizované změně teploty kůže v nohou před tvorbou vředů, která se projevuje změnou >2 °C. [37]. Dále lze teplotu sledovat globálně jako teplotu celého těla.

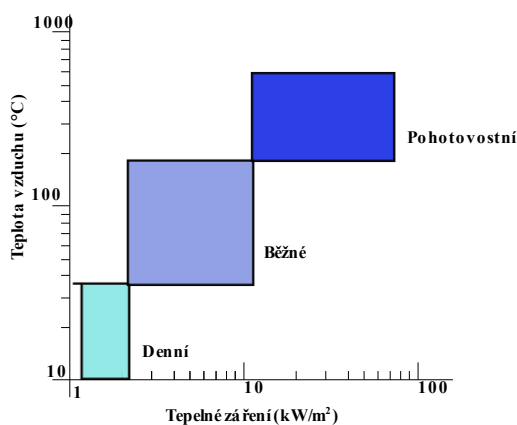


Obr. 3.9: Klasifikace lékařských využití smart textilií podle klinických fází (převzato z [46])

- **Ochranné oděvy**

U tepelně ochranných oděvů je důležité zabránit vnějšímu teplu proudit směrem k tělu (nebo mu vůbec předejít), ale na druhé straně umožnit úniku metabolického tepla do atmosféry. Další funkcí ochranných oděvů je detekovat nebezpečné prostředí, které by mohlo být zdraví nebezpečné pro hasiče nebo jiné záchranné složky. Pracovat ve vysokých teplotách vede k tepelnému stresu a srdečním záchvatům spojeným se stresem. Ve Spojených státech dochází asi k 50 % smrtelných nehod hasičů ve službě v důsledku tepelného stresu. [2]

Tepelný stres při zásahu hasičů můžeme rozdělit do tří oblastí: rutinní, běžná, pohotovostní. V rutinní oblasti se tepelné záření pohybuje do $2,1 \text{ kW/m}^2$ a teplota vzduchu v rozmezí $20\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$. Podmínky odpovídají horkému letnímu dni. Běžná oblast popisuje tepelné záření v rozmezí $2,1$ až 25 kW/m^2 představující teplotní rozsah vzduchu $60\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$. Za těchto podmínek ochranný oděv může poskytnout dostatek času na hašení požáru. Pohotovostní oblast představuje náročné a neobvyklé podmínky s intenzitou přesahující 25 kW/m^2 . Ochranné oděvy a vybavení slouží k detekci nebezpečného prostředí a k zajištění času potřebného k útěku bez vážného zranění. [2]



Obr. 3.10: Rozsah tepelných podmínek při výkonu hasičů (překresleno z [2])

- **Sledování tělesné teploty**

Základním ukazatelem zdraví člověka je tělesná teplota. Tělesná teplota je označení pro přirozenou teplotu daného organismu, za které dochází k jeho obvyklému fungování. [47]

Normální tělesná teplota dospělého se většinou pohybuje v rozmezí 36,4 až 37 °C, velmi často se ale liší člověk od člověka. Děti mají obvykle tělesnou teplotu vyšší, s postupným stárnutím se tělesná teplota snižuje.

Rozdělení tělesné teploty dospělých:

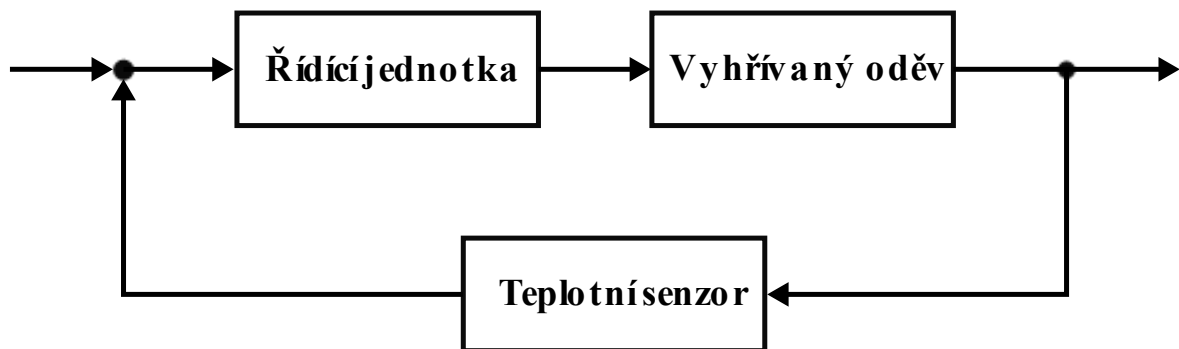
- Nad 37 °C je zvýšená tělesná teplota.
- Nad 38 °C je horečka.
- Nad 39,5 °C je vysoká horečka.
- Nad 41 °C je velmi vysoká horečka. [48]

Zvýšená tělesná teplota může být způsobena mnoha příčinami. Nejčastější příčinou je průběh běžného onemocnění. Dalšími příčinami mohou být systémové infekce (syfilis, HIV, salmonelóza, a další), lokalizované bakteriální infekce (infekční endokarditida, absces, a další), zánětlivá onemocnění (Kawasakiho nemoc, juvenilní revmatoidní artritida, a další), malignity a jiné.

Podchlazení je vážný stav, ke kterému dochází při velké ztrátě tělesného tepla. U dospělých je to tělesná teplota, která poklesne pod 35 °C. Děti a starší lidé jsou na podchlazení náchylnější. U dětí může dojít k podchlazení, když je jejich tělesná teplota nižší než 36,1 °C. Většina lidí si podchlazení spojuje s dlouhodobým pobytem venku v chladném počasí. Ale podchlazení může nastat i uvnitř. Podchlazení může být také problémem ve špatně vytápěném domě v zimě nebo v klimatizovaném pokoji v létě. [49]

- **Měření teploty k vyhřívacím textiliím**

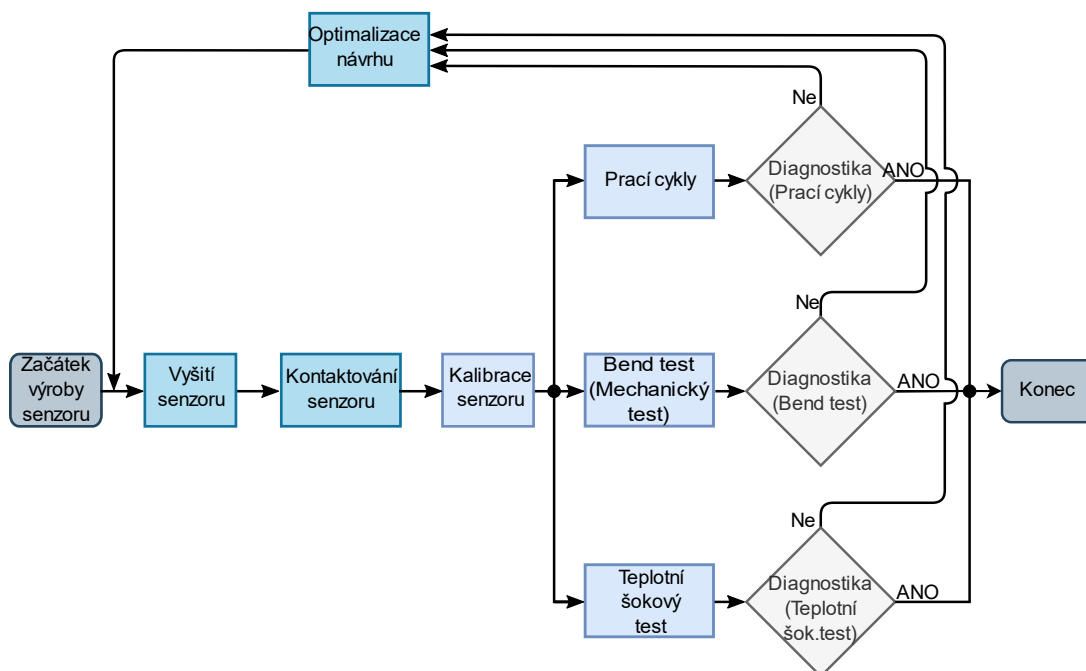
Další metodou využití textilních teplotních senzorů je ve vyhřívacích textiliích. Vyhřívání textilie zvyšují nositeli tepelný komfort, pokud je potřeba. Zpětná vazba je většinou zajištěna sledováním proudu, protékajícího topným tělesem. Textilní teplotní senzory by mohly sloužit jako velmi kvalitní zpětná vazba pro vyhřívání textilie a zvyšovat tak bezpečnost a pohodlí při jejich používání.



Obr. 3.11: Ukázka zpětné vazby k vyhřívacím textiliím

4 Praktická část

Praktická část této práce se zabývá návrhem a realizací textilního teplotního senzoru. V této kapitole je postupně popsán kompletní návrh a výroba textilních senzorů. Jsou zde uvedeny parametry, použité materiály, popsána technologie výroby, technologie kontaktování, způsoby měření vzorků a použité měřicí sestavy.



Obr. 4.1: Vývojový diagram výrobního a testovacího procesu textilního teplotního senzoru

Na obrázku 4.1 je zobrazen vývojový diagram výrobního a testovacího procesu textilních teplotních senzorů, který bude v dalším odstavci zkráceně popsán. Detailnější popis jednotlivých fází bude uveden v následujících podkapitolách.

Jako typ textilního teplotního senzoru byl zvolen termočlánek. Nejprve byly vybrány vhodné materiály pro daný typ senzoru. Následovalo vyšití senzorů a kontaktování jejich sváru. Poté se vzorky umístily do laboratorní pece, kde byla vytvořena kalibrační křivka senzoru. Aby vzorky nebyly ovlivněny nepříznivými vlivy jiného testu a daly se snadno identifikovat nedostatky daného vzorku, byly vzorky paralelně podrobeny třem testům. Po testu byla vždy provedena diagnostika vzorku podle daných tolerančních podmínek a vzorek byl prohlášen za vyhovující či nevyhovující. Pokud byl vzorek nevyhovující, byl buď z procesu odstraněn nebo při menších odchylkách byla provedena optimalizace návrhu, týkající se změny materiálu, topologie senzoru nebo kontaktování. Pokud vzorek prošel testem pokračoval na další zátěžový test. Pokud daný vzorek prošel všemi třemi testy, byly dané materiály a použitá technologie prohlášeny za vyhovující.

4.1 Požadované parametry teplotního senzoru

Cílem práce je vytvořit textilní teplotní senzor. Katedra materiálů a technologií už několik let pracuje na vývoji ochranných obleků proti tepelným rizikům. V návaznosti na tyto zkušenosti a aplikační oblast jsou zaměřeny parametry textilního teplotního senzoru. V ochranných oblecích není až tak důležitá přesnost měření, jako například u měření teploty v lékařském prostředí. Proto byla definována dostačující přesnost senzoru ± 1 °C. Důležitějším parametrem je rozsah měření, který musí odpovídat rozsahu teplot při zásahu hasičských jednotek. Spodní mez byla stanovena na 30 °C, teplota těla se standardně pohybuje okolo 37 °C, proto výrazně nižší teploty není potřeba měřit. Horní mez byla stanovena na 140 °C. Vyšší teploty už jsou pro zásah hasičů natolik kritické, že přesná teplota není tak důležitá. Nutná je odolnost vůči ohybovému napětí, které zatěžuje textiliu při pohybu nositele. Velmi důležitá je odolnost vůči praní, která byla stanovena na 30 cyklů.

Tab. 4.1: Parametry termočláňkových senzorů

Parametry termočláňků	
Přesnost	± 1 °C
Měřicí rozsah	40–140 °C
Lineární průběh [%]	80 %
Odolnost (prací cykly)	30 cyklů

4.2 První návrh textilních termočláňků TC1-TC3

4.2.1 Návrh vhodných materiálů termočláňku

Byly vytvořeny celkem tři kombinace textilních termočláňků (každá kombinace obsahuje tři vzorky). U všech tří kombinací je společná konstantanová nit, která má vždy stejné složení, popsané níže.

První kombinace TC1 se skládá z konstantanové a postříbřené měděné niti. Tato kombinace je velmi podobná komerčnímu termočláňku typu T. Konstantan je slitina mědi a niklu obvykle v poměru 56 % mědi a 44 % niklu, jeho rezistivita je v širokém rozsahu teplot téměř konstantní. Konstantanová nit (54 % PESH (polyesterové hedvábí)/46 % měď/nikl) je seskaná z polyesterových multifilamentních vláken o průměru 14 μm a ze čtyř konstantanových mikrodrátků o průměru 28 μm s jmenovitým měrným odporem 812 Ω/m .

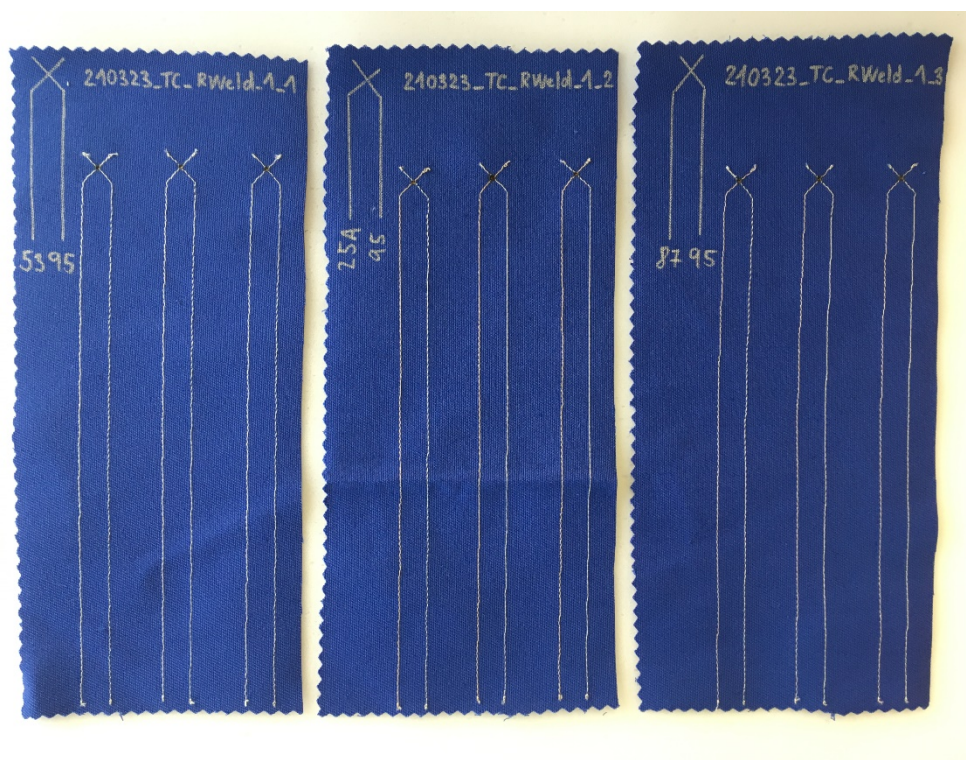
Měděná nit (29,7 % PES/70,3 % měď/stříbro) je seskaná z polyesterových multifilamentních vláken o průměru 14 μm a ze čtyř postříbřených měděných mikrodrátků o průměru 30 μm .

Druhá kombinace TC2 se skládá z konstantanové a mosazné niti. Mosazná nit (31 % PES/69 % mosaz) je seskaná z polyesterových multifilamentních vláken o průměru 14 μm a z osmi mosazných mikrodrátků o průměru 30 μm .

Třetí kombinace TC3 se skládá z konstantanové a bronzové niti (58 % PESH/42 % BRONZ) je seskaná z polyesterových multifilamentních vláken o průměru 14 μm a ze čtyř bronzových mikrodrátků o průměru 30 μm .

Jako substrát pro vyšívání termočlávkových senzorů byla použita 100 % bavlna s keprovou vazbou s hmotností 243 g/m^2 .

Termočlávkové senzory byly realizovány jednoduchým překřížením nití (obrázek 4.8) vyšitých na nosném textilním substrátu. Vytvořené křížení bylo následně svařeno termokompresně pomocí odporového svářecího stroje.



Obr. 4.2: Vyšité textilní termočlávkové senzory s termokompresním svářením

Senzory byly vyšity na poloprofesionálním šicím a vyšívacím stroji Bernina B 750, který mimo běžné funkce šicích strojů zvládá například vyšívání motivů předem určených grafickou předlohou ve vektorovém formátu. Motiv byl nakreslen pomocí vektorového grafického editoru Inkscape/Inkstitch.

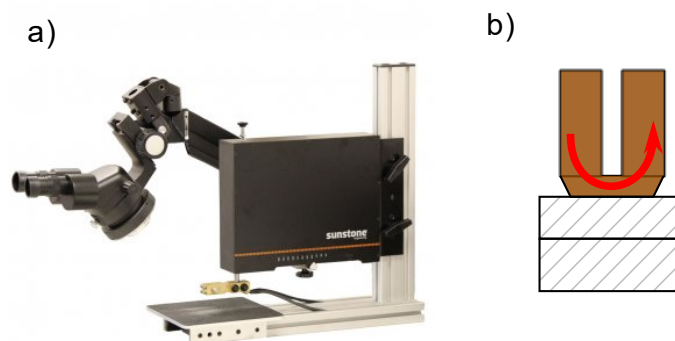
4.2.2 Návrh kontaktování senzorových prvků

Pro svaření termočlánků byl využit jednobodový termokompresní svár. Termokompresní svařování spočívá v zahřívání a působení mechanického tlaku na dvě spojovací tělesa. Tento druh svaření byl vytvořen pomocí odporového svařecího stroje s využitím paralelní hlavy.

- **Odporový svařecí stroj**

Principem odporového svařecího stroje je procházející elektrický proud svařovaným místem, materiál svařovaných součástí se ohřeje odporovým teplem, stane se tvárným, nebo se roztaví, potom se materiály stlačí a jsou následně spojeny. Zdrojem tepla je elektrický odpor v místě styku svařovaných materiálů (přechodový odpor). [50]

V našem případě polyesterová vlákna vlivem tepla sublimují v místě sváru a zbyde zde pouze metalurgický svár. Na okrajích sváru se polyesterová vlákna nataví.



Obr. 4.3: a) Odporový svařecí stroj Sunstone LinearDC 500 (převzato z [51]) b) Schéma toku proudu paralelní hlavou

Termokompresní svaření bylo provedeno odporovou svařečkou Sunstone LinearDC 500. Změnou velikosti svařovací elektrody a základních parametrů (napětí, čas svaření, přítláčné zatížení) lze docílit různých vlastností sváru. Tyto parametry byly postupně testovány na zjednodušených modelech. Postupnými kroky se dospělo k následujícím parametrům, které byly implementovány na vyšité textilní termočlánky:

Tab. 4.2: Nastavené parametry odporového svařecího stroje při termokompresním svařování

Název	Velikost elektrody	Doba svaření	Zatížení	Napětí
Odp. svař. 1	0,6x0,9 mm	300 ms	1 kg	0,95 V

Zjednodušený popis termočláňkových senzorů:

Tab. 4.3: Označení termočláňkových senzorů

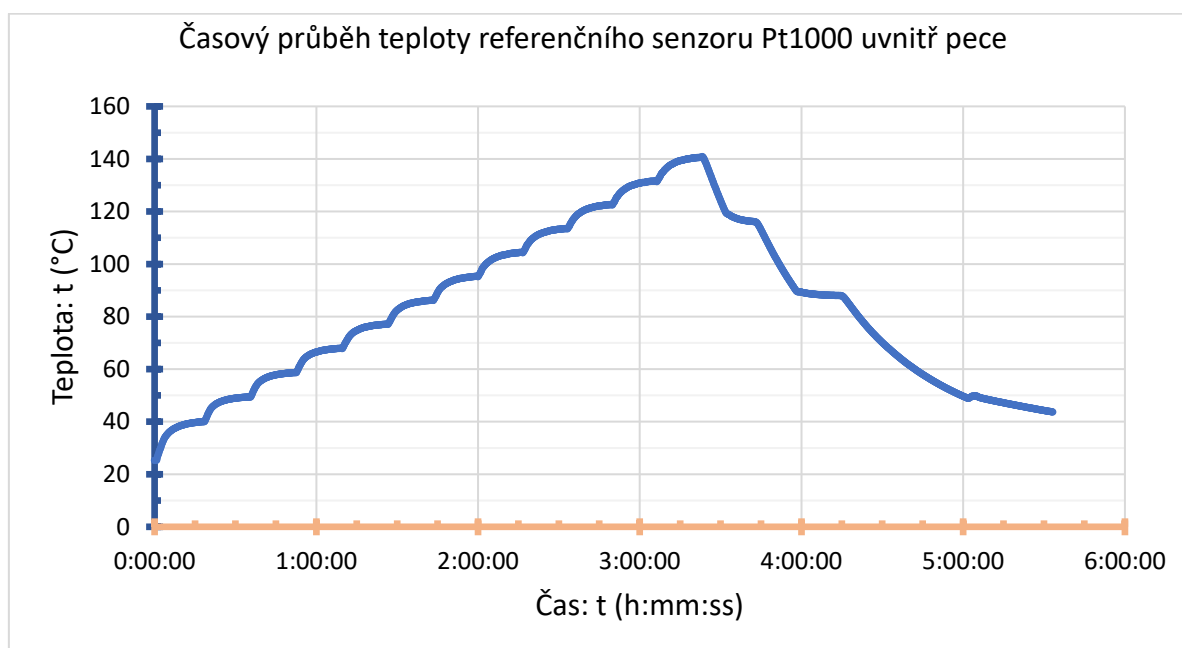
Označení	Kombinace materiálů	Počet mikrodrátků	Počet překřížení nití	Typ svaření
TC1	Konstantan + postříbřená měď	4+4	1	Odp. svař. 1
TC2	Konstantan + mosaz	4+8	1	Odp. svař. 1
TC3	Konstantan + bronz	4+4	1	Odp. svař. 1

4.2.3 Měření testovacích vzorků

Testování probíhalo podle postupu na obrázku 4.1. Jako první vždy byla provedena kalibrace každého senzoru, dále byly senzory zkoumány v zátěžových testech: teplotní šoková komora, test cyklického ohybu, prací testy. Po každém testu následovala znovu kalibrace a vyhodnocení, jak moc byl senzor ovlivněn daným testem či nikoliv. Pokud senzor vykazoval podobné vlastnosti jako před testem, pokračovalo se dalším zátěžovým testem. Pokud byl senzor nějak poškozen, byl z dalšího testování vyřazen.

- **Kalibrace**

Kalibrace probíhala v laboratorní peci SalvisLab při změnách teploty (od 40 °C do 140 °C a zpátky do 60 °C).



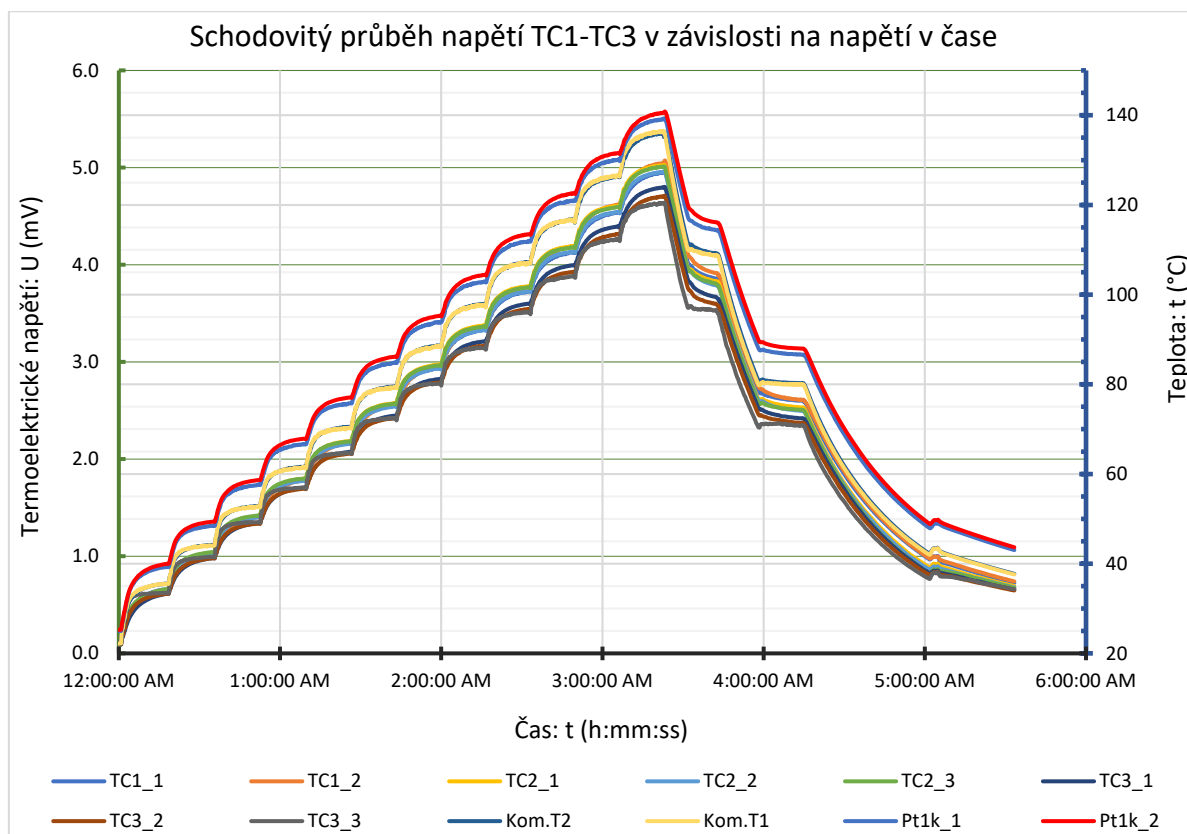
Graf 1: Časový průběh teploty referenčního senzoru Pt1000 uvnitř pece

Nárůst a pokles teploty byl nastaven na co nejrychlejší průběh. Aby kalibrace nebyla ovlivněna teplotní setrvačností ostatních materiálů, setrvala pec vždy na zadané teplotě 15 minut. Jelikož chlazení pece využívá nasávání okolního vzduchu, trvá delší dobu. K vytvoření kalibrační křivky byly použity tři referenční senzory Pt1000 třídy A (dva měřící teplotu uvnitř pece, jeden měřící teplotu referenčního bodu). Dále uvnitř pece byly umístěny dva komerční termočlánky typ T XF-1231-FAR k porovnání výsledků. Vzorky byly měřeny každých 10 sekund multimetrem Keithley K2700 s multiplexní kartou Keithley 7702.

Nejprve se pomocí známých konstant Pt1000 dopočítala teplota uvnitř pece a teplota referenčního bodu podle vzorce zadaného výrobcem:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2), \quad (1.15.)$$

kde R_T (Ω) je odpor při měřené teplotě, R_0 (Ω) odpor při teplotě 0°C , T ($^\circ\text{C}$) měřená teplota, A, B jsou konstanty: $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$.



Graf 2: Schodovitý průběh napětí TC1-TC3 v závislosti na napětí v čase

Graf 2 zobrazuje schodovitý průběh napětí textilních a komerčních termočlánků v závislosti na teplotě v čase (levá osa odpovídá termoelektrickému napětí, pravá osa odpovídá teplotě referenčních platinových senzorů Pt1k_1 a Ptk_2).

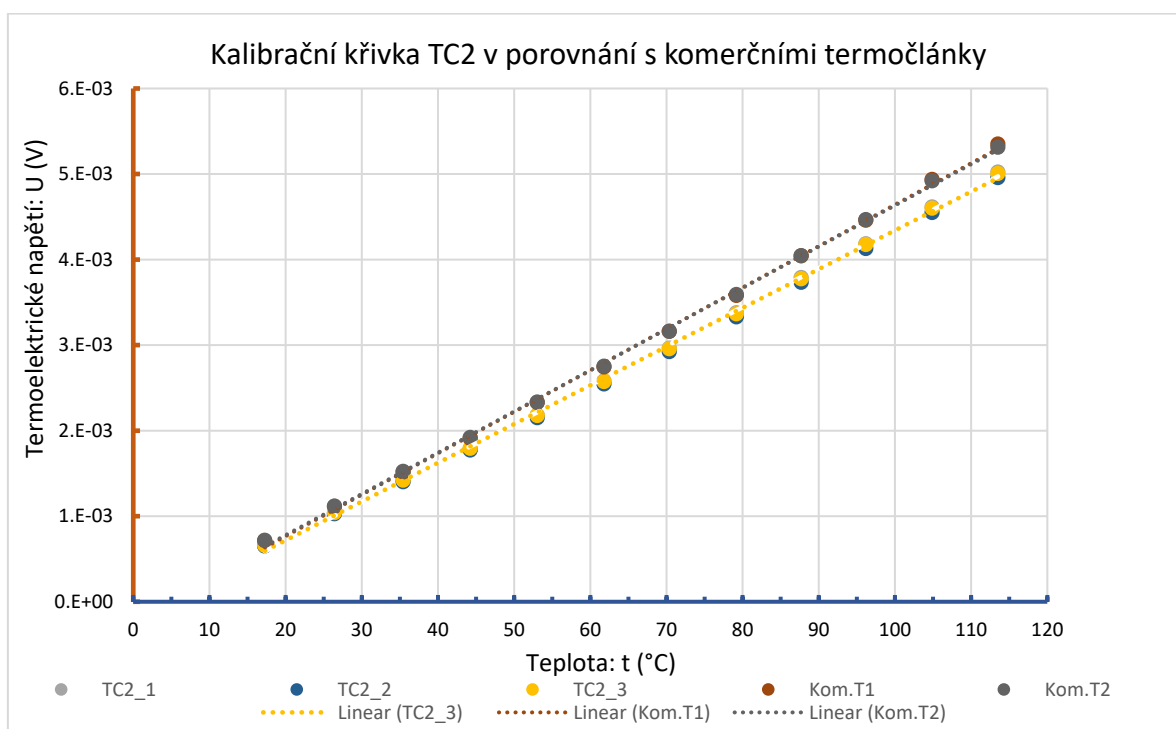
Rozložení teploty uvnitř pece není rovnoměrné, proto je prostor v peci rozdělen na tři oblasti, k zajištění co největší objektivity při porovnání vzorků. Referenční senzory pokrývají krajní oblasti a střední oblast vychází z průměru těchto dvou referenčních senzorů.

Ze schodovitého průběhu se poté vybralo přibližně dvanáct bodů (ustálené teploty před vzrůstajícím cyklem), které byly použity k vytvoření kalibrační křivky. K určení koeficientů lineární funkce se využije lineární regrese. Její podstatou je nalezení takové přímky, aby součet druhých mocnin odchylek byl co nejmenší. Výpočet konstant proložené lineární přímky $y = ax + b$, kde konstanta a je směrnice a b je absolutní člen: [52]

$$a = \frac{n \cdot (\sum_{i=1}^n t_i \cdot U_i) - (\sum_{i=1}^n t_i) \cdot (\sum_{i=1}^n U_i)}{n \cdot (\sum_{i=1}^n t_i^2) - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (1.16.)$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^n t_i^2) \cdot (\sum_{i=1}^n U_i) - (\sum_{i=1}^n t_i) \cdot (\sum_{i=1}^n t_i \cdot U_i)}{n \cdot (\sum_{i=1}^n t_i^2) - (\sum_{i=1}^n t_i)^2}, \quad (1.17.)$$

kde n je počet vybraných bodů teploty, t_i je i -tý prvek souboru rozdílů teplot referenčního a měřeného konce $t_i = t_{m_i} - t_{r_i}$ a U_i je i -tý prvek termoelektrického napětí v závislosti na rozdílů teplot $t_{m_i} - t_{r_i}$.



Graf 3: Kalibrační křivka TC2 v porovnání s komerčními termočlánsky

Ostatní kalibrační křivky jsou zobrazeny v příloze práce.

Pomocí výše získané kalibrační křivky se určily porovnávací parametry. Jedním byla směrodatná odchylka teploty od referenčního senzoru Pt1000 σ_t , druhým byla směrodatná odchylka termoelektrického napětí σ_U mezi sadou stejných materiálů.

Výpočet výběrové směrodatné odchylky teploty:

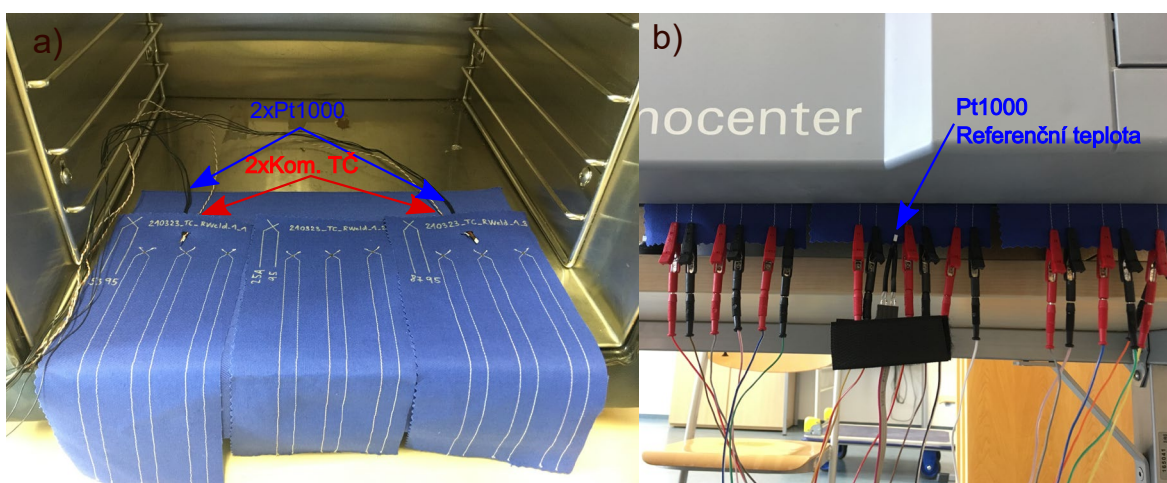
$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_{d_i} - t_{r_i})^2}, \quad (1.18.)$$

kde t_{d_i} je dopočítaná teplota pomocí kalibrační křivky a t_{r_i} je teplota referenčního senzoru Pt1000.

Výpočet výběrové směrodatné odchylky napětí:

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_{d_i} - \bar{U}_i)^2}, \quad (1.19.)$$

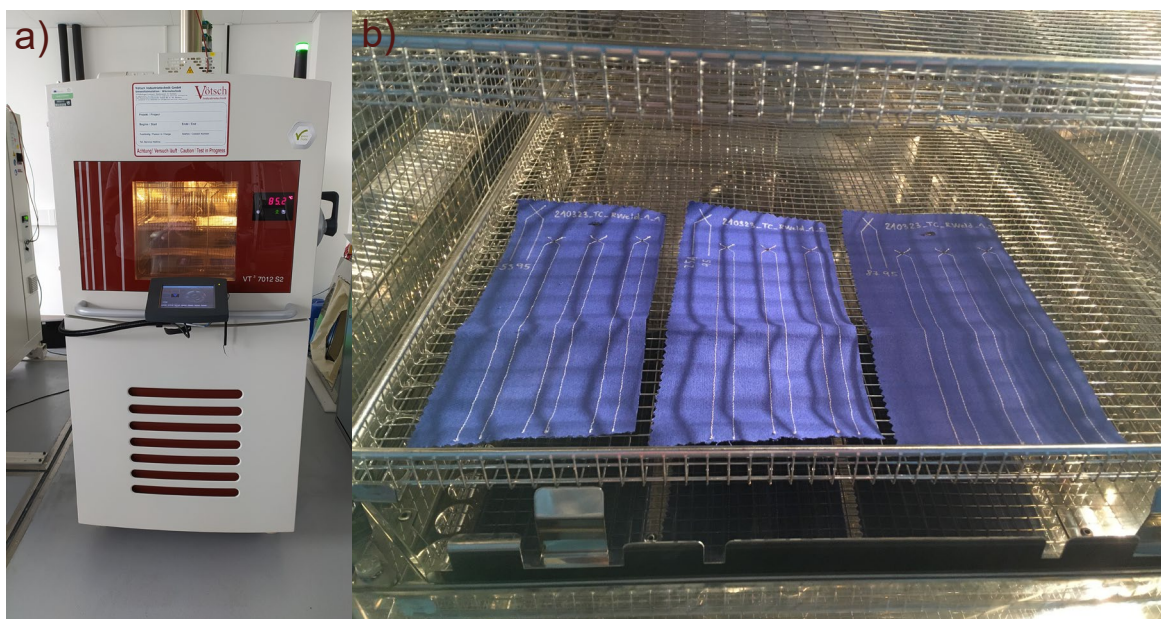
kde U_{d_i} je dopočítané napětí pomocí kalibrační křivky a \bar{U}_i je průměrná naměřená hodnota souboru termočlánků stejných materiálů.



Obr. 4.4: a) Umístění textilních termočlánků a referenčních senzorů v peci b) Kontaktování termočlánků při kalibračním měření a umístění senzoru snímajícího referenční teplotu

- **Teplotní šokový test**

Teplotní šokový test má za úkol podrobit senzor tzv. „zrychlenému stárnutí“. Senzor byl opakovaně podroben dynamickým změnám teplot podle normy ČSN EN 60068-2-14. [53] Měření proběhlo v teplotní šokové komoře Vötsch VT7012 S2. Šoková komora byla nastavena na změnu mezi dvěma teplotami $t_1 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ a $t_2 = -25 \text{ }^\circ\text{C}$. Jeden cyklus měření se skládal ze dvou desetiminutových intervalů (deset minut při t_1 a deset minut při t_2). Přejezd vzorků z jedné komory do druhé byl v jednotkách sekund. Před přejezdem byla vždy v opačné komoře nastavena teplota vyšší nebo nižší o $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ($100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-40 \text{ }^\circ\text{C}$), kvůli tepelné setrvačnosti prvků uvnitř výtahu. Ihned po přejetí výtahu došlo k přepnutí na nastavené teploty ($85 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-25 \text{ }^\circ\text{C}$). Celkem bylo provedeno 100 cyklů.

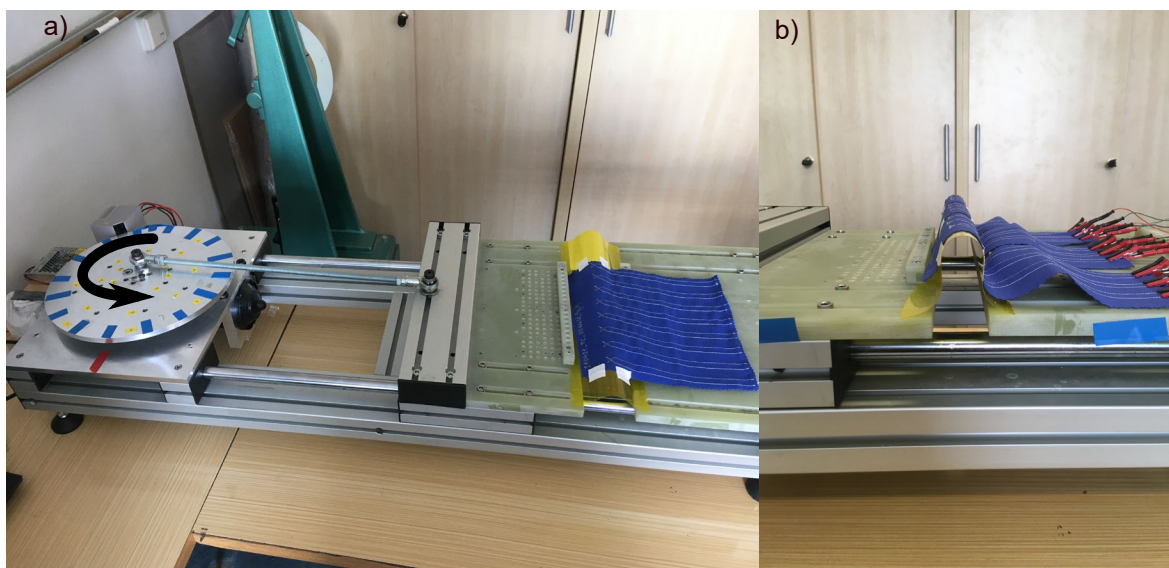


Obr. 4.5: a) Teplotní šoková komora firmy Vötsch b) Uložení vzorků v klecovém výtahu uvnitř komory

- **Test cyklického ohybu**

Test ohybu (tzv. bend test) simuluje ohyb textilie jako při jejím každodenním užívání. Účelem bylo zjištění, zda se při cyklickém ohybovém namáhání poškodí svár termočlátku. K vytvoření potřebného ohybu byla použita plastová fólie, která se při smrštění ohýbala. Jeden konec fólie byl upevněn k nepohyblivé části testovacího přístroje, druhý konec byl připevněn k pohyblivé části. Vzorky byly k fólii připevněny lepicí páskou. Svár termočlátku byl umístěn na vrchol poloměru, který měl velikost 1 cm. Tento ohyb simuloval možné ohnutí textilie při pohybu uživatele.

Jeden ohýbací cyklus trval 1,3 sekundy. Po každé testovací sérii proběhlo kontrolní měření odporu, zda nedošlo k poškození sváru. Celkem byly provedeny čtyři testovací série a to po 100, 200, 500 a 1000 cyklech.



Obr. 4.6: a) Princip ohybového testu b) Maximální zkoumaný ohyb vzorku

- **Prací testy**

Textilie jsou téměř nepoužitelné, pokud nezvládnou prací cykly. Tento zátěžový test je pro E-textilie velmi náročný, protože je kombinací více vlivů zároveň, které se navíc cyklicky opakují. Jde o kombinaci mechanického namáhání, chemických procesů, teplotního namáhání, působení vody a další.

Zkoušení textilií pracími a sušicími cykly určuje mezinárodní norma ISO 6330:2012. Tato mezinárodní norma se využívá k vyhodnocení kvality a vlastností textilií. Výběr praček, sušiček a k nim přidružených typů doplňkových textilií, detergentů a variant sušení se provádí v souladu s ustanoveními, kde se textilie bude používat. [54]

K praní a sušení testovacích vzorků byly použity tyto přístroje:

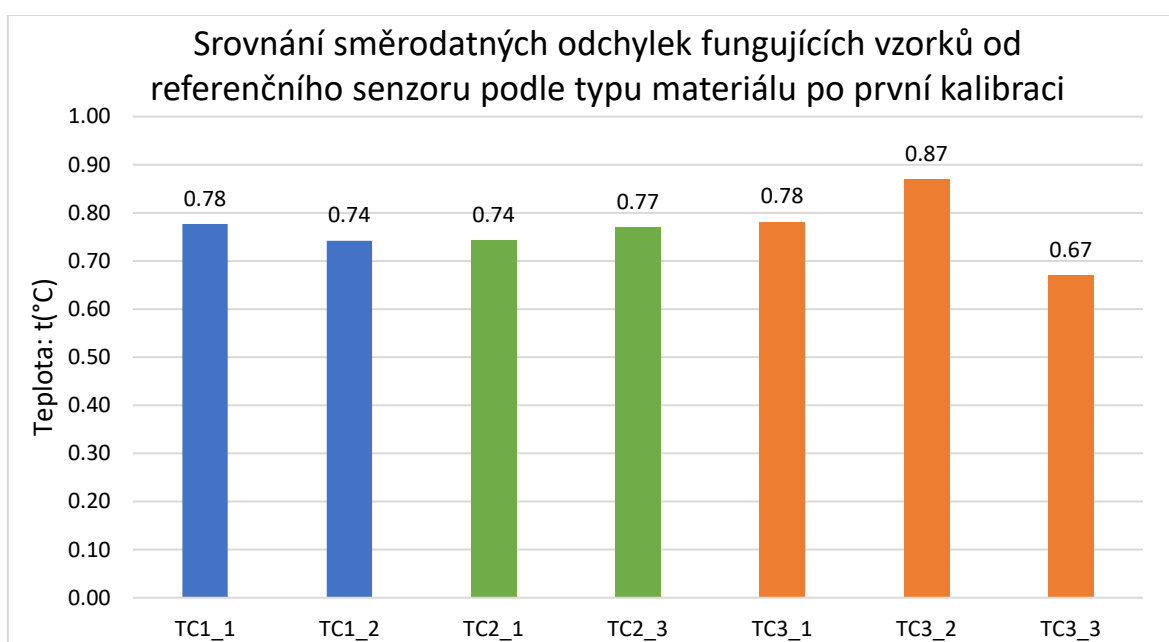
- Pračka WHIRLPOOL AWG 812 PRO
- Sušička WHIRLPOOL AWZ8CD PRO

V souladu s normou ISO 6330:2012 se využíval prací cyklus: program na jemné prádlo, teplota praní 40 °C, doba praní 1 hodina, rychlost odstředování 400 ot/min. Jako prací prášek byl použit Bonux 3v1 o hmotnosti 15 g.

Sušení v bubnové sušičce využívalo program na jemné prádlo, při teplotě sušení přibližně 60 °C (ověřeno infrakamerou), doba sušení byla 1 hodinu. Spolu s testovanými textilními termočlánky bubny obsahovaly doplňující textilie, aby byla zajištěna 2 kg náplň pračky.

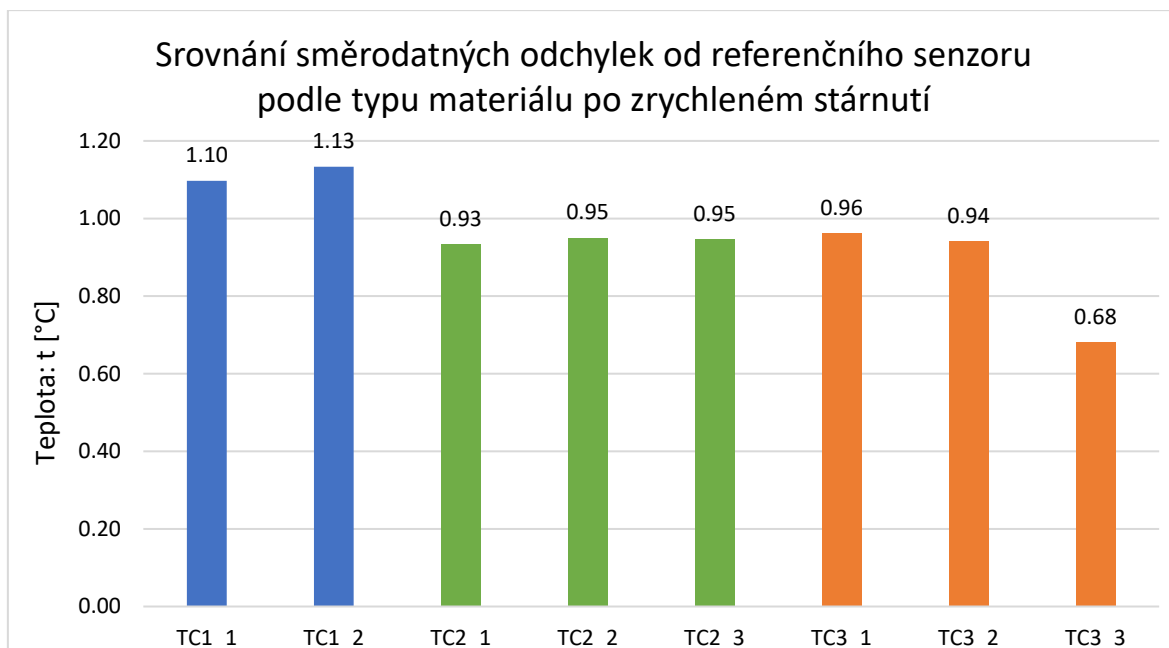
4.2.4 Zhodnocení prvního návrhu

Termočlánky byly vyrobeny podle popsaného návrhu vždy po třech kusech od každého materiálu a vytvořily tak sadu testovacích vzorků. Tato sada vzorků pak postupně prošla všemi třemi zátěžovými testy. Pro kalibrační výpočty byly vždy u každé sady vzorků ze stejného materiálu použity dva referenční senzory Pt1000, které odpovídaly umístění sady v kalibrační peci. Pro sadu vzorků TC1 se použil senzor umístění vlevo v peci. Pro sadu vzorků TC3 se použil senzor umístění vpravo v peci. Pro sadu vzorků TC2 se použily hodnoty odpovídající průměru senzorů umístěných vpravo a vlevo. Po první kalibraci byly z neznámých důvodů nefunkční dva vzorky: TC1_3 a TC2_2. Napříč sadami vzorků se odchylka teploty od referenčních senzorů pohybovala v rozmezí (0,67-0,87) °C.



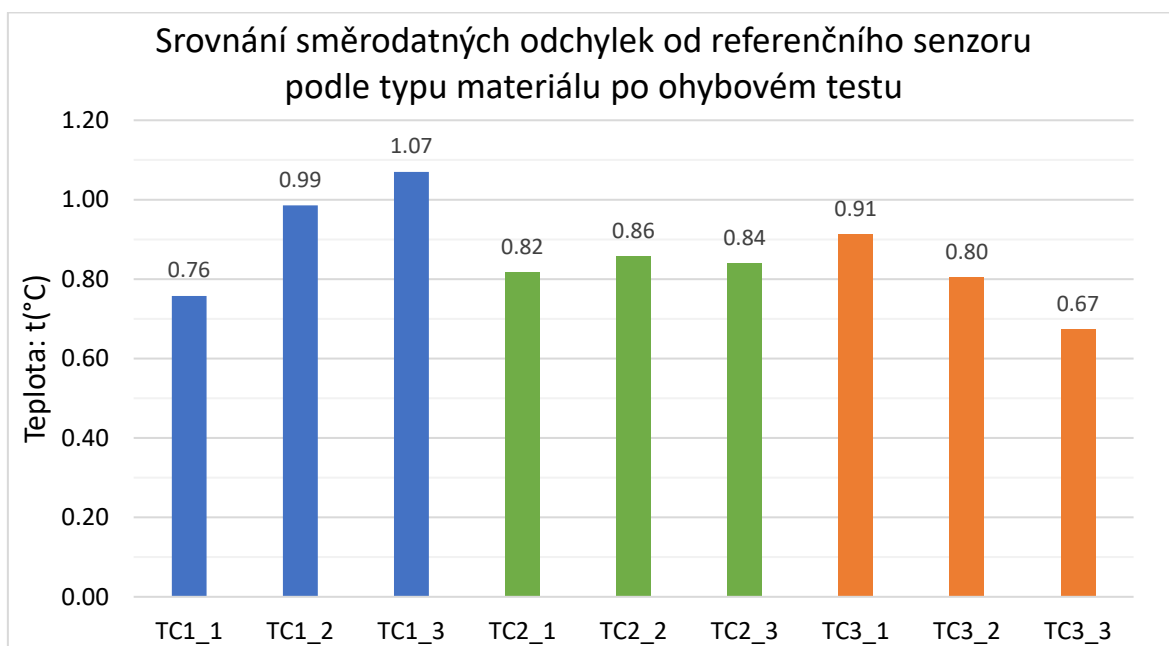
Graf 4: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu materiálu po první kalibraci

Prvním zátěžovým testem bylo zrychlené stárnutí. Po kalibraci vzorků termočlánek TC2_2 začal fungovat. Vzorek TC3_3 vykazoval po testu téměř stejné chování jako před zrychleným stárnutím, zbylé vzorky se zhoršily přibližně o 0,2 °C, což se předpokládalo.



Graf 5: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu materiálu po zrychleném stárnutí

Po cyklickém ohybu se odchylka teploty termočlánků zlepšila přibližně o 13 %. Bylo to způsobené nejspíše zkvalitněním sváru termočlánků. Oproti hodnotám po první kalibraci, se odchylky zhoršily přibližně o 7 %, hodnoty se pohybovaly v rozmezí (0,67-1,03) °C. Nejlepší výsledky z prvního návrhu měla druhá sada vzorků (kombinace konstantanu a mosazi). Kalibrační křivky druhé sady se téměř dokonale překrývaly. Průměrný teplotní koeficient první sady byl 44,1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, druhé sady byl 43,4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ a třetí sady byl 40,7 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

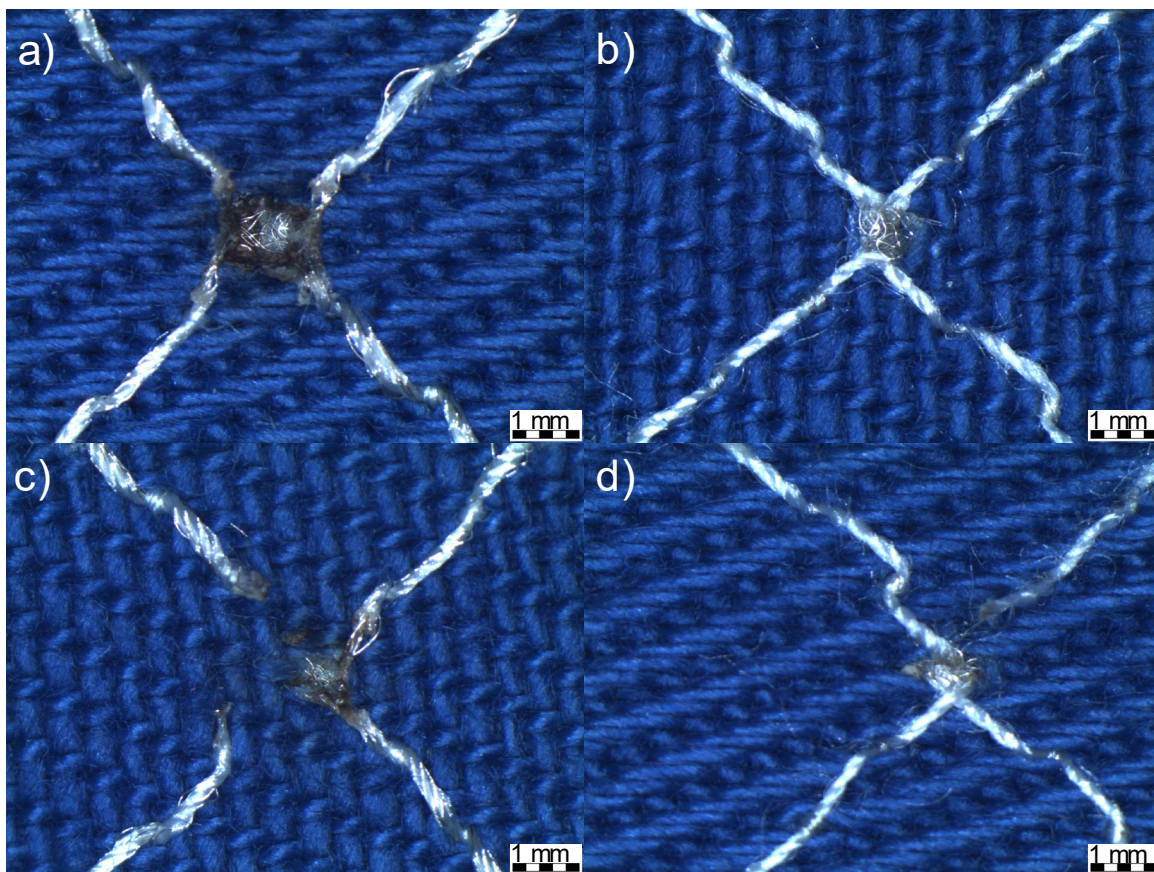


Graf 6: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu materiálu po testu ohybu

Po prvním pracím cyklu byly funkční pouze vzorky: TC2_1, TC2_3 a TC3_1, zbytek termočlánků měl poškozený svár a nitě již nebyly elektricky spojeny (obrázek 4.7). Parametry funkčních vzorků byly srovnatelné s parametry před pracími cykly.

Po druhém pracím cyklu nebyly funkční už žádné vzorky. Funkční vzorky po prvním pracím cyklu: TC2_1, TC2_3 a TC3_1 fungovaly správně do teploty přibližně 120 °C, nad tuto teplotu již nefungovaly správně, a tak byly z dalšího měření vyřazeny. Rozpojení elektrického spojení mohlo být způsobeno nekvalitním svárem podpořeným délkovou teplotní roztažností jednotlivých mikrodrátků.

Pro další postup práce byly všechny nedostatky kriticky zhodnoceny. Jako hlavní problém byl označen nekvalitní svár, který ve většině nevydržel ani jeden prací cyklus. Další návrh obsahuje změnu způsobu svaření, změnu vyšívané nitě a změnu počtu křížení nití.



Obr. 4.7: Sváry zobrazené pod mikroskopem a) Po výrobě – horní vrstva sváru b) Po výrobě – spodní vrstva c) Po pracím cyklu – horní vrstva d) Po pracím cyklu – spodní vrstva

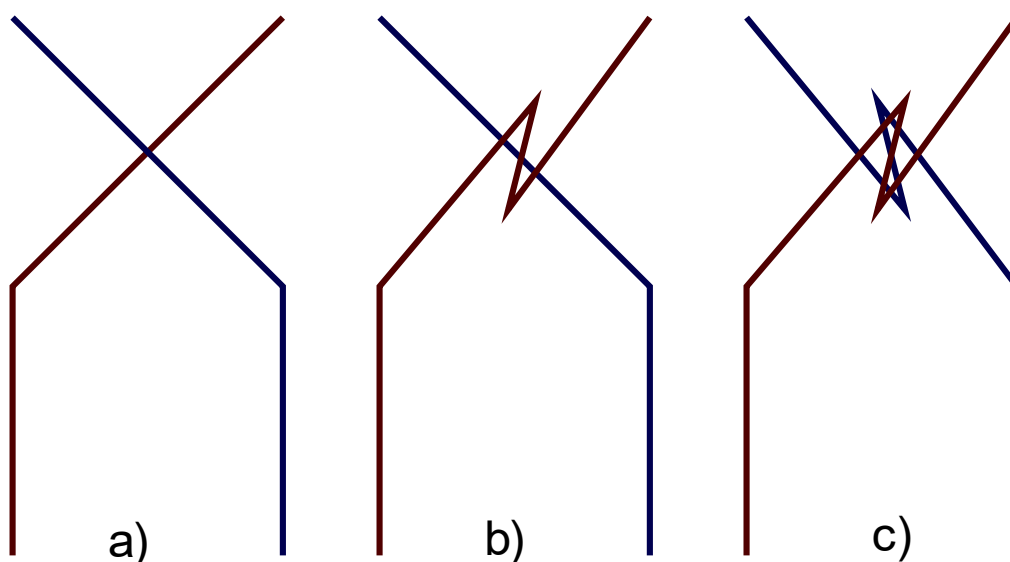
4.3 Druhý návrh textilních termočlánků TC4-TC7

Podle výsledků prvního návrhu došlo k úpravě výrobních parametrů druhé sady termočlánků. Ke zvýšení šance na kvalitní elektrické spojení obsahuje nový návrh nit s vyšším počtem vodivých mikrodrátků a křížení nití probíhá na více místech.

4.3.1 Návrh materiálů termočlánků

Nová kombinace se opět skládá z konstantanové a postříbřené měděné niti, která má větší počet mikrodrátků. Postříbřená měděná nit (23,5% PES/76,5% měď/stříbro) je seskaná z polyesterových multifilamentních vláken o průměru 14 μm a z osmi postříbřených měděných mikrodrátků o průměru 30 μm . Konstantanová nit (54 % PESh/46 % měď/nikl) je seskaná z polyesterových multifilamentních vláken o průměru 14 μm a ze čtyř konstantanových mikrodrátků o průměru 28 μm s jmenovitým měrným odporem 812 Ω/m . Jako substrát byla opět použita 100% bavlna s keprovou vazbou s hmotností 243 g/m^2 .

Termočlánky jsou realizovány dvěma druhy křížení nití (tříbodové a devítibodové křížení zobrazené na obrázku 4.8) vyšitých na nosném textilním substrátu a následném svaření. Při použití tříbodového křížení byla v přímém směru postříbřená měděná nit třikrát překřížena konstantanovou nití.



Obr. 4.8: Porovnání tří druhů křížení: a) jednobodové křížení použité v 1. návrhu b) tříbodové křížení c) devítibodové křížení

Senzory byly znovu vyšity na poloprofesionálním šicím a vyšívacím stroji Bernina B 750.

4.3.2 Kontaktování a měření testovacích vzorků

Oproti prvnímu návrhu byly sváry vytvořeny dvěma způsoby, buďto pomocí odporového svářecího stroje nebo ultrazvukového svářecího stroje.

- **Pomocí odporového svářecího stroje**

Odporové svaření bylo opět provedeno na odporovém svářecím stroji Sunstone LinearDC 500. Jelikož se zvětšila velikost sváru (tříbodové přehití, devítibodové

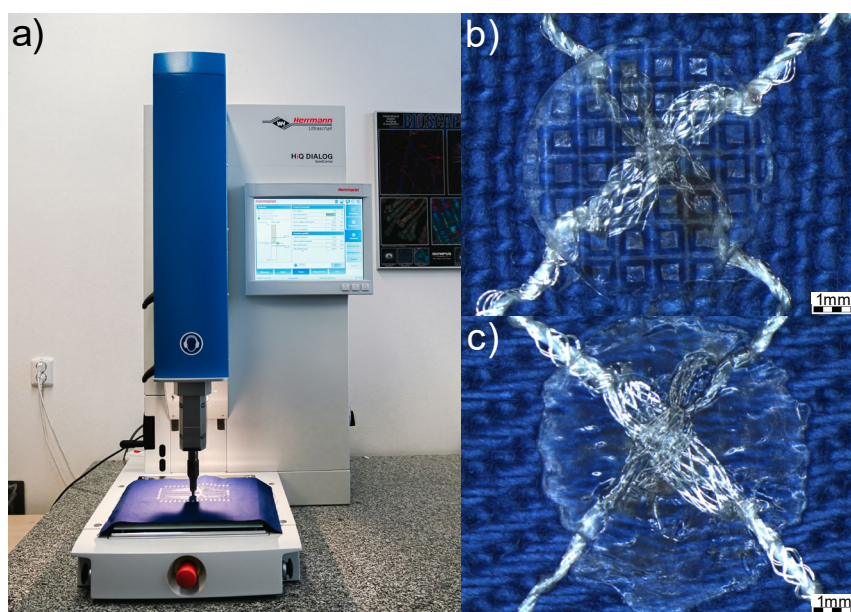
přešití), plocha sváru obsahuje více materiálu, zvětšila se i svařovací elektroda. Změnou velikosti svařovací elektrody (2x2 mm) se změnily i základní parametry. Parametry byly opět postupně upravovány. Postupnými kroky se dospělo k následujícím parametrům, které byly implementovány na vyšité textilní termočlánky:

Tab. 4.4: Porovnání parametrů prvnímu a druhého návrhu

Název	Velikost elektrody	Doba svaření	Zatížení	Napětí
Odp. svař. 1	0,6x0,9 mm	300 ms	1 kg	0,95 V
Odp. svař. 2	2x2 mm	300 ms	1 kg	1,6 V

- **Pomocí ultrazvukové svářecího stroje**

Ultrazvukové termoplastické svařování využívá mechanického rozkmitání o vysoké frekvenci při současném působení tlakové síly, která zaručuje přenos kmitů ze sonotrod do spojovaných materiálů. Vodivá nit obsahuje kovové mikrodrátky a plastická vlákna. V místě sváru dojde k natavení plastických vláken cílenou přeměnou ultrazvukové energie na teplo, tím se kovové mikrodrátky k sobě přitlačí a po ochlazení je ztuhlý plast drží u sebe.



Obr. 4.9: a) Ultrazvukový svářecí stroj Herrmann (převzato z [55]), Ukázka devitibodové sváru spolu s TPU fólií b) z horní strany c) ze spodní strany

Jelikož je v místě sváru málo plastických vláken k vytvoření kvalitního sváru, byla z horní a spodní strany umístěna TPU (Termoplastický polyuretan) fólie, která přidává další plastický materiál k zapouzdření kvalitního kontaktu mezi drátky. Další funkcí TPU je

ochrana proti vnějšímu poškození. TPU je flexibilní a elastický termoplast, který byl vytvořen na 3D tiskárně.

Ultrazvukové svaření bylo provedeno ultrazvukovým svářecím strojem firmy Herrmann. Změnou velikosti svařovací sonotrody a základních parametrů (energie vlny, vlnová délka, přítlačná síla) lze docílit různých vlastností sváru. Tyto parametry byly postupně testovány na zjednodušených modelech. Spolu se změnou parametrů se laborovalo i s umístěním TPU fólie, buď to z jedné strany, z obou či žádné. Postupnými kroky se dospělo k následujícím parametrům, které byly implementovány:

Tab. 4.5: Nastavené parametry na ultrazvukovém svářecím stroji

Název	Energie vlny	Přítlačná síla	Vlnová délka
Ultrazvuk. svař.	15 J	100 N	15 μm

TPU fólie byla umístěna z obou dvou stran.

Tab. 4.6: Označení druhého návrhu termočlánkových senzorů

Označení	Kombinace materiálů	Počet mikrodrátků	Počet překřížení nití	Typ svaření
TC4: UZS 3b	Konstantan + postříbřená měď	4+8	3	Ultr. svař.
TC5: UZS 9b	Konstantan + postříbřená měď	4+8	9	Ultr. svař.
TC6: OdS 3b	Konstantan + postříbřená měď	4+8	3	Odp. svař. 2
TC7: OdS 9b	Konstantan + postříbřená měď	4+8	9	Odp. svař. 2

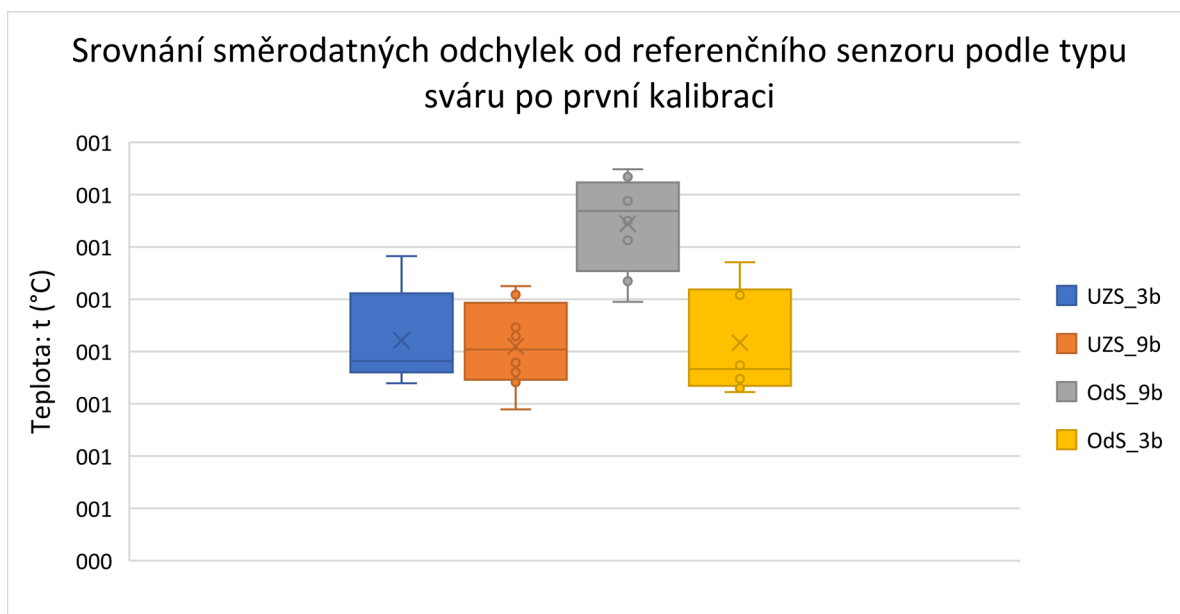
- **Měření testovacích vzorků**

Měření probíhalo ve stejném postupu jako v prvním návrhu.

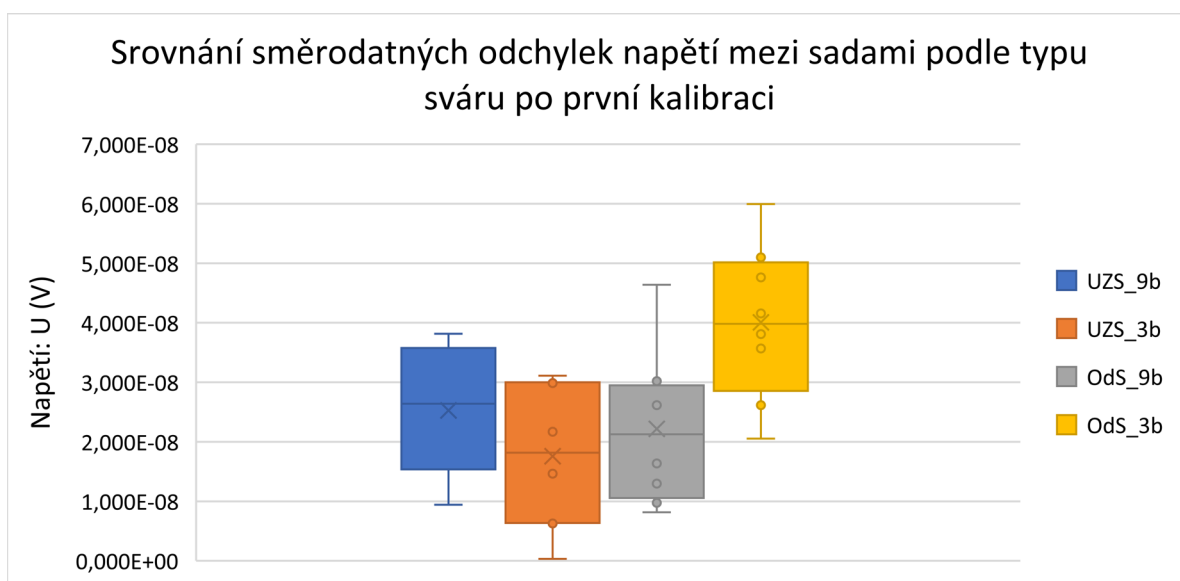
4.3.3 Zhodnocení druhého návrhu

Všechny druhy svaření byly vyrobeny podle popsaného návrhu vždy po osmi kusech na jedné tkanině. Celkem byly vyhotoveny čtyři sady a postupně prošly všemi třemi zátěžovými testy. Pro kalibrační výpočty byly vždy u každé sady vzorků použity dva referenční senzory Pt1000, které odpovídaly umístění jednotlivých vzorků v kalibrační peci. Pro první tři vzorky v sadě (zleva) se použil senzor umístění vlevo v peci. Pro poslední tři vzorky v sadě se použil senzor umístění vpravo v peci. Pro prostřední dva vzorky v sadě se použila hodnota

odpovídající průměru senzorů umístěných vpravo a vlevo. Po první kalibraci byly funkční všechny vzorky ve všech sadách. Pro porovnání dat bylo využito krabicového grafu níže, kde křížek zobrazuje průměrnou hodnotu, vodorovná čára uvnitř „krabice“ zobrazuje mediánovou hodnotu, vodorovné hrany zobrazují 25 % a 75 % kvartily hodnot a okrajové čárky zobrazují minimum a maximum souboru hodnot. Ve srovnání směrodatných odchylek teploty vyšel nejhůře OdS_9b, jehož průměrná odchylka byla 1,07 °C. Průměrné odchylky ostatních sad se pohybovaly okolo 0,8 °C (Graf 7). Pokud porovnáme směrodatné odchylky napětí (Graf 8), nejmenší průměrnou odchylku vykazovala sada UZS_3b. Celkově nižší hodnoty měly sváry vytvořené pomocí ultrazvukového svářecího stroje.

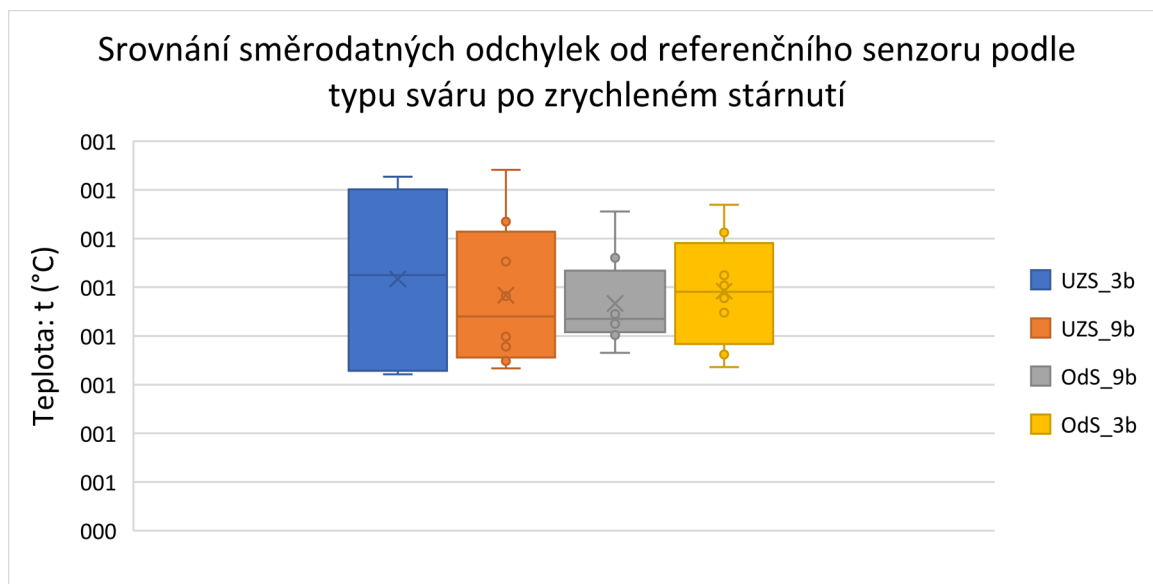


Graf 7: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu sváru po první kalibraci



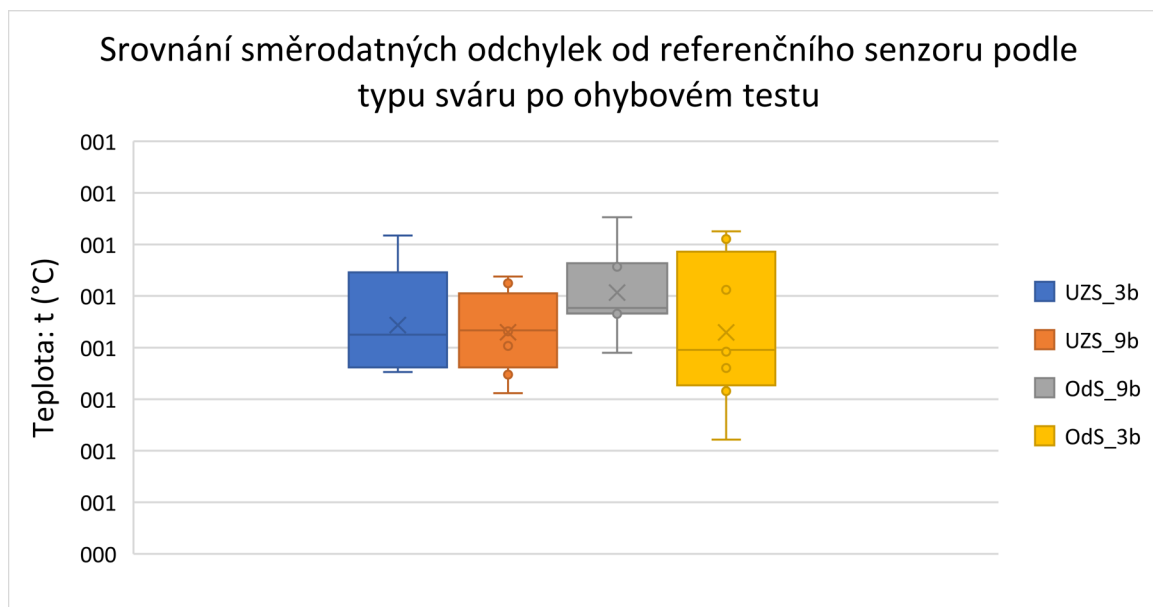
Graf 8: Srovnání směrodatných odchylek napětí mezi sadami podle typu sváru po první kalibraci

Po zrychleném stárnutí se od sebe vzorky v sadě více lišily, tomu odpovídají vzdálenější kvartily jednotlivých sad. V sadě UZS_3p se poškodily tři vzorky. Odchylka teploty se překvapivě zlepšila u OdS_9p, u ostatních sad se odchylka teploty zhoršila (Graf 9).



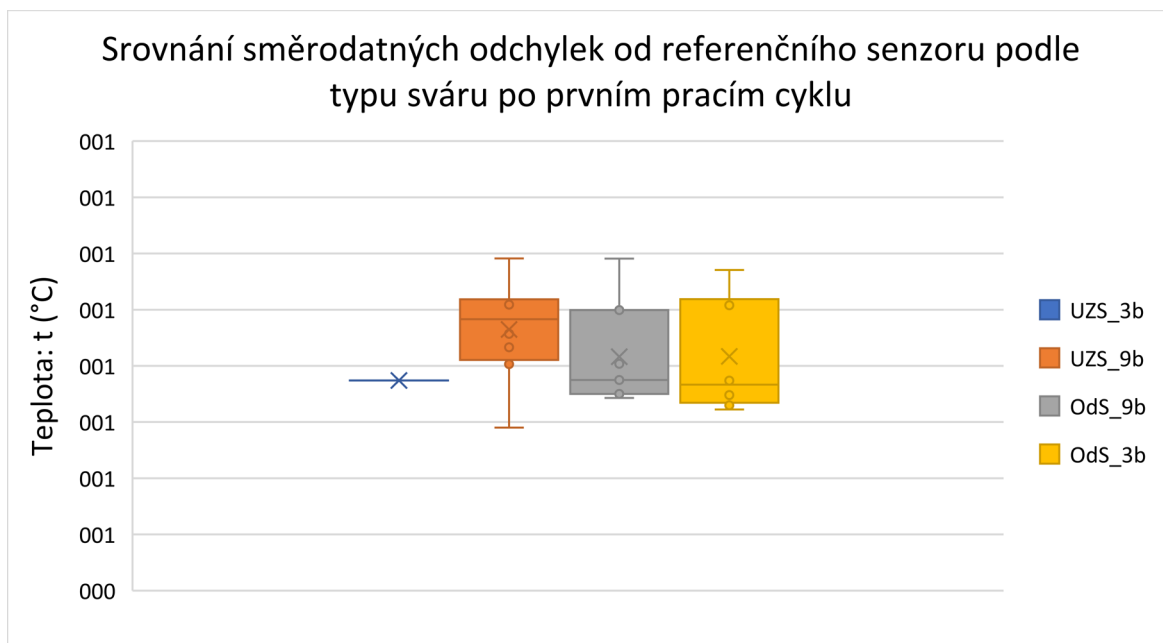
Graf 9: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu sváru po zrychleném stárnutí

Po testu ohybem v sadě UZS_3p byly stále nefunkční tři vzorky. Odchylka teploty byla podobná jako před testem. Vzorky v sadách se lišily méně, než tomu bylo po zrychleném stárnutí.



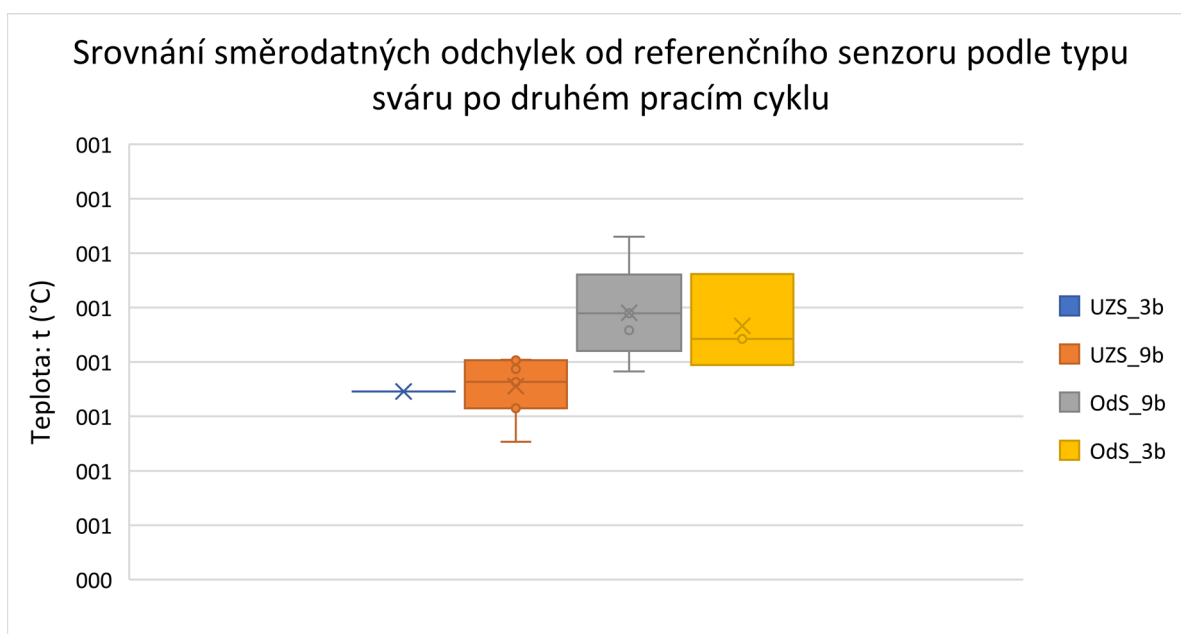
Graf 10: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu sváru po testu ohybu

Po prvním pracím cyklu byly funkční všechny vzorky sady UZS_9b. V sadě OdS_9b byl nefunkční jeden vzorek. V sadě OdS_3b byly nefunkční čtyři vzorky a v sadě UZS_3b bylo nefunkčních sedm vzorků. Průměrná odchylka teploty se zlepšila u sady OdS_9b, u sad UZS_9b a OdS_3b zůstala téměř stejná jako před pracím cyklem.



Graf 11: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu sváru po prvním pracím cyklu

Po druhém pracím cyklu byl nefunkční jeden vzorek u sady UZS_9b. V sadě OdS_9b byly nefunkční čtyři vzorky. V sadě OdS_3b bylo nefunkčních pět vzorků a v sadě UZS_3b bylo nefunkčních sedm vzorků.



Graf 12: Srovnání směrodatných odchylek od referenčního senzoru podle typu sváru po druhém pracím cyklu

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat flexibilní senzor teploty. Nejprve byla nastudována problematika smart textilií a možné způsoby měření teploty. Byla provedena literární rešerše, která odpovídá současné situaci výzkumu textilních teplotních senzorů a situaci na komerčním trhu. Dále byly tyto senzory zhodnoceny a porovnány.

Textilní teplotní senzory najdou široké uplatnění v oblasti ochranných obleků a v lékařském prostředí, kde jejich použití usnadní a zlepší zdravotní péči. Katedra materiálů a technologií spolupracuje na vývoji hasičských oděvů, v kterých je implementován teplotní senzor. Tato zkušenost vedla k vytvoření potřebných parametrů textilního teplotního senzoru.

V praktické části byly vytvořeny dva návrhy textilních teplotních senzorů, v obou případech se jednalo o textilní termočlánek. V prvním návrhu bylo celkem provedeno devět senzorů, byly vyrobeny tři kombinace materiálů vždy po třech vzorcích: první kombinací bylo spojení konstantanu a posříbřené mědi, druhou kombinací bylo spojení konstantanu a mosazi a třetí kombinací bylo spojení konstantanu a bronzu. Spojení materiálů bylo vytvořeno jednobodovým křížením odporovým svářecím strojem pomocí termokompresního svaření. Po kalibraci vzorků byla vypočítána odchylka teploty od referenčních senzorů, která byla $\pm 0,8$ °C. Průměrné teplotní koeficient první sady byl $44,1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, druhé sady byl $43,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ a třetí sady byl $40,7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Poté byly vzorky zatíženy zrychlenému stárnutí, 1000 cykly ohybu a dvěma cykly praní a sušení. Po druhém cyklu praní a sušení byly všechny vzorky nefunkční. Po diagnostice nefunkčních vzorků byly zjištěny nedostatky v kvalitě sváru, které vedly k vytvoření druhého návrhu, který měl nedostatky zlepšit či dokonce eliminovat.

Druhý návrh obsahoval celkem čtyři sady po osmi vzorcích. Použitá kombinace materiálů pro všechny čtyři sady byla konstantanová nit s posříbřenou měděnou nití s vyšším počtem mikrodrátků, než byla použita v prvním návrhu. Sady se odlišovaly počtem křížení. Dvě sady byly vyhotoveny s třibodovým křížením a dvě s devítibodovým křížením. Další rozdíl byl v druhu svaření, kdy bylo použito ultrazvukové svaření a termokompresní svaření pomocí odporového svářecího stroje. Po kalibraci vzorků byla stanovena přesnost vzorků, která opět vyhovovala požadovaným parametrům, byla menší než 1 °C. Průměrný teplotní koeficient byl $44,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Teplotní koeficient devítibodových křížení byl o pár desetin mikrovoltů větší než u třibodového křížení. To mohlo být způsobeno delší dráhou vodivé

nitě. Nejhůře z testovaných sad dopadlo třibodové křížení s ultrazvukovým svárem, u kterého byly tři nefunkční vzorky po zrychleném stárnutí. Po prvním pracím cyklu byl funkční jen jeden vzorek. U třibodového křížení termokompresním svárem pomocí odporového svářecího stroje byly výsledky mírně lepší, ale po prvním pracím cyklu byla funkční jen polovina vzorků. Mnohem lepší výsledky mělo devítibodové křížení, kde po prvním pracím cyklu u ultrazvukového svaření fungovaly všechny vzorky a u termokompresního sváru odporovým svářecím strojem byl nefunkční jeden vzorek. Po druhém pracím cyklu nejlepší výsledky měla sada s devítibodovým ultrazvukovým svárem, kde v celé sadě nefungoval jen jeden vzorek.

K budoucímu zlepšení textilních termočlánků by bylo možné k vytvoření odolnějšího termokompresního sváru pomocí odporového svářecího stroje využít enkapsulaci pomocí fólie, která by svár ochránila. V porovnání návrhů měly nejlepší vlastnosti nitě, které obsahovaly větší počet mikrodrátků. V dalším vývoji je lepší použití nitě s minimálním počtem osmi mikrodrátků, pro větší šanci elektrického kontaktu v místě sváru. Nejlepší výsledky v porovnání druhů křížení vykazovalo devítibodové křížení nití. Z toho vyplývá, že pro kvalitní odolný svár je lepší, aby se nitě křížily minimálně v devíti bodech. Další možnou cestou ke zlepšení je v jiné kombinaci materiálů.

Seznam literatury

- [1] SCHNEEGASS, Stefan a Oliver AMFT, 2017. Smart Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction edited by Stefan Schneegass, Oliver Amft. ISBN 3319501240.
- [2] Scott, Richard A., 2005, Textiles for protection ISBN 978-1-85573-921-5
- [3] Thermal Energy Storage, TES, integrated thermal management applications. [online]. Copyright © Copyright PCM Products Ltd [cit. 15.04.2021]. Dostupné z: https://www.pcmproducts.net/Thermal_Energy_Storage.htm
- [4] Gilsoo, Cho, 2010, Smart Clothing – Technology and Applications, ISBN 978-1-4200-8852-6
- [5] TAO, Xiaoming, 2015. Handbook of smart textiles [online]. ISBN 9789814451451.
- [6] Nano-phase material - Sustainable & Refashioned Design by Buddha Jeans Sustainable & Refashioned Design by Buddha Jeans. Sustainable and Refashioned Design by Buddha Jeans [online]. Copyright © 2019 Buddha Jeans [cit. 22.02.2021]. Dostupné z: <https://buddhajeans.com/encyclopedia/nano-phase-material/>
- [7] Textile News, Apparel News, RMG News, Fashion Trends | Textile Today [online]. [cit. 4.02.2021]. Dostupné z: <https://www.textiletoday.com.bd/wp-content/uploads/2017/06/Shape-memory-applications.png>
- [8] CEN/TR 16298:2011 - Textiles and textile products - Smart textiles - Definitions, categorisation,. iTeh Standards - The source for standards and specifications [online]. Copyright © 2011 CEN All rights of exploitation in any form and by any means reserved Ref. No. CEN [cit. 29.12.2020]. Dostupné z: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/bc5e8f0a-eae5-4d47-98e9-420a25ca22f3/cen-tr-16298-2011>
- [9] D. Henock, Literature Over View Of Smart Textiles, Borås, 2010, Master thesis, University of Borås
- [10] Classification and Application of Smart Fabric Textiles - Testex. Textile Testing Instruments, Textile Testing Equipment - TESTEX [online]. Copyright © [cit. 15.04.2021]. Dostupné z: <https://www.testertextile.com/classification-and-application-of-smart-fabric-textiles/>
- [11] Standardisation of smart textiles and wearable intelligence. Share and Discover Knowledge - DOKUMEN.TIPS [online]. [cit. 20.05.2021]. Dostupné z: <https://dokumen.tips/documents/standardisation-of-smart-textiles-and-wearable-intelligence.html>
- [12] (PDF) Smart E-Textile Materials. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 202 [cit. 22.05.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/347477888_Smart_E-Textile_Materials

- [13] MEČNIKA, Viktorija a Melanie Hoerr DIPL, 2014. Smart textiles for healthcare : applications and technologies. Rural Environment, Education, Personality. 7–8. ISBN 978-9984-48-135-7
- [14] Smart Textiles and Their Applications - Knihy Google. Knihy Google [online]. [cit. 25.01.2021]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=zpPBCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=application+of+smart+textiles&ots=5ZUVIYb6Cy&sig=0jgR_i41jLjITneJO3cKGAWI2hI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [15] Heat and temperature (article) | Khan Academy. Khan Academy | Free Online Courses, Lessons & Practice [online]. Copyright © 2021 Khan Academy [cit. 15.04.2021]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/ap-chemistry/thermodynamics-ap/internal-energy-tutorial-ap/a/heat>
- [16] Temperature – The Physics Hypertextbook. The Physics Hypertextbook [online]. [cit. 15.11.2020]. Dostupné z: <https://physics.info/temperature/>
- [17] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL, 1999. Senzory a měřicí obvody. 2.vyd. Praha, ČVUT, 315s. ISBN 80-01-02057-6.
- [18] Thermoelectric effect - New World Encyclopedia. [online]. [cit. 21.01.2021]. Dostupné z: https://www.newworldencyclopedia.org/entry/thermoelectric_effect
- [19] Měření teploty. Ústav počítačové a řídicí techniky [online]. [cit. 29.12.2020]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm#k433>
- [20] RTD Sensor-Definition, Working Principle, Characteristics and Limitation. Electrical Concepts | Tricky but Easy Electrical Engineering! [online]. Copyright © 2020 Electrical Concepts [cit. 29.12.2020]. Dostupné z: <https://electricalbaba.com/rtd-sensor/>
- [21] What is RTD Sensitivity ? | Resistance Thermometer | Instrumentation Tool. Inst Tools - Instrumentation, Electrical, PLC Tutorials [online]. Copyright © Reproduction without explicit permission is prohibited. [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/what-is-rtd-sensitivity/>
- [22] Understanding RTDs, [online]. [cit. 15.04.2021]. Dostupné z: <https://www.te.com/global-en/industries/sensor-solutions/insights/understanding-rtds.html>
- [23] Měření teploty - kovové odporové senzory teploty | Vývoj.HW.cz. Vývoj.HW.cz | Profesionální elektronika [online]. Copyright © 1997 [cit. 29.12.2020]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [24] A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors | IntechOpen. IntechOpen - Open Science Open Minds | IntechOpen [online]. Copyright © 2013 The Author [cit. 21.01.2021]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/current-trends-in-short-and-long-period-fiber-gratings/a-guide-to-fiber-bragg-grating-sensors>

- [25] FBG Principle - FBGS. Tailored fiber optic sensing components & solutions [online]. [cit. 21.01.2021]. Dostupné z: <https://fbgs.com/technology/fbg-principle/>
- [26] ARCHER, Ian A. a Robert A. DICKSON, 1989. Basic principles. Current Orthopaedics [online]. [cit. 22.01.2021]. 3(2), 72–76. ISSN 02680890. Dostupné z: doi:10.1016/0268-0890(89)90034-0
- [27] Principles of Non-Contact Temperature Measurement. [online]. Copyright © 2001 [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: <https://www.keller.de/en/its/pyrometers/applications/basics/principles-of-non-contact-temperature-measurement.htm>
- [28] Bezdotykové měření teploty [online] [cit. 24.01.2021]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykovove-teplomery/bezdotykovove-mereni-teploty.htm>
- [29] Sensor Terminology - NI. [online]. Copyright © [cit. 20.01.2021]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/13/sensor-terminology.html>
- [30] Characteristics of Sensors | Electrical4U. Electrical4U: Learn Electrical Engineering Basics & Principles [online]. Copyright © 2021 [cit. 20.01.2021]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/characteristics-of-sensors/>
- [31] CalibrationCurve [online]. [cit. 01.02.2021]. Dostupné z: <https://terpconnect.umd.edu/~toh/models/CalibrationCurve.html>
- [32] Kalibrace – Wikipedie. [online]. [cit. 01.02.2021]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kalibrace>
- [33] Sensors::Accuracy. [online]. Copyright © ME [cit. 27.01.2021]. Dostupné z: <https://www.me-systeme.de/en/technology-first/sensors/accuracy>
- [34] Metody-mereni-a-cidla-teploty [online]. [cit. 28.01.2021]. Dostupné z: <https://axiomet.eu/cz/cz/page/2096/Metody-mereni-a-cidla-teploty/>
- [35] 5. Třídy přesnosti pro termočláňkové snímače teploty. [online]. Copyright © 2019 [cit. 31.01.2021]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/d713b8f0-54e7-2c04-e4d1-179b215fcc36?Edition=cz>
- [36] (PDF) Wearable sensors in intelligent clothing for measuring human body temperature based on optical fiber Bragg grating. ResearchGate[online]. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/227398362_Wearable_sensors_in_intelligent_clothing_for_measuring_human_body_temperature_based_on_optical_fiber_Bragg_grating
- [37] A Study of Thermistor Performance within a Textile Structure. National Center for Biotechnology Information [online]. [cit. 11.12.2020]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5579833/>
- [38] Fibers | Free Full-Text | Developing Novel Temperature Sensing Garments for Health Monitoring Applications | HTML. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. Copyright © 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This

- article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution [cit. 03.01.2021]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2079-6439/6/3/46/htm>
- [39] Flexible Temperature Sensor Integration into E-Textiles Using Different Industrial Yarn Fabrication Processes | HTML. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. Copyright © 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/1/73/htm>
- [40] Full Fabric Sensing Network with Large Deformation for Continuous Detection of Skin Temperature | Request PDF. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 2016 IEEE. Personal use is permitted, but republication [cit. 12.12.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/324812946_Full_Fabric_Sensing_Network_with_Large_Deformation_for_Continuous_Detection_of_Skin_Temperature
- [41] Printed organic conductive polymers thermocouples in textile and smart clothing applications - IEEE Conference Publication. [online]. Copyright © Copyright 2021 IEEE [cit. 01.02.2021]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6090890/figures#figuresAbstrakt>
- [42] All-fabric Temperature sensor | Knitronix. IoT textile sensors for Temperature Pressure Liquids | Knitronix | Italy [online]. Copyright ©2020 Knitronix Srl [cit. 22.01.2021]. Dostupné z: <https://www.knitronix.com/temperature-sensor>
- [43] Sensor Market by type, end use industry, and region 2017-2022| Lucintel. Management Consulting, Market Research Company, Market Research Firms [online]. Copyright © copyright [cit. 13.02.2021]. Dostupné z: <https://www.lucintel.com/pq/global-sensor-market-2017-2022.aspx>
- [44] Global Wearable Sensors Market Size | Industry Report, 2018-2025. Market Research Reports & Consulting | Grand View Research, Inc. [online]. Copyright © 2021 Grand View Research, Inc. All rights reserved. [cit. 13.02.2021]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-wearable-sensor-market>
- [45] Smart Textile Market Size, Share | Industry Growth and Analysis by 2022. Market Research Company offers Syndicate & Custom Market Research Reports with Consulting Services - Allied Market Research [online]. Copyright © 2021 Allied Market Research. All Rights Reserved [cit. 13.02.2021]. Dostupné z: <https://www.alliedmarketresearch.com/smart-textile-market>
- [46] MATTILA, H.R., 2006. Intelligent Textiles and Clothing - The Textile Institute [online]. ISBN 9781845690052.
- [47] Tělesná teplota – WikiSkripta [online]. [cit. 13.02.2021]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/T%C4%9Blesn%C3%A1_teplota

- [48] Body temperature: Normal ranges in adults and children. Medical and health information [online]. Copyright © 2004 [cit. 15.02.2021]. Dostupné z: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/323819#adults>
- [49] What Is the Normal Body Temperature: Babies, Kids, Adults, and More. Healthline: Medical information and health advice you can trust. [online]. Copyright © 2005 [cit. 15.02.2021]. Dostupné z: <https://www.healthline.com/health/what-is-normal-body-temperature#hypothermia-symptoms>
- [50] Odporové svařování | ROCKWELD-GROUP. ROCKWELD-GROUP | Svařovací technika - specialista na odporové a laserové svařování [online]. Copyright © [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/odporove-svarovani/>
- [51] Sunstone Welders > Home of Orion Welders & More [online]. [cit. 13.05.2021] Dostupné z: https://sunstonewelders.com/var/images/product/366.440/welding-attachment-micro-weld-head-mwh_1.jpg
- [52] Lineární regrese – Wikipedie. [online]. [cit. 30.04.2021] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Line%C3%A1rn%C3%AD_regrese
- [53] ČSN EN 60068-2-14, Zkoušení vlivů prostředí - Část 2: Zkoušky – Zkouška N: Změna teploty, Český normalizační institut, 2000
- [54] ČSN EN ISO 6330. Textilie -postupy domácího praní a sušení pro zkoušení textilií . Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [55] INFO - zpravodajský portál ZČU [online]. Copyright ©6 [cit. 13.05.2021]. Dostupné z: <https://info.zcu.cz/image?obrazek=12955&type=orig>

Seznam obrázků

OBR. 1.1: PŘÍKLAD FUNKCE PCM (PŘEKRESLENO Z [6])	11
OBR. 1.2: PRINCIP SMM (PŘEKRESLENO Z [7])	12
OBR. 1.3: JEDNOTLIVÉ FUNKCE E-TEXTILÍ (PŘEVZATO Z [12])	15
OBR. 1.4.: HLAVNÍ VLASTNOSTI PRO SMART TEXTILIE (PŘEKRESLENO Z [4])	16
OBR. 2.1: MODEL TERMOČLÁNKU	20
OBR. 2.2: STATICKÉ CHARAKTERISTIKY VYBRANÝCH TYPŮ TERMOELEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ (PŘEVZATO Z [17])	20
OBR. 2.3: ZÁVISLOST RELATIVNÍHO ODPORU KOVU NA TEPLOTĚ (PŘEVZATO Z [20])	21
OBR. 2.4: A) TEPLOTNÍ ZÁVISLOST ODPOROVÝCH SENZORŮ TEPLoty B) CHARAKTERISTIKA SI SENZORU TEPLoty (PŘEVZATO Z [17])	23
OBR. 2.5: TEPLOTNÍ ZÁVISLOST NAPĚTÍ $\Delta UD = f(T)$ PN-DIODY (PŘEVZATO Z [17]).....	24
OBR. 2.6: PRINCIP BRAGGOVÝCH VLÁKNOVÉ OPTICKÝCH MŘÍŽEK (PŘEKRESLENO Z [25])	24
OBR. 2.7: ODEZVA FBG NA ZMĚNU TEPLoty (PŘEKRESLENO Z [25]).....	25
OBR. 2.8: VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA ČERNÉHO TĚLESA V ZÁVISLOSTI NA JEHO TEPLOTĚ (PŘEVZATO Z [28]).....	26
OBR. 2.9: ZÁKLADNÍ PARAMETRY SENZORŮ (PŘEKRESLENO Z [29])	28
OBR. 2.10: ZNÁZORNĚNÍ ADITIVNÍ A MULTIPLIKATIVNÍ CHYBY	29
OBR. 2.11: PŘÍKLAD ČASOVÉ KONSTANTY (PŘEKRESLENO Z [29])	29
OBR. 2.12 PŘÍKLAD KALIBRAČNÍ KŘIVKY	30
OBR. 3.1: PŘÍRŮSTEK TEPLoty A VLNOVÉ DÉLKY PRO SENZORY FBG ZABALENÉ V POLYMERU A HOLÉ SENZORY FBG (PŘEKRESLENO Z [36]).....	32
OBR. 3.2: SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZAPOUZDŘENÍ TERMISTORU DO PŘÍZE (PŘEVZATO Z [37])	33
OBR. 3.3: A) KONCEPT FLEXIBILNÍHO TEPLOTNÍHO SENZORU ZABUDOVANÉHO DO TEXTILNÍ PŘÍZE. B) OHÝBÁNÍ NEKRYTÝCH FLEXIBILNÍCH RTD FÓLIÍ C) DETAILNÍ ZÁBĚR NA SNÍMACÍ OBLAST RTD FÓLIE. D) RTD ZABUDOVANÝ DO PLETENÉ POLYESTEROVÉ PŘÍZE. E) PRŮŘEZ PLETENÉ PŘÍZE (PŘEVZATO Z [38]).....	34
OBR. 3.4: A) STRUKTURA TKANINY TEPLOTNÍHO SENZORU. B) SNÍMEK VLÁKNA POMOCÍ SEM (RASTROVACÍHO ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU). C-D) PŘEDNÍ A ZADNÍ POHLED NA TKANÝ TEPLOTNÍ SENZOR. (PŘEVZATO Z [40])	35
OBR. 3.5: PŘIBLÍŽENÁ STRUKTURA TEXTILNÍHO SENZORU OD FIRMY KNITRONIX (PŘEVZATO Z [42]).....	37
OBR. 3.6: GRAF VYJADŘUJÍCÍ PRODEJ RŮZNÝCH DRUHŮ SENZORŮ (PŘEVZATO Z [43])	42
OBR. 3.7: TRH ZASTOUPENÍ NOSITELNÝCH SENZORŮ VE SPOJENÝCH STÁTECH AMERICKÝCH V MILIONECH AMERICKÝCH DOLARŮ (PŘEVZATO Z [44])	42
OBR. 3.8: TRH ROZDĚLENÍ SMART TEXTILÍ PODLE JEJICH FUNKCE [45].....	43
OBR. 3.9: KLASIFIKACE LÉKAŘSKÝCH VYUŽITÍ SMART TEXTILÍ PODLE KLINICKÝCH FÁZÍ (PŘEVZATO Z [46]) .	44
OBR. 3.10: ROZSAH TEPELNÝCH PODMÍNEK PŘI VÝKONU HASIČŮ (PŘEKRESLENO Z [2])	44
OBR. 3.11: UKÁZKA ZPĚTNÉ VAZBY K VYHŘÍVANÝM TEXTILÍM	46
OBR. 4.1: VÝVOJOVÝ DIAGRAM VÝROBNÍHO A TESTOVACÍHO PROCESU TEXTILNÍHO TEPLOTNÍHO SENZORU ..	47
OBR. 4.2: VYŠITÉ TEXTILNÍ TERMOČLÁNKY S TERMOKOMPRESNÍM SVÁREM	49
OBR. 4.3: A) ODPOROVÝ SVÁŘECÍ STROJ SUNSTONE LINEARDC 500 (PŘEVZATO Z [51]) B) SCHÉMA TOKU PROUDU PARALELNÍ HLAVOU	50
OBR. 4.4: A) UMÍSTĚNÍ TEXTILNÍCH TERMOČLÁNKŮ A REFERENČNÍCH SENZORŮ V PEČI B) KONTAKTOVÁNÍ TERMOČLÁNKŮ PŘI KALIBRAČNÍM MĚŘENÍ A UMÍSTĚNÍ SENZORU SNÍMAJÍCÍHO REFERENČNÍ TEPLoty	54
OBR. 4.5: A) TEPLOTNÍ ŠOKOVÁ KOMORA FIRMY VÖTSCH B) ULOŽENÍ VZORKŮ V KLECOVÉM VÝTAHU UVNITŘ KOMORY	55
OBR. 4.6: A) PRINCIP OHYBOVÉHO TESTU B) MAXIMÁLNÍ ZKOUMANÝ OHYB VZORKU	56
OBR. 4.7: SVÁRY ZOBRAZENÉ POD MIKROSKOPEM A) PO VÝROBĚ – HORNÍ VRSTVA SVÁRU B) PO VÝROBĚ – SPODNÍ VRSTVA C) PO PRACÍM CYKLU – HORNÍ VRSTVA D) PO PRACÍM CYKLU – SPODNÍ VRSTVA.....	59
OBR. 4.8: POROVNÁNÍ TŘÍ DRUHŮ KŘÍŽENÍ: A) JEDNOBODOVÉ KŘÍŽENÍ POUŽITÉ V 1. NÁVRHU B) TŘÍBODOVÉ KŘÍŽENÍ C) DEVÍTIBODOVÉ KŘÍŽENÍ.....	60
OBR. 4.9: A) ULTRAZVUKOVÝ SVÁŘECÍ STROJ HERRMANN (PŘEVZATO Z [55]), UKÁZKA DEVÍTIBODOVÉ SVÁRU SPOLU S TPU FÓLIÍ B) Z HORNÍ STRANY C) ZE SPODNÍ STRANY	61

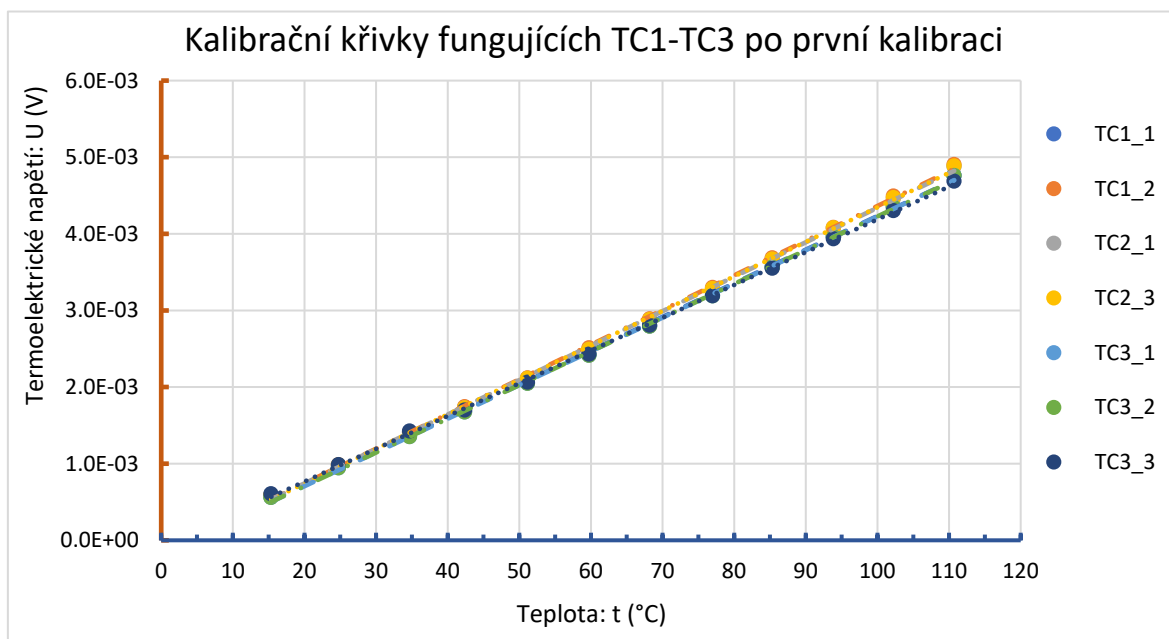
Seznam tabulek

TAB. 2.1: MATERIÁLY PRO ODPOROVÝ ZPŮSOB MĚŘENÍ TEPLoty (PŘEVZATO Z [23])	22
TAB. 2.2: SHRNUtÍ TŘÍD PŘESNOSTI SENZORŮ RTD (PŘEVZATO Z [34]).....	31
TAB. 2.3: VYBRANÉ TŘÍDY PŘESNOSTI PRO TERMOČLÁNKY PODLE ČSN EN 60584-2 (PŘEVZATO Z [35])	31
TAB. 3.1: TECHNICKÉ PARAMETRY TEPLotNÍHO SENZORU OD FIRMY KNITRONIX (PŘEVZATO Z [42])	37
TAB. 3.2: POROVNÁVACÍ MATICE KRITÉRIÍ TEPLotNÍCH SENZORŮ.....	39
TAB. 3.3: ŽHODNOCENÍ SENZORŮ ZAHRNUTÝCH V REŠERŠI	40
TAB. 4.1: PARAMETRY TERMOČLÁNKOVÝCH SENZORŮ.....	48
TAB. 4.2: NASTAVENÉ PARAMETRY ODPOROVÉHO SVÁŘECÍHO STROJE PŘI TERMOKOMPRESNÍM SVÁŘOVÁNÍ .	50
TAB. 4.3: OZNAČENÍ TERMOČLÁNKOVÝCH SENZORŮ	51
TAB. 4.4: POROVNÁNÍ PARAMETRŮ PRVNÍMU A DRUHÉHO NÁVRHU.....	61
TAB. 4.5: NASTAVENÉ PARAMETRY NA ULTRAZVUKOVÉM SVÁŘECÍM STROJI.....	62
TAB. 4.6: OZNAČENÍ DRUHÉHO NÁVRHU TERMOČLÁNKOVÝCH SENZORŮ	62

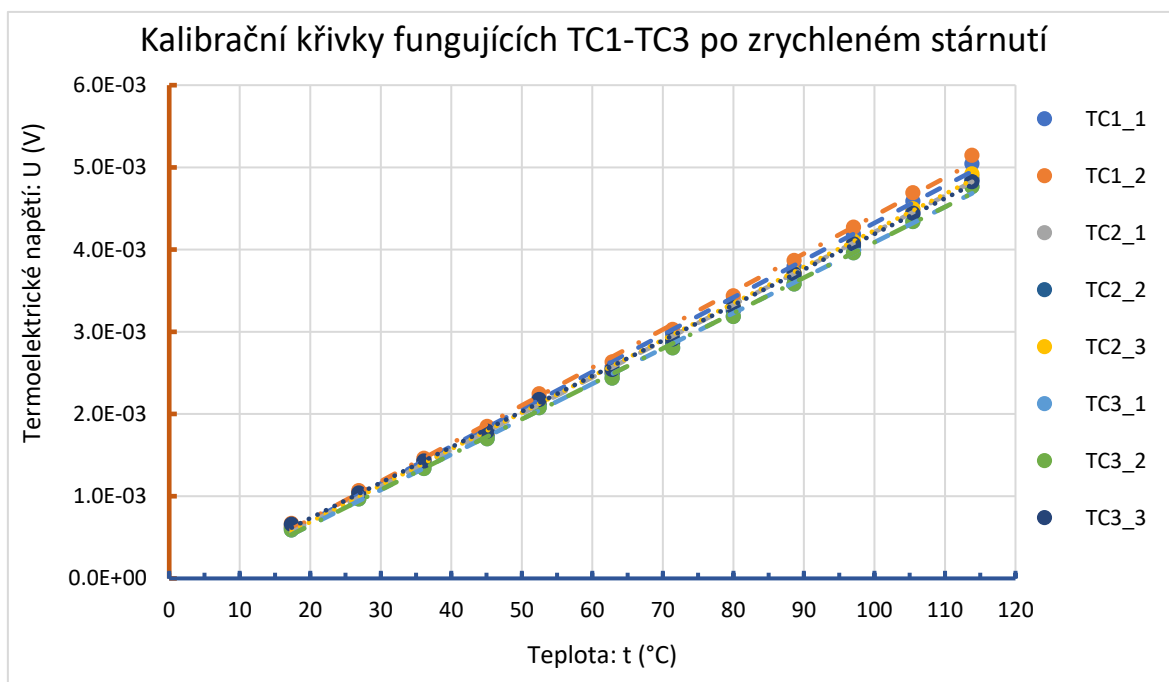
Seznam grafů

GRAF 1: ČASOVÝ PRŮBĚH TEPLoty REFERENČNÍHO SENZORU Pt1000 UVNITŘ PECE.....	51
GRAF 2: SCHODOVITÝ PRŮBĚH NAPĚTÍ TC1-TC3 V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ V ČASE	52
GRAF 3: KALIBRAČNÍ KŘIVKA TC2 V POROVNÁNÍ S KOMERČNÍMI TERMOČLÁNKY	53
GRAF 4: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU MATERIÁLU PO PRVNÍ KALIBRACI	57
GRAF 5: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU MATERIÁLU PO ZRYCHLENÉM STÁRNUTÍ.....	58
GRAF 6: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU MATERIÁLU PO TESTU OHYBU	58
GRAF 7: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU SVÁRU PO PRVNÍ KALIBRACI.....	63
GRAF 8: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK NAPĚTÍ MEZI SADAMI PODLE TYPU SVÁRU PO PRVNÍ KALIBRACI.....	63
GRAF 9: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU SVÁRU PO ZRYCHLENÉM STÁRNUTÍ.....	64
GRAF 10: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU SVÁRU PO TESTU OHYBU.....	64
GRAF 11: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU SVÁRU PO PRVNÍM PRACÍM CYKLU	65
GRAF 12: SROVNÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK OD REFERENČNÍHO SENZORU PODLE TYPU SVÁRU PO DRUHÉM PRACÍM CYKLU	65
GRAF 13: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH TC1-TC3 PO PRVNÍ KALIBRACI.....	76
GRAF 14: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH TC1-TC3 PO ZRYCHLENÉM STÁRNUTÍ	76
GRAF 15: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH TC1-TC3 PO OHYBOVÉM TESTU	77
GRAF 16: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH TC1-TC3 PO PRVNÍM PRACÍM CYKLU	77
GRAF 17: KALIBRAČNÍ KŘIVKY UzS_9p PO PRVNÍ KALIBRACI	77
GRAF 18: KALIBRAČNÍ KŘIVKY UzS_9p PO ZRYCHLENÉM STÁRNUTÍ	78
GRAF 19: KALIBRAČNÍ KŘIVKY UzS_9p PO OHYBOVÉM TESTU.....	78
GRAF 20: KALIBRAČNÍ KŘIVKY UzS_9p PO PRVNÍM PRACÍM CYKLU.....	78
GRAF 21: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH UzS_9p PO DRUHÉM PRACÍM CYKLU.....	79
GRAF 22: KALIBRAČNÍ KŘIVKY UzS_3p PO PRVNÍ KALIBRACI	79
GRAF 23: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH UzS_3p PO ZRYCHLENÉM STÁRNUTÍ.....	79
GRAF 24: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH UzS_3p PO OHYBOVÉM TESTU	80
GRAF 25: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH UzS_3p PO PRVNÍM PRACÍM CYKLU	80
GRAF 26: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH UzS_3p PO DRUHÉM PRACÍM CYKLU.....	80
GRAF 27: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_9p PO PRVNÍ KALIBRACI	81
GRAF 28: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_9p PO ZRYCHLENÉM STÁRNUTÍ	81
GRAF 29: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_9p PO OHYBOVÉM TESTU.....	81
GRAF 30: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_9p PO PRVNÍM PRACÍM TESTU.....	82
GRAF 31: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_9p PO DRUHÉM PRACÍM TESTU	82
GRAF 32: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_3p PO PRVNÍ KALIBRACI	82
GRAF 33: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_3p PO ZRYCHLENÉM STÁRNUTÍ	83
GRAF 34: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_3p PO OHYBOVÉM TESTU.....	83
GRAF 35: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_3p PO PRVNÍM PRACÍM TESTU.....	83
GRAF 36: KALIBRAČNÍ KŘIVKY FUNGUJÍCÍCH Ods_3p PO DRUHÉM PRACÍM TESTU	84

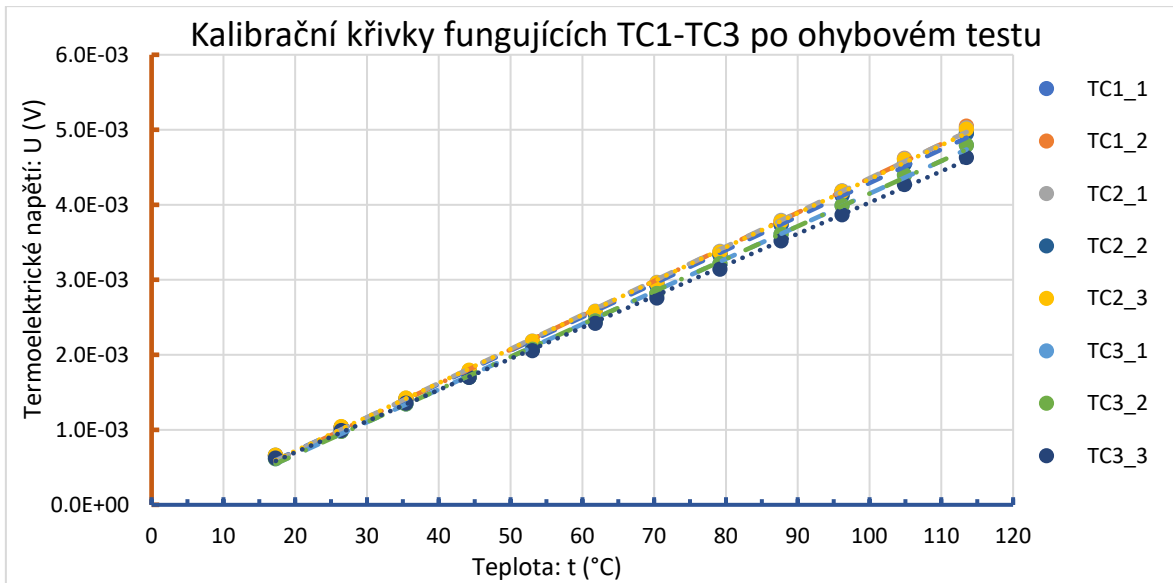
Přílohy



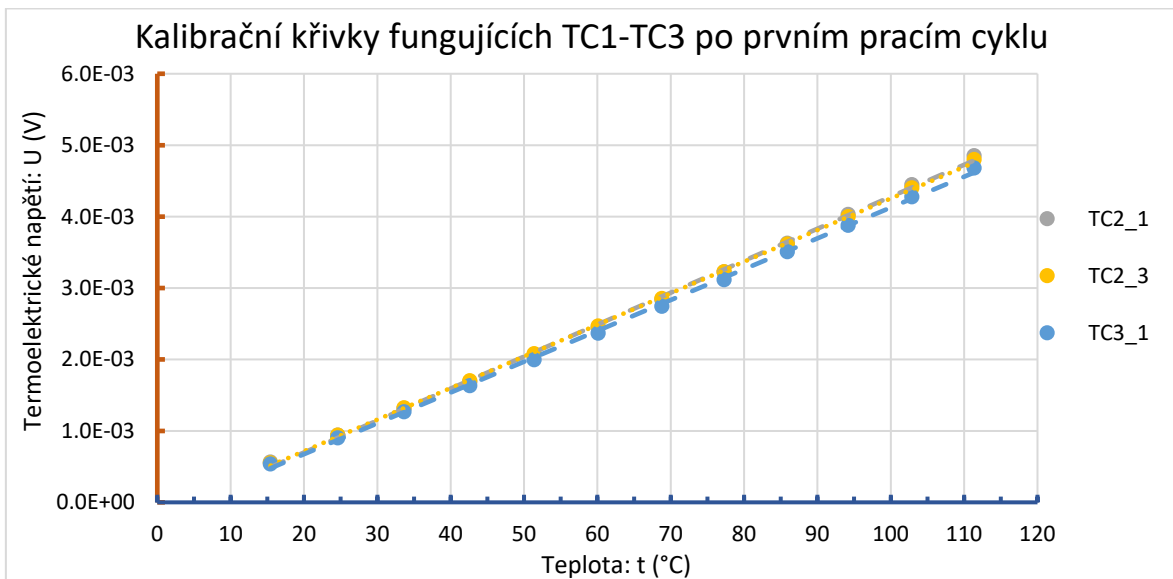
Graf 13: Kalibrační křivky fungujících TC1-TC3 po první kalibraci



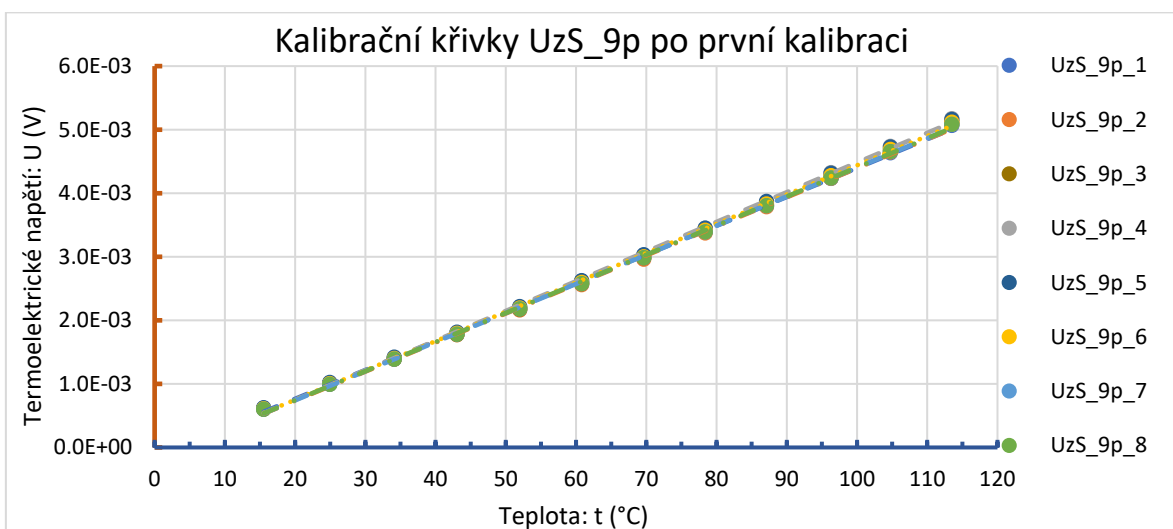
Graf 14: Kalibrační křivky fungujících TC1-TC3 po zrychleném stárnutí



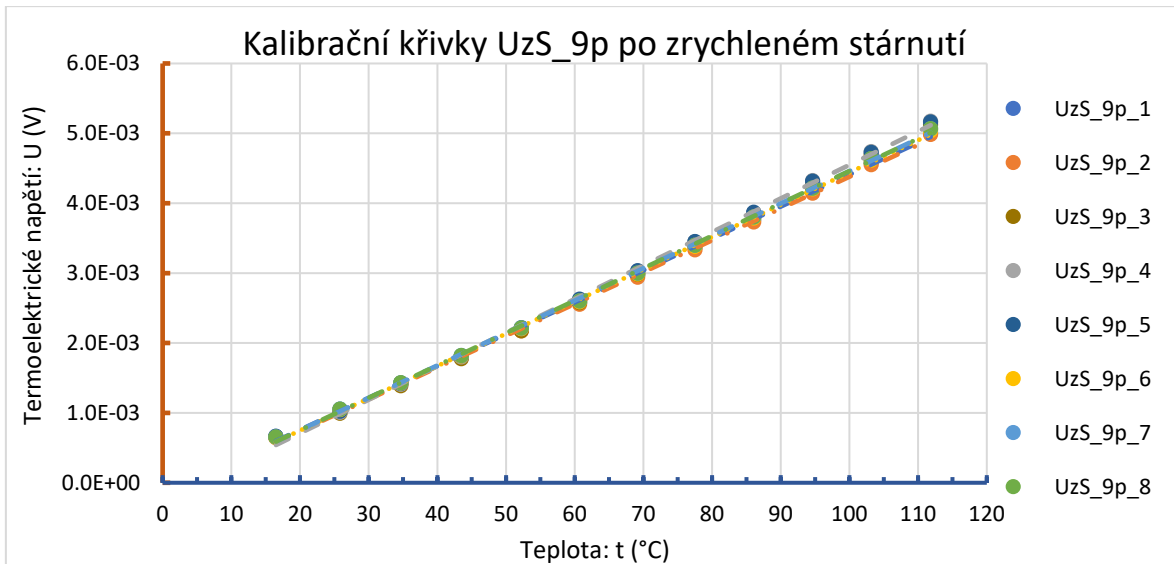
Graf 15: Kalibrační křivky fungujících TC1-TC3 po ohybovém testu



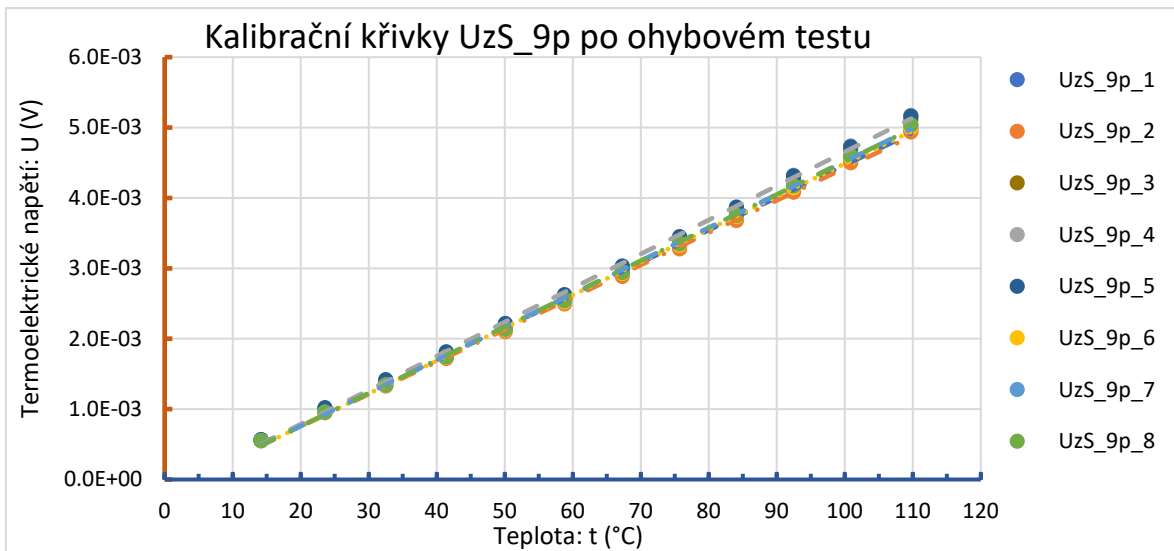
Graf 16: Kalibrační křivky fungujících TC1-TC3 po prvním pracím cyklu



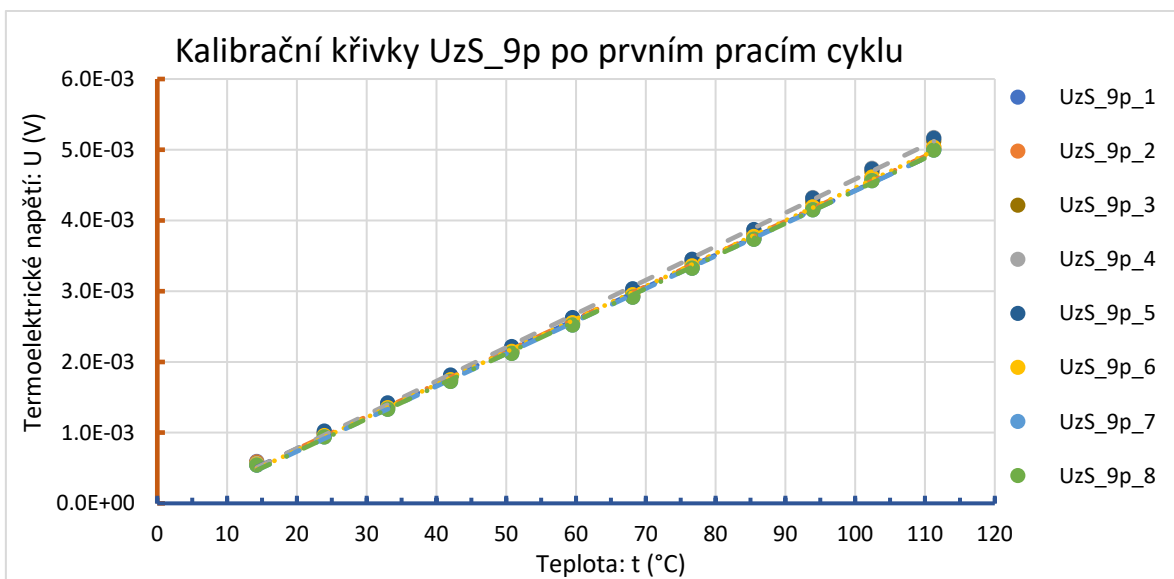
Graf 17: Kalibrační křivky UzS_9p po první kalibraci



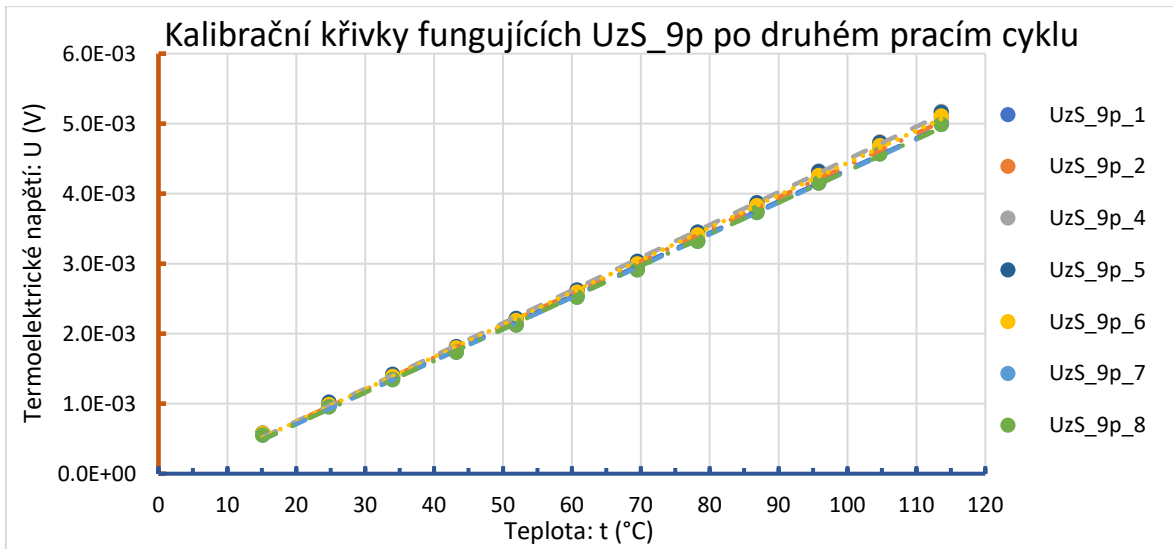
Graf 18: Kalibrační křivky UzS_9p po zrychleném stárnutí



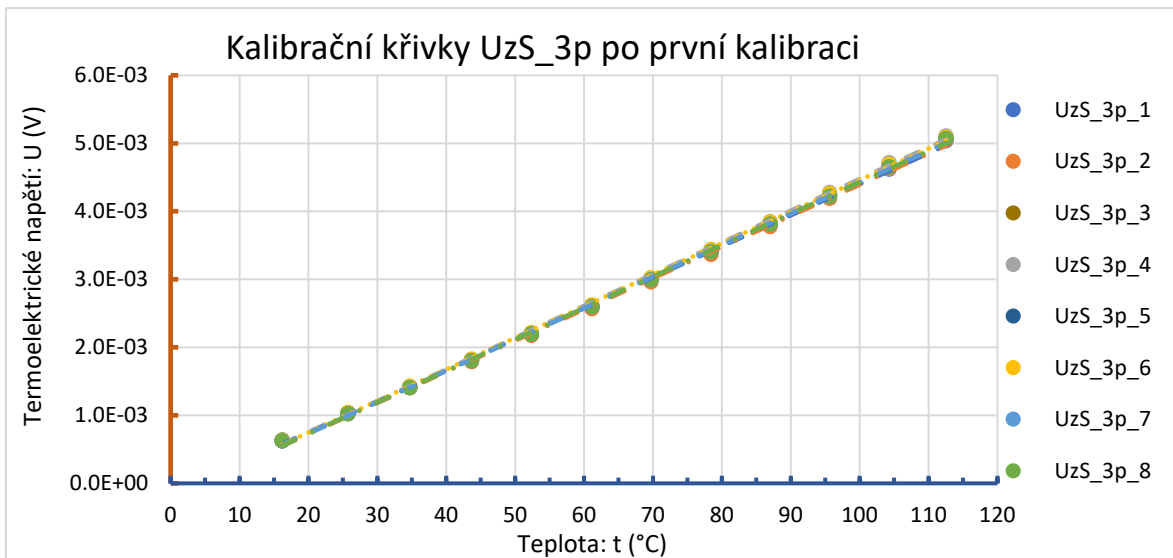
Graf 19: Kalibrační křivky UzS_9p po ohybovém testu



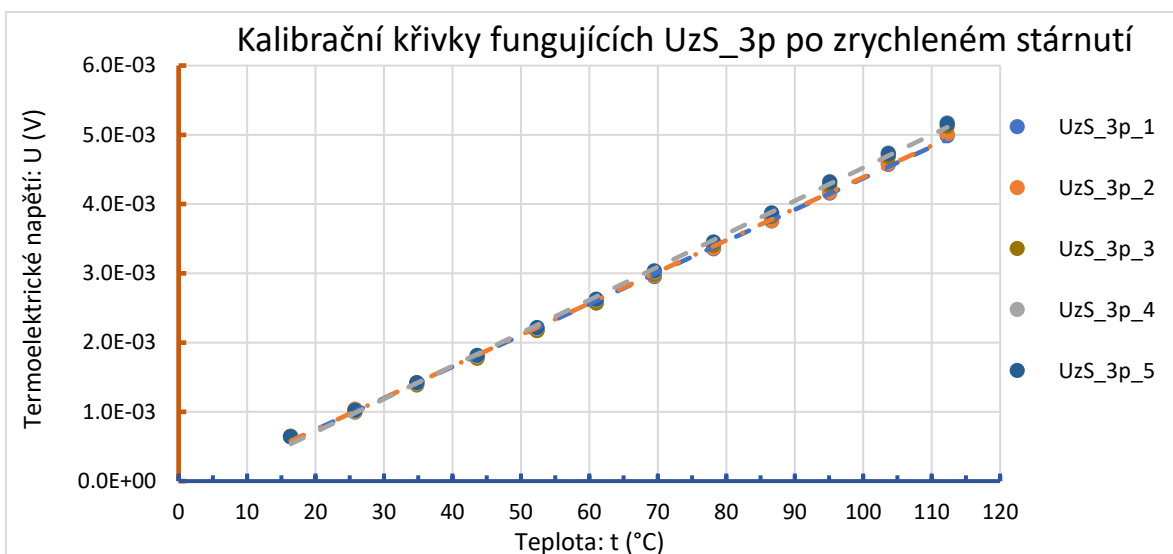
Graf 20: Kalibrační křivky UzS_9p po prvním pracím cyklu



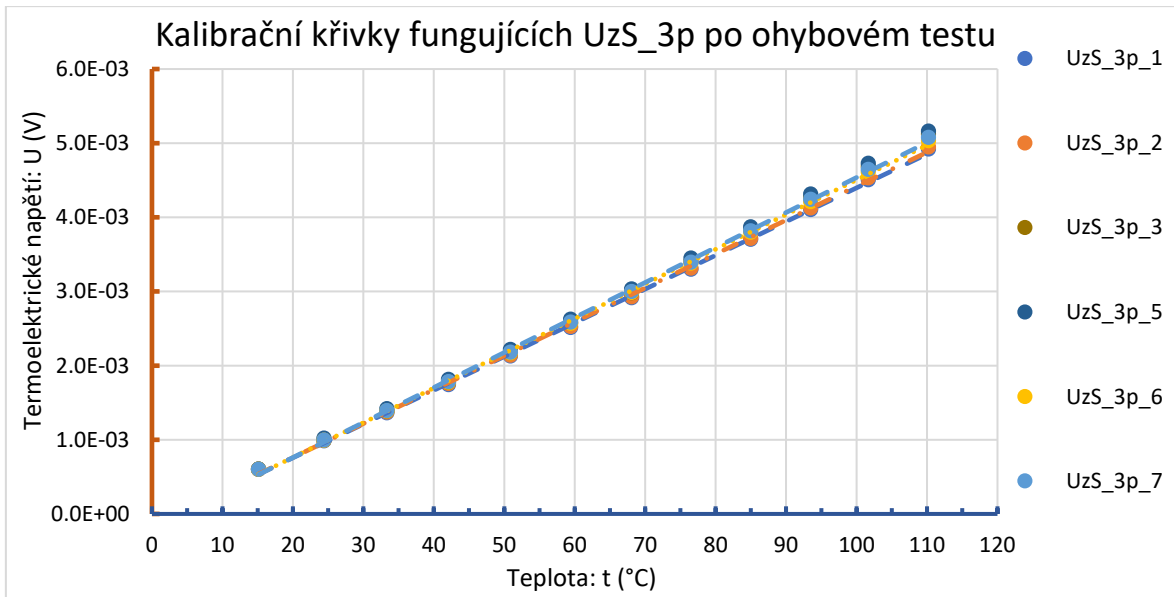
Graf 21: Kalibrační křivky fungujících UzS_9p po druhém pracím cyklu



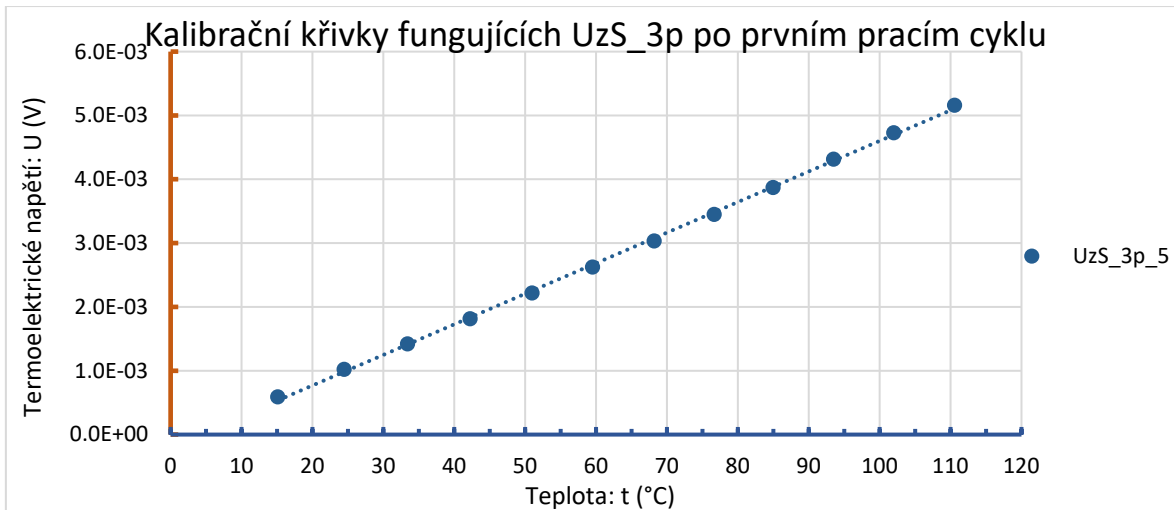
Graf 22: Kalibrační křivky UzS_3p po první kalibraci



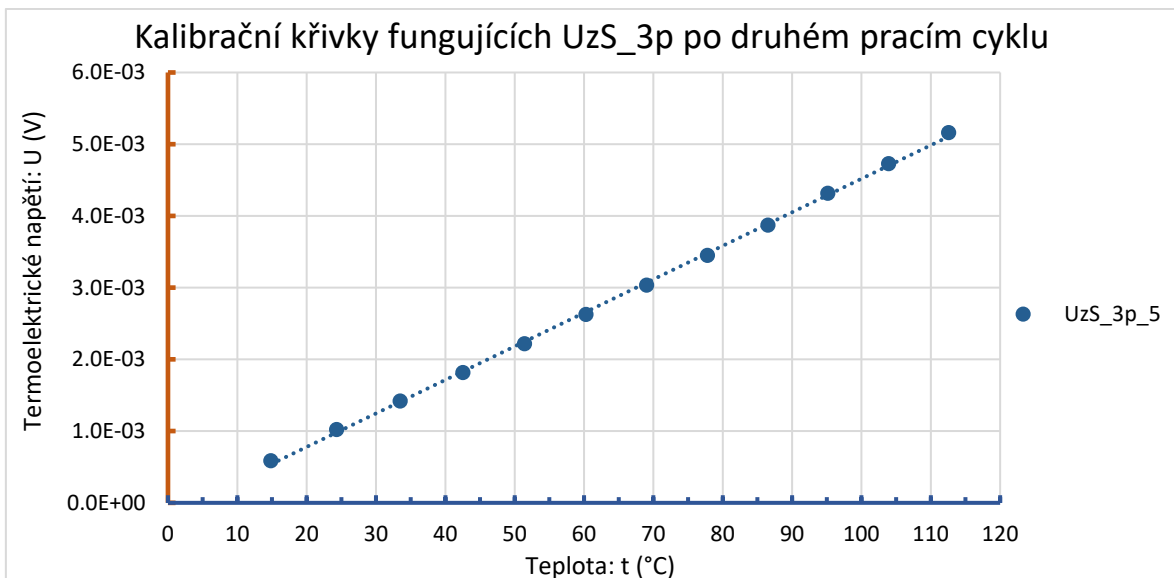
Graf 23: Kalibrační křivky fungujících UzS_3p po zrychleném stárnutí



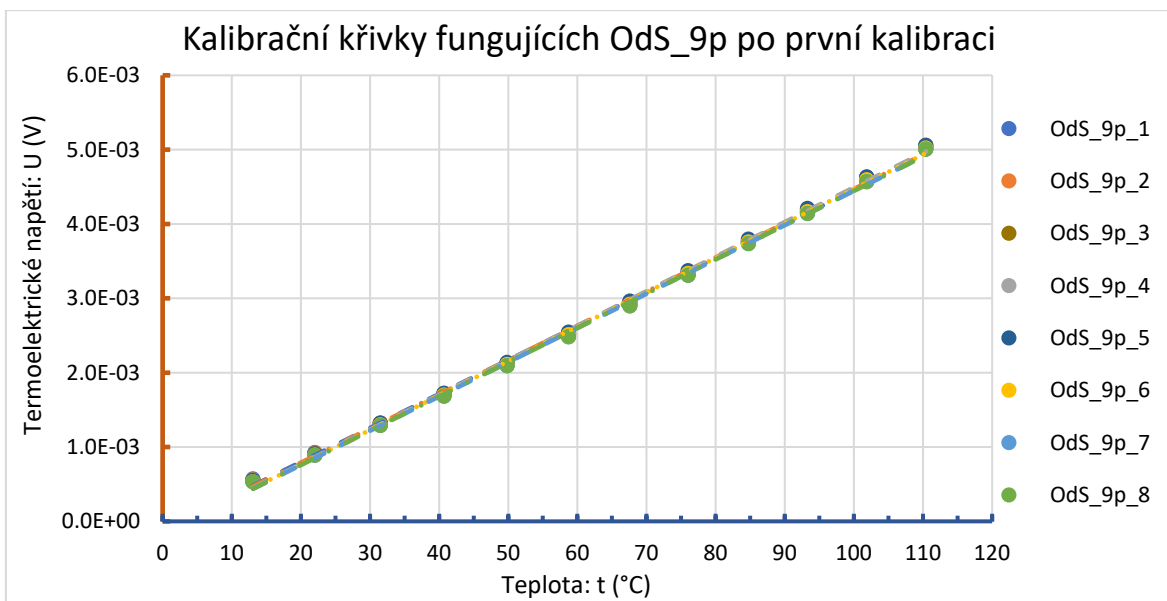
Graf 24: Kalibrační křivky fungujících UzS_3p po ohybovém testu



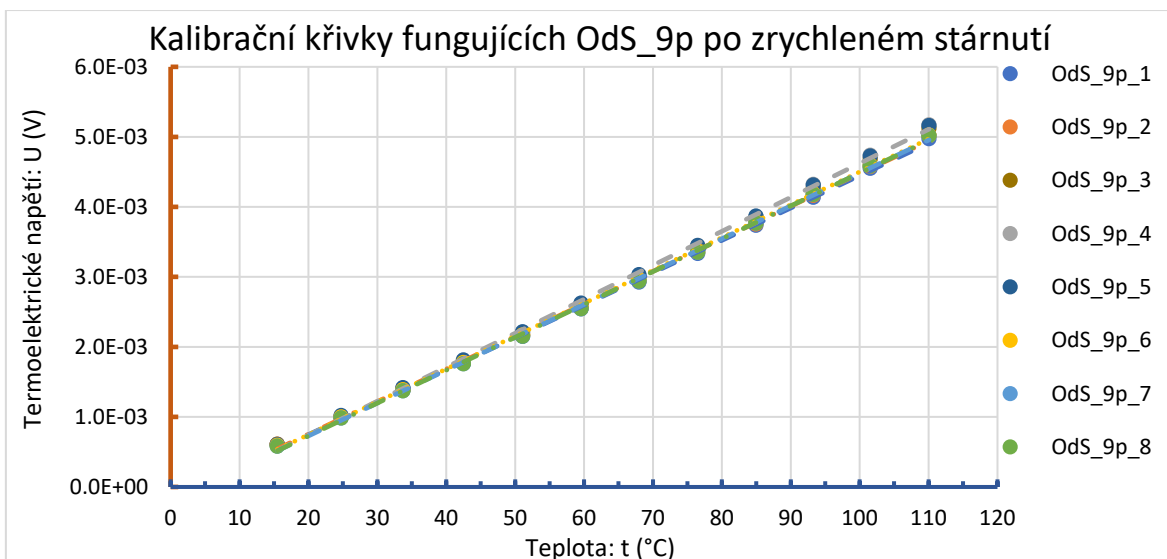
Graf 25: Kalibrační křivky fungujících UzS_3p po prvním pracím cyklu



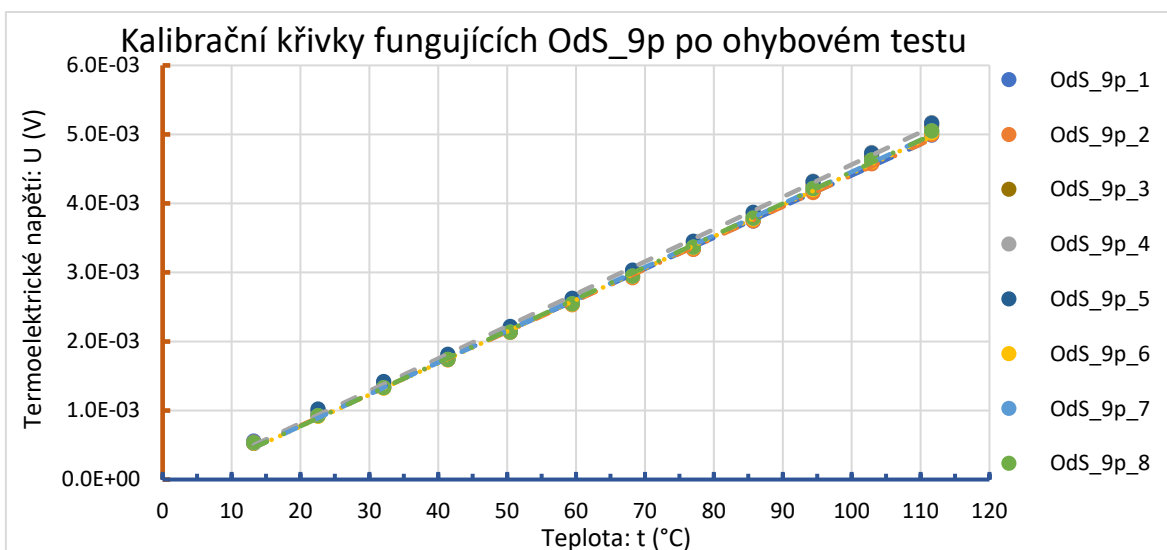
Graf 26: Kalibrační křivky fungujících UzS_3p po druhém pracím cyklu



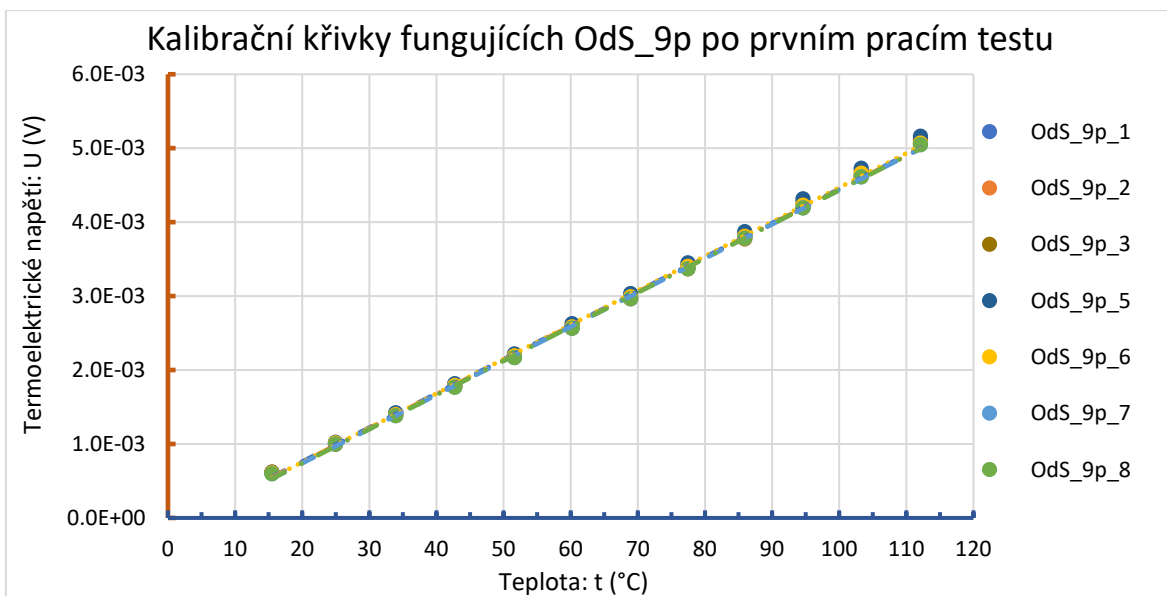
Graf 27: Kalibrační křivky fungujících OdS_9p po první kalibraci



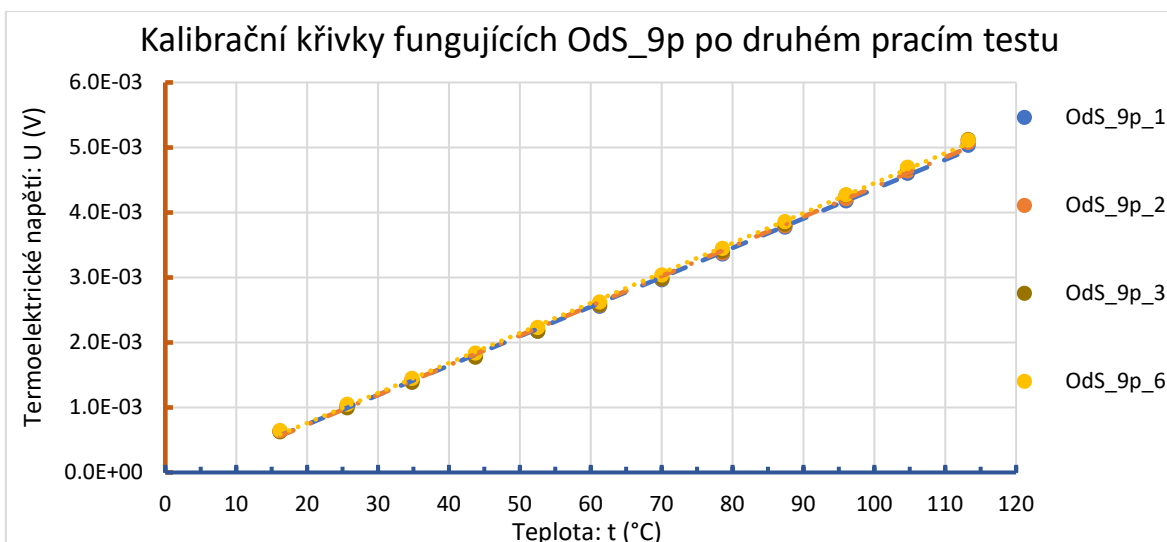
Graf 28: Kalibrační křivky fungujících OdS_9p po zrychleném stárnutí



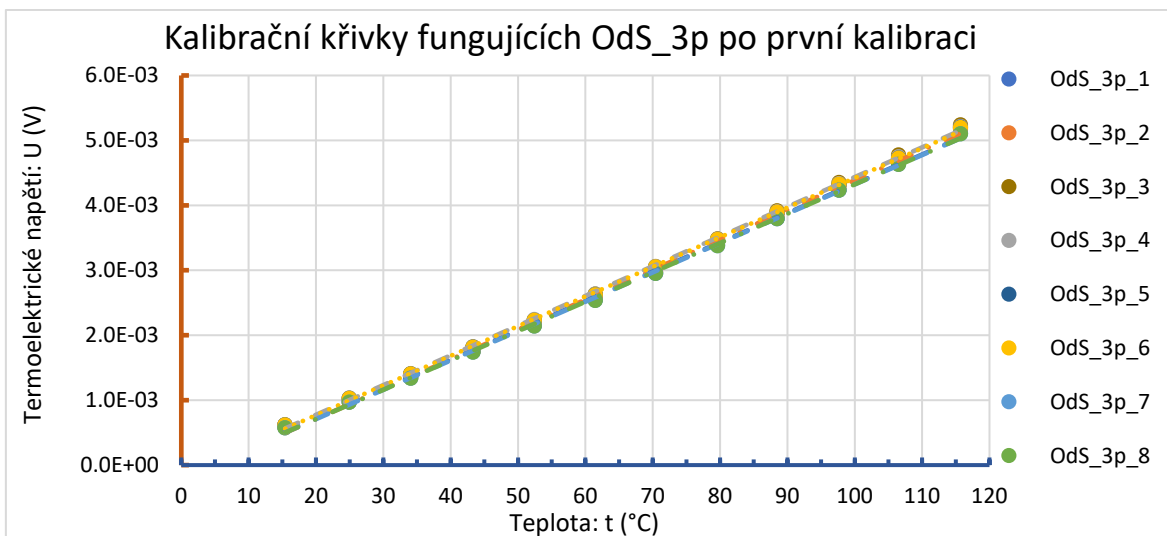
Graf 29: Kalibrační křivky fungujících OdS_9p po ohybovém testu



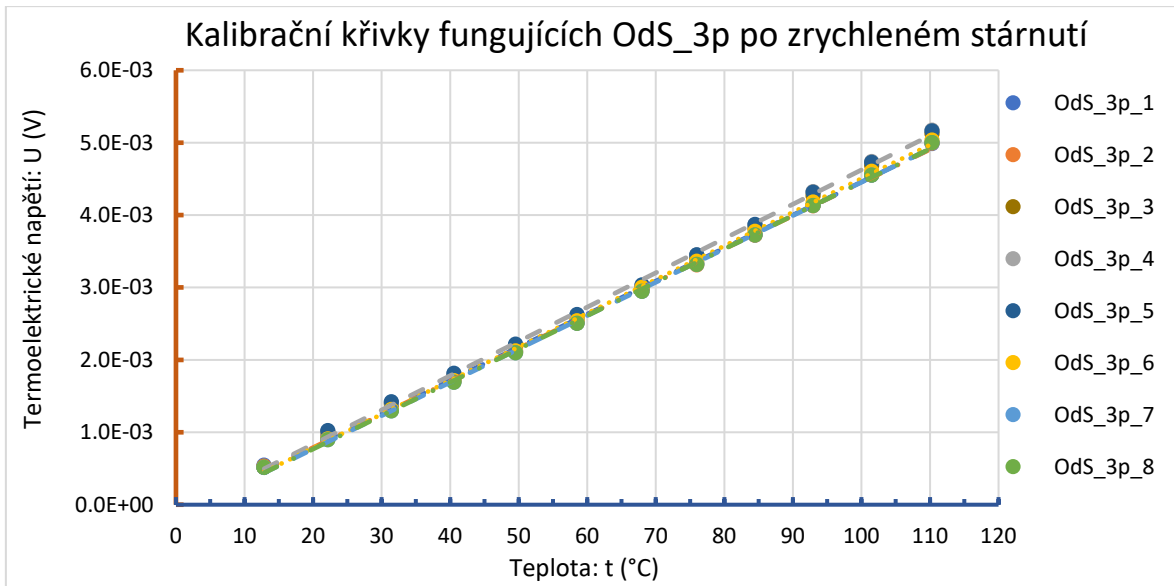
Graf 30: Kalibrační křivky fungujících OdS_9p po prvním pracím testu



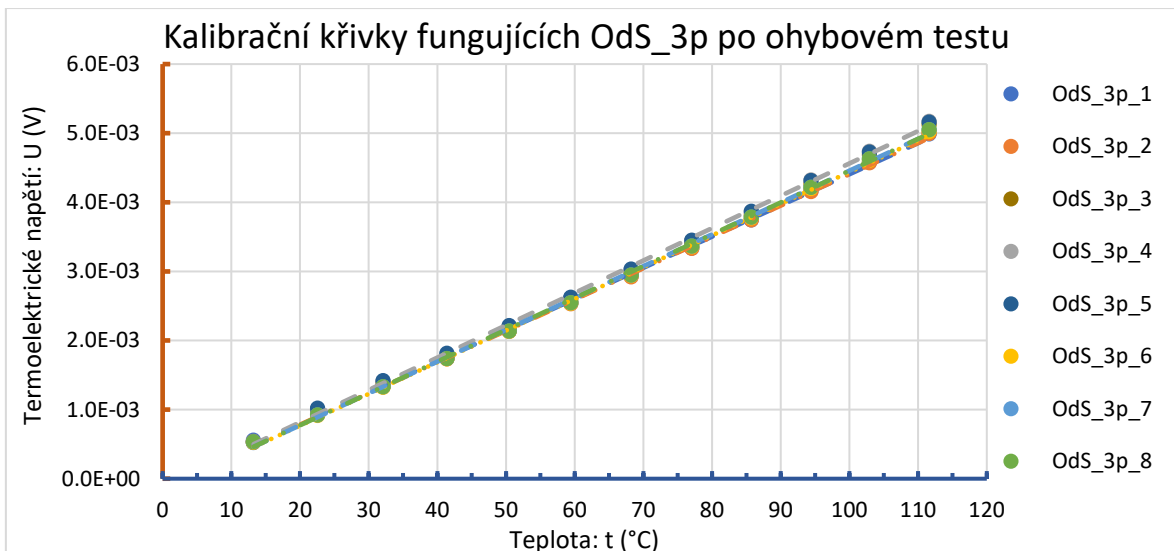
Graf 31: Kalibrační křivky fungujících OdS_9p po druhém pracím testu



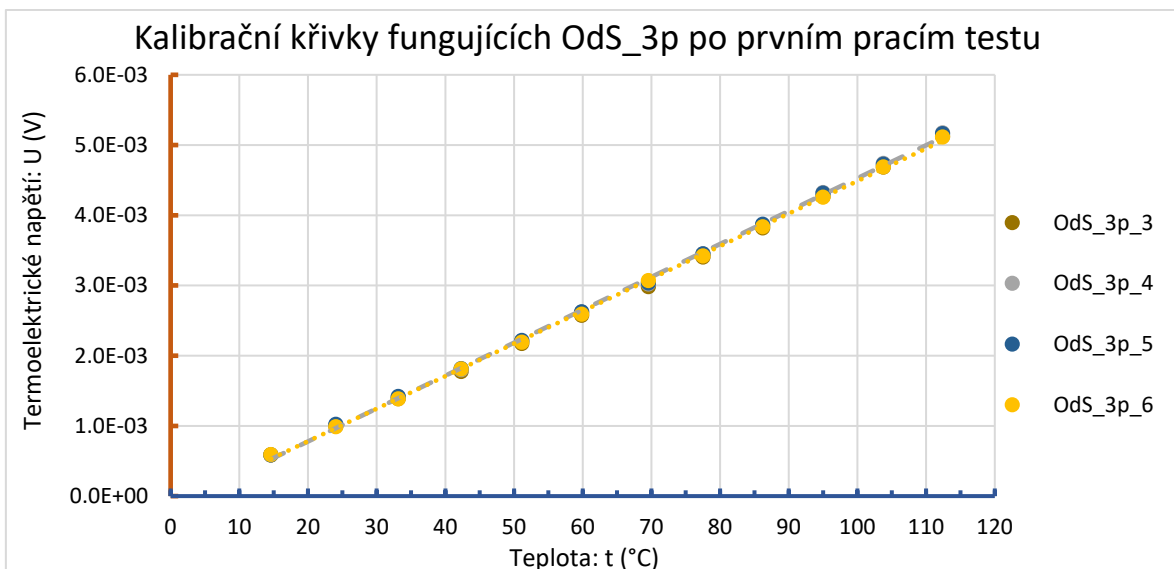
Graf 32: Kalibrační křivky fungujících OdS_3p po první kalibraci



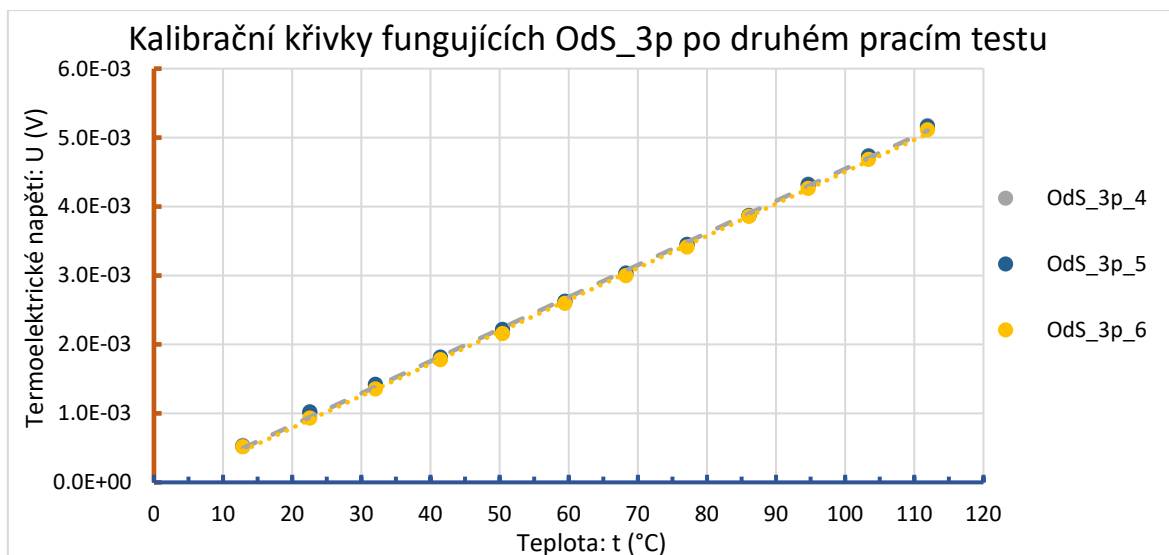
Graf 33: Kalibrační křivky fungujících OdS_3p po zrychleném stárnutí



Graf 34: Kalibrační křivky fungujících OdS_3p po ohybovém testu



Graf 35: Kalibrační křivky fungujících OdS_3p po prvním pracím testu



Graf 36: Kalibrační křivky fungujících OdS_3p po druhém pracím testu