

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kontaktování funkčních prvků ve smart textiliích

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KOPŘIVA**

Osobní číslo: **E15N0017P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Kontaktování funkčních prvků ve smart textiliích**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Prostudujte problematiku smart textilií.
2. Prostudujte problematiku dostupných metod a technik kontaktování funkčních prvků integrovaných do textilií a kriticky je zhodnoťte.
3. Navrhněte vhodný způsob kontaktování funkčního prvku integrovaného v textilii a realizujte demonstrátor.
4. Proveďte měření a testování realizovaného demonstrátoru, diskutujte dosažené výsledky a navrhněte další postup prací pro výzkum v této oblasti.

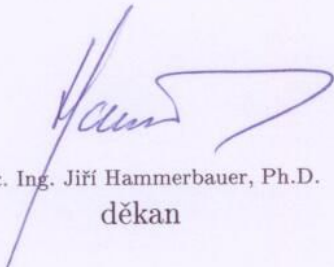


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Mattila, H., R., Intelligent Textiles and clothing, CRC Press, 2006.
ISBN-13: 978-0849390999
2. Schneegass, S., AmftSmart, O., Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction, Springer, 2017, ISBN 978-3-319-50123-9
3. K. Cherenack, L. Van Pieteron, Smart textiles: Challenges and opportunities, J. Appl. Phys. 112 (2012). doi:10.1063/1.4742728.
4. M. Catrysse, R. Puers, C. Hertleer, L. Van Langenhove, H. Van Egmond, D. Matthys, Towards the integration of textile sensors in a wireless monitoring suit, Sensors Actuators, A Phys. 114 (2004) 302-311.
doi:10.1016/j.sna.2003.10.071.

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

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017
Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


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




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

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce poskytuje přehled o problematice smart textilií a používaných materiálů v této oblasti. Podrobněji je práce zaměřena na metody kontaktování elektronických funkčních prvků. V praktické části je popsán návrh a realizace demonstrátoru, na kterém jsou otestovány vybrané metody kontaktování. Cílem testování bylo přijít na co nejspolehlivější metodu kontaktování vhodnou pro sériovou výrobu textilií.

Klíčová slova

Smart textilie, metody kontaktování, vodivá vlákna, vodivé materiály, kontaktní odpor, hybridní nitě

Abstract

The presented diploma thesis provides an overview of smart textiles and suitable materials for this field. The main aim of the thesis is interconnection of electronic function blocks in smart textiles. Design and execution is described in a practical part of this work. Test samples were tested by chosen methods described in theoretical part. The goal of this work is finding an optimal and reliable interconnection technique suitable for textile serial production.

Key words

Smart textiles, contacting methods, conductive yarn, conductive materials, contact resistance, hybrid threads

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 22.5.2018

Tomáš Kopřiva

Obsah

SEZNAM POŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	6
ÚVOD	7
1 SMART TEXTILIE.....	8
1.2 DĚLENÍ SMART TEXTILIÍ	11
1.2.1 Dělení smart textilií podle funkce	12
1.2.2 Dělení smart textilií podle stupně integrace	12
1.3 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY VE SMART TEXTILÍCH	13
1.3.1 Kovová vlákna.....	13
1.3.2 Vodivé polymery.....	15
1.3.3 Polymerní optická vlákna.....	15
1.3.4 Materiály měnící skupenství.....	16
1.3.5 Materiály s tvarovou pamětí	16
1.3.6 Vodivé inkousty	18
2 DOSTUPNÉ METODY KONTAKTOVÁNÍ	20
2.1 NEROZEBÍRATELNÉ KONTAKTOVACÍ METODY	22
2.1.1 Svařování	22
2.1.1 Pájení	24
2.1.2 Lepené spojení	25
2.1.3 Mechanické spojení.....	30
2.2 ROZEBÍRATELNÉ KONTAKTOVACÍ METODY	34
2.2.1 Suché zipy	34
2.2.2 Druky	34
2.2.3 Magnetické kontakty	35
2.2.4 Kapesní konektory.....	36
2.2.5 Speciální konektory.....	37
3 REALIZACE DEMONSTRÁTORU A VÝBĚR VHODNÝCH METOD PRO KONTAKTOVÁNÍ HYBRIDNÍCH NITÍ	40
3.1 REALIZACE TESTOVACÍCH VZORKŮ - DEMONSTRÁTORU	40
3.2 VÝBĚR VHODNÝCH METOD PRO KONTAKTOVÁNÍ HYBRIDNÍCH NITÍ	45
3.2.1 Kontaktování krimpů	46
3.2.2 Odporové svařování.....	47
3.2.3 Kontaktování drůtek.....	48
4 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ REALIZOVANÉHO DEMONSTRÁTORU	49
4.1 PŘÍPRAVA TESTOVACÍHO ÚSTROJÍ PRO TEST TEPELNÉHO CYKLOVÁNÍ	49
4.2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU PŘI TEPELNÉM CYKLOVÁNÍ.....	50
4.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ V TESTECH TEPELNÉHO CYKLOVÁNÍ.....	51
4.4 ČTYŘBODOVÉ MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ODPORU	57
4.5 VÝSLEDKY ČTYŘBODOVÝM MĚŘENÍM ODPORU	58
5 ZÁVĚR	61
SEZNAM LITERATURY	63
PŘÍLOHY	67

Seznam použitých symbolů a zkratk

POV.....	Polymerní optická vlákna
PCM.....	Phase Change Materials – Materiály měnící skupenství
SMM.....	Shape Memory Materials – Materiály s tvarovou pamětí
SMA.....	Shape Memory Alloys – Materiály s tvarovou pamětí na bázi slitin
NiTi.....	Nikl-titanium
SMP.....	Shape Memory Polymers – Polymery s tvarovou pamětí
LWAC.....	Litz Wire with Aramid-Core
ICA.....	Isotropic conductive adhesives - Izotropní vodivé lepidlo
Cu/Ag nit.....	Svazek postříbřených měděných vláken
TKR.....	Teplotní koeficient odporu
PES.....	Polyester

Úvod

Pojem smart textilií vznikl na základě vývoje speciálních vláken a jejich zakomponování do struktury textilie. Takováto struktura může mít schopnost snímat změny na základě vnějších podnětů (teplotních, světelných, smyslových, mechanických, chemických, atd.), popřípadě může reagovat na tyto změny, případně se jim i přizpůsobit[1].

Cílem práce je zmapování problematiky smart textilií a podání přehledu dostupných metod kontaktování textilních elektronických prvků. Dále výběr vhodných metod a jejich otestování na realizovaném demonstrátoru s následnou diskuzí výsledků.

Tato diplomová práce je rozdělena na část rešeršní a část praktickou. První část je zaměřena na rešerši k problematice smart textilií, jejich aplikace a materiálů využívaných v této oblasti. Dále se zaměřuje na přehled dostupných metod a technik kontaktování funkčních prvků integrovaných v textiliích a jejich následné zhodnocení.

Praktická část je zaměřena v první řadě na návrh demonstrátoru simulující vyšitý teplotní senzor, kde je hlavním cílem otestovat jeho stabilitu a kvalitu kontaktování a to i po testech tepelným cyklováním a zátěžových testech praním v automatické pračce. V druhé řadě se jedná o realizaci demonstrátoru vhodného pro čtyřbodové měření odporu, kde je hlavním cílem odhalit nejlepší metodu kontaktování s co nejnižší hodnotou kontaktního odporu a s malým rozptylem. U realizovaných testovacích vzorků budou porovnány hodnoty kontaktního odporu před a po testech praním v automatické pračce. V závěru práce budou diskutovány dosažené výsledky a budou doporučeny další postupy pro pokračování v této problematice.

1 Smart textilie

Vývoj smart textilní elektroniky se začal vyvíjet až v posledních dvou dekáдах a to od počátečních výzkumů až po průmyslově relevantní oblast. Zpočátku se jen elektrické vodiče a konvenční elektronické obvody připevňovaly na textilní produkty. Toto řešení ale nositeli takového systému nezajišťovalo příliš velký komfort. Časem se postupnými kroky začala rozvíjet vyšší míra integrace těchto prvků do textilií. Dnes již je přímo do struktury textilie implementováno vodivé propojení, senzory, aktuátory apod. Tento vyšší stupeň integrace zajišťuje tak mnohem větší komfort nositeli tohoto zařízení. V současné době se inteligentní oblečení se senzory používá pro aplikace jako monitorování životních funkcí, jak ve sportu, tak i oblasti zdravotnictví (snímání srdečního tepu, dýchání, únik tekutiny), nebo pro bezpečnostní systémy pro armádu a hasiče [2,5].

Jedna z definic smart textilií zní: „Smart textilie jsou materiály a struktury vnímající, popřípadě reagující na podněty v daném prostředí“. Na základě reakce jsou schopny ukázat velmi znatelnou změnu v jejich mechanických vlastnostech jako například změna tvaru, barvy a tuhosti a dalších vlastností tepelného, chemického, elektrického, magnetického a jiných charakterů[3].

Podle [17] TAO, Xiaoming, ed. *Handbook of Smart Textiles* jsou oba termíny „smart textilie“ a „inteligentní textilie“ (z anglického překladu: „smart textiles and intelligent textiles“) obě tyto terminologie zaměnitelné. V této práci však dále budu používat termín smart textilie. V současné době smart textilie zasahují svou problematikou do mnoha dalších aplikovaných věd a odvětví jako jsou například:

- Textilní chemie
- Technologie vláken
- Technologie zpracování oblečení
- Materiály
- Strukturální mechanika a letecká hydraulika
- Elektronika
- Telekomunikace
- Umělá inteligence
- Molekulová biologie a organická chemie
- Nanotechnologie a biotechnologie

- Informační technologie a další[1]

Dalším pojmem, se kterým se lze v této problematice setkat, jsou tzv. E-Textilie neboli elektronické textilie, reprezentující textilní substrát s integrovanými elektronickými prvky, které mohou plnit různé funkce. Pokud je textilie s vodivými strukturami spojena s elektronickými komponenty, (např. se senzorem) mohou tyto komponenty snímat změny v okolí a podat zpětnou vazbu v podobě například světla, zvuku, či radiových vln. U E-textilií je elektronika a její propojení integrovaná ve vlastní struktuře látky. Elektronické textilie jsou mnohem méně vidět, jak je znázorněno na obrázku 1.1, kde je porovnání současné nositelné elektroniky (a) a vyvíjené oděvní elektroniky pro budoucnost (b), která je reprezentována generací systémů snímající životní funkce člověka. Navíc nejsou náchylné na jakékoliv zachycení a roztrhnutí o okolní předměty. Elektronika je tedy integrována přímo do textilie a zahrnuje schopnosti, jako jsou snímání, komunikace (obvykle bezdrátovou), přeměna energie a vnitřní propojení systému[14].



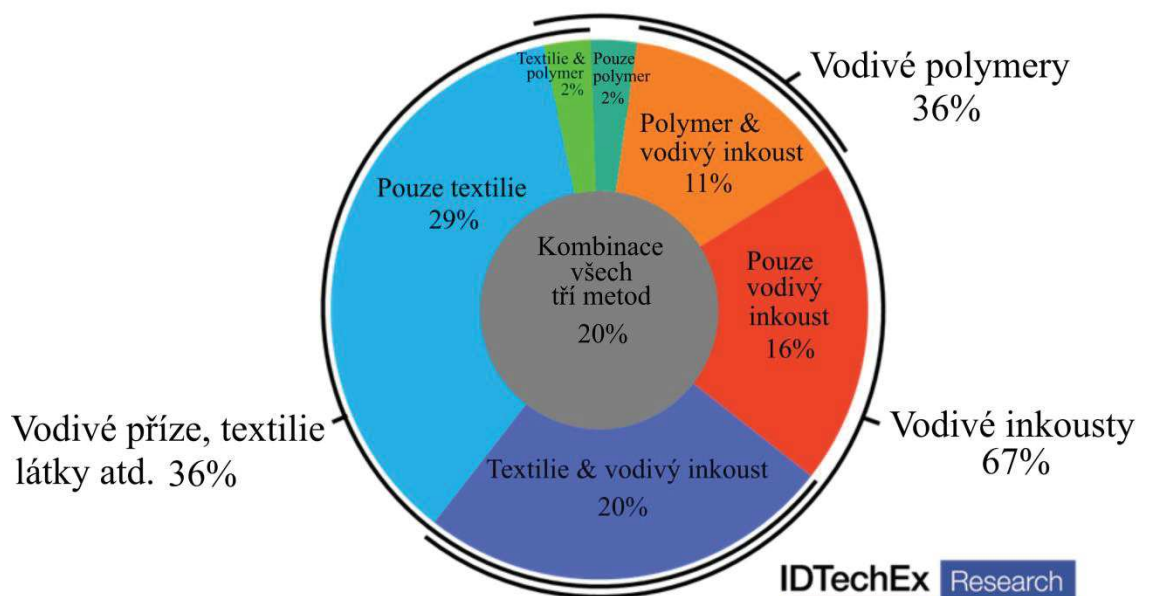
Obr. 1.1 -Smart textilie snímající životní funkce člověka, převzato z [14]

Definice E-textilií podle [15] zní: „E-textilie, známé také jako elektronické textilie nebo smart textilie, jsou látky, které umožňují digitálním zařízením (včetně malých počítačů) a elektronice být zakomponovány ve struktuře těchto látek.“

Důležité vlastnosti E-textilií:

- Flexibilita
- Velká snímaná oblast
- Vysoký stupeň integrace
- Žádné volné vodiče, kterými by mohl uživatel zachytit o okolní předměty
- Nižší cena vzhledem ke konvenčním řešením
- Mechanická odolnost
- Tepelná odolnost
- Elektrická odolnost [15]

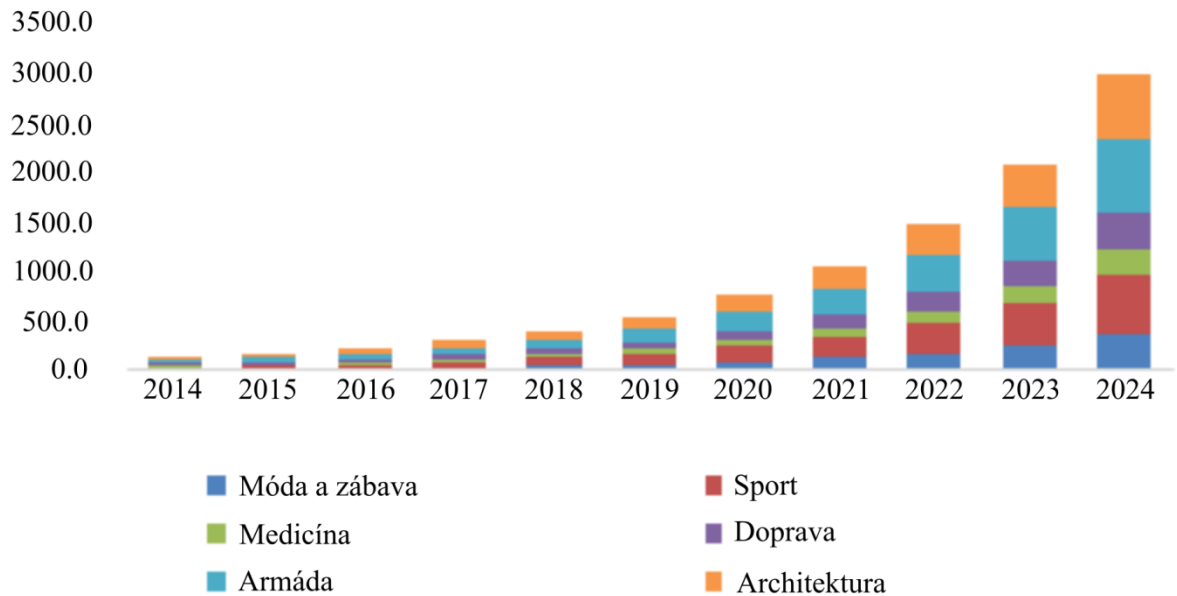
Ačkoli je v E-textiliích stále mnoho výzev, jako jsou dostatečný komfort, spolehlivost, výkon, odolnost proti pracím cyklům, schopnost natažení atd., jejich rozšíření napříč spektrem různých aplikací se pořád rozrůstá. Graf na obrázku 1.2 popisuje procentní rozložení jednotlivých typů E-textilií napříč trhem, kde bylo zohledněno výzkumem od IDTechEx více než 100 dodavatelů a výrobců těchto materiálů.



Obr. 1.2 – Rozdělení typů využívaných smart textilií, převzato z [19]

Trh se smart textiliemi se velice rychle rozrůstá a podle průzkumu AmeriResearch Inc.[20] bude růst o 33 % každým rokem od roku 2017 do roku 2024. Hodnota trhu se smart textiliemi činila celosvětově podle [20] 674,8 milionů amerických dolarů. Podle [21] činila

hodnota 544,7 milionů dolarů. Předpokládaný průběh růstu objemu trhu se smart textiliemi popisuje následující graf. V grafu na obrázku 1.3 je popsáno rozložení trhu podle využití smart textilií v jednotlivých odvětvích. Na ose x je uvedena hodnota trhu v tisících amerických dolarů a osa y reprezentuje jednotlivé roky vývoje.



Obr. 1.3 – Vývoj a předpoklad pro vývoj hodnoty evropského trhu se smart textiliemi, převzato z [19]

Umístění hodnoty evropského trhu se řadí na třetí místo hned za Asií a na prvním místě je Severní Amerika. Na posledních místech jsou Střední Východ a Latinská Amerika. Toto pořadí vychází z výzkumu podle [20], kde byly analyzovány roky 2014, 2015 a jako základna rok 2016. Na základě těchto let, byla vytvořena předpověď až do roku 2024.

1.2 Dělení smart textilií

Nejčastější dělení smart textilií je podle jejich funkce do tří generací. Příklad dalšího dělení může být podle stupně jejich integrace, kde se dělí do čtyř úrovní integrace.

1.2.1 Dělení smart textilií podle funkce

První generace

Smart textilie první generace jsou pasivní technologií a jsou pouze citlivé na vnější podněty a indikují změny (vjem). Sem patří celá řada textilií, které fungují jako čidla a indikátory stavu okolí. Příkladem jsou textilie měnící barvu v závislosti na teplotě (chameleonní) a optická vlákna, která nejen přenášejí světelný signál, ale jsou citlivá na deformaci, koncentraci chemikálií, tlak, zrychlení, elektrický proud, magnetické pole a další[5].

Druhá generace

Zde se již jedná o aktivní textilie nebo systém, které jsou schopné nejen identifikovat změnu vnějšího podnětu, ale také na tuto změnu reagovat způsobem vedoucím k jejich pasivaci (vjem a reakce). Příkladem jsou teplo regulující textilie (schopné uložení, resp. uvolnění tepelné energie podle změn teploty okolí), textilie s tvarovou pamětí (s reverzibilními změnami tvaru při ohřevu, resp. chlazení), textilie s variabilní prodyšností a propustností pro vodní páry a textilie stabilizující teplotu. V této generaci nachází uplatnění chromatické materiály, materiály s tvarovou pamětí, materiály které mění skupenství, gely a membrány a další[5].

Třetí generace

Velmi inteligentní textilie nebo systém, který může vykonat trojí funkci. Textilie třetí generace mohou snímat, reagovat a pak se i přizpůsobit daným změnám. Tyto systémy obvykle obsahují řídicí jednotku, která funguje jako mozek systému. Jedná se o systém se schopností rozpoznávací, vyhodnocovací a reagující na podnět v daném prostředí prostřednictvím akčních členů. Tato generace systému je používána například v oblecích do vesmíru, oblečení s tepelnou regulací nebo ve zdravotnictví pro snímání zdravotního stavu[3,4,6].

1.2.2 Dělení smart textilií podle stupně integrace

První úroveň (odnímatelné)

Elektronické zařízení je připevněno na textilii s možností odejmutí bez zničení produktu. Připevnění se realizuje například pomocí druků, suchého nebo jezdcového zipu, kapsového konektoru atd. [26].

Druhá úroveň (přípevněné)

Elektronické zařízení je přípevněno na textilii bez možnosti jeho odejmutí. Pokud by došlo k odejmutí tohoto zařízení, došlo by ke zničení produktu. Jedná se o přípevnění zařízení k textilii technikami, jako jsou sváření, přišití, lepení, tisk atd. [26].

Třetí úroveň (kombinace)

Elektronické zařízení skládající se z jednoho či více komponent, buď integrovaných v textilii nebo kombinací integrace do textilie s permanentním nebo odnímatelným připojením elektronických komponent (LED připojená za pomoci vetkané vodivé cesty do textilie) [26].

Čtvrtá úroveň (plně textilní řešení)

Všechny komponenty elektronického zařízení jsou integrovány do textilie, viz obr. 1.1 [24, 26].

1.3 Používané materiály ve smart textiliích

Materiály využívané ve smart textiliích mají schopnost snímání, komunikace a spolupráce. Pro senzory a vzájemné propojení textilií se používá celá řada materiálů, jako jsou například – polymerní nebo vodivé příze s uhlíkovým stíněním, dále také vodivé pryže a vodivé inkousty. Vodivé příze a vlákna jsou vyráběny slitinami čistých kovů nebo přírodních vláken s přidaným vodivým materiálem. Materiály jako jsou ocel, optická vlákna, vodivé polymery mohou být integrovány přímo do struktury textilie a zajistit tak elektrickou vodivost, snímat a také zajistit přenos dat [7].

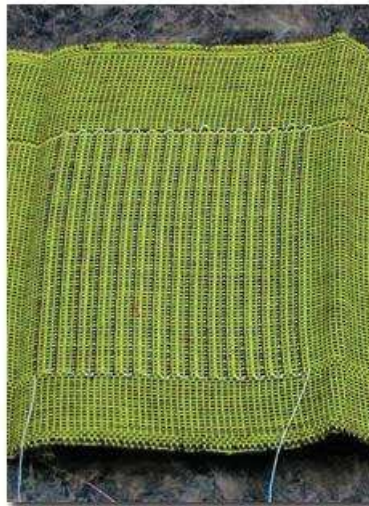
V současné době je stále problém, že většina využívaných senzorů v nošených E-textiliích je z neohebných, tvrdých materiálů, které mohou omezovat přirozených pohyb člověka, ale také přesnost nashromážděných dat. Proto je nezbytné se smart textiliemi stále zacházet se značnou opatrností, jelikož obsahují křehké a lámavé materiály, na kterých závisí funkčnost celého systému [16].

1.3.1 Kovová vlákna

Kovová vlákna mohou mít pro různé aplikace různé úpravy jejich výroby. Mimo samostatné kovové vlákno se také používají kovová vlákna potažená plasty, plasty ovrstvené kovy nebo různé povrchové úpravy. Svoje místo ve smart textiliích mají kovy díky jejich mechanickým

vlastnostem, elektrické vodivosti a relativně nízké ceně. Velké využití nacházejí ve formě tenkých drátků, ale jejich zakomponování do textilních struktur je limitováno vzhledem k jejich velké plastické deformaci[21].

Kovová vlákna do velikosti průřezu 100 μm se vyrábějí technikou tažení, buď za studena, nebo za tepla. Pro velmi tenká vlákna (průřez okolo 10 μm) se používá tzv. Taylorův proces. „Princip je obalení silnějšího drátku vhodným sklem a protahováním za teplot, kdy je sklo změkklé a kov uvnitř buď plastický, nebo roztavený. Jako vhodné se používá borosilikátové sklo typu Pyrex. Tímto způsobem lze vyrobit drátky řádově 10 μm silné. Na podobném principu je založeno tzv. svazkové protahování“ [21]. V aplikacích pro textilie se v současné době využívají pro vodivé propojení kovová vlákna, potažená izolační vrstvou nebo hybridní přízi s jádrem tvořeného kovovým vláknem. Jako perspektivní řešení se ukázalo ovrstvení kovového jádra polyamidem nebo polyesterem. Taková vlákna byla vynalezena společností EY Technologies, Fall River, Massa a nazývají se iCON mikrofilament, ukázané na obrázku 1.4[22]. Jako vodivé vlákno se používá slitina stříbra a india tak, aby bylo docíleno co největší vodivosti a co nejmenší teploty tání. Elektrická vodivost dosahuje přibližně 25% vodivosti mědi, což je v těchto aplikacích plně dostačující. Obal vodivého jádra zajišťuje snadnou údržbu a barvitelnost.



Obr. 1.4 – Ukázka iCON mikrofilament vetkaného v textilií, převzato z [22]

Takovéto vlákna je možné zpracovávat běžnými technikami, jako je tkaní a pletení a pro jejich jemnost je lze využít jako šicí nitě. Dále se v aplikacích pro konfekci může využít textilních pásků s implementovaným vodivým vláknem. Příkladem takovéto aplikace může být kombinace drátku tinsel s polyesterovými přízemi, kde tinsel je ovíjená příze, kde se jádro z textilních vláken ovíjí několika vrstvami tenkých měděných folií (možné použití kombinace

se stříbrem, kadmíem a cínem). Výsledkem je velmi ohebná struktura[5].

1.3.2 Vodivé polymery

Vodivé polymery jsou tvořeny spřaženým systémem vazeb s π -elektrony. Vodivost je zajištěna buď za pomoci oxidačních, nebo redukčních látek jako např. AsF₅. Po dopování dojde ke změně pásové struktury a zvýšení vodivosti alespoň na hodnotu anorganických polovodičů[5,17].

Vodivé polymery jsou v principu netavitelné a mají vysokou mřížkovou energii a vysoké povrchové napětí. Jejich vodivá forma je tvořena kationovými soli silně konjugovaných polymerů. Tyto soli se připravují elektrochemickou oxidací a elektrochemickou polymerizací nebo chemickou oxidací. Možné je vytvořit aniontové soli, ale nejedná se o tak stabilní vazbu. Na trhu je v současné době známo více než 100 polymerů s různou elektrickou vodivostí a určité množství se dá „zvlákňovat“, a mohou být využity v textilních strukturách jako ochranné prvky, flexibilní elektronické součásti, senzory. Zástupce této skupiny tvoří polyacetylen, polyanilin, polythiofen, polypfenylsulfid a polypyrrol. Tyto materiály se používají ve speciálních oděvních a technických textiliích, kde je účelem nahradit kovy, ale také jiné materiály pomocí flexibilních (textilních) struktur. Jedná se o aplikace jako například tzv. soft počítače, nositelná elektronika, senzory, bariéry proti elektro-smogu, elektromagnetické odstínění, odporové vytápění atd. [5,17].

Velkou výhodou polymerů je, že jejich vodivost je závislá na jejich dopování a lze tedy měnit. Pro většinu polymerů platí, že závislost vodivosti na teplotě vychází z této úměry: logaritmus vodivosti $\ln E\sigma$ je přímo úměrný teplotě, umocněné na -0,25, tedy $\ln E\sigma \sim T^{-1/4}$. Liší se tedy svou závislostí vodivosti na teplotě od kovů, kde se vodivost úměrně snižuje se zvyšováním teploty i od polovodičů, kde se vodivost exponenciálně zvětšuje s nárůstem tepla[5,17]. Tyto materiály mají výborné vyhlídky pro nové textilní technologie, známé jako E-textilie kvůli jejich vlastnostem jako, jak již zmíněná elektrická vodivost, tak dobré mechanické vlastnosti a jejich elektro-chemická aktivita[17].

1.3.3 Polymerní optická vlákna

Polymerní optická vlákna (POV) pro smart textilie jsou vyrobena z polymerních materiálů. Nejčastěji se s nimi měří veličiny typu – tlak, deformace, teplota, nebo index lomu. Výhody polymerních optických vláken jsou – lehkost, ohebnost, neprodukují teplo, stabilita a jejich imunita proti elektromagnetickému ovlivňování a elektrickým výbojům. Navíc jsou šetrnější

k životnímu prostředí než skleněná vlákna a také bezpečnější [17,18]. POV se dají využít v aplikacích typu – přenos světla pro optické snímání, detekce deformace látky zapříčiněné tlakem nebo natažením, kombinace optického vlákna jako senzoru v kombinaci s chromatickými materiály, kde vlákno snímá změnu barvy, způsobenou měřeným podnětem. Dalším příkladem z hlediska chemického snímání může být snímání potu s využitím barviva reagujícího na změnu pH[7,18]. Komerčně dostupným produktem je například vlákno od společnosti Luminex ®fabric, kde se jedná o textili s vetkaným POV, která se může použít v ochranných vestách a potencionálně i pro přenos dat[7].

1.3.4 Materiály měnící skupenství

Change Materials (PCM) jak se tyto materiály nazývají v anglickém jazyce, jsou materiály, potencionální k uchování tepelné energie. V dnešní době jsou PCM bohatě aplikovány v oděvních textiliích jako například spodní prádlo, ponožky, boty, šaty. Své uplatnění nacházejí také v ložním prádle nebo u spacích pytlů ale také v řadě speciálních aplikací, jako například neprůstřelné vesty ale i v automobilovém průmyslu a ve zdravotnictví a dalších. Pro správnou aplikaci PCM v textiliích musí být pracovní teplota v rozmezí teploty lidského těla. Textilní materiály s PCM se pak dají použít jako ochranné textilie proti extrémním klimatickým podmínkám, a to v podobě jak vysoké, tak nízké teploty. Když teplota vzroste a dosáhne bodu tání PCM, roztátý PCM absorbuje teplo, což způsobí zpomalení toku tepelné energie textilií a udrží tuto teplotu. Jakmile se PCM vrátí kvůli okolním podmínkám opět do pevného skupenství, odevzdá materiál svou absorbovanou energii zpět a vyzáří teplo[7,9]. Příklady PCM materiálů jsou například parafínové vosky, mastné kyseliny, organické a anorganické sloučeniny atd. Nejčastější změna skupenství pro PCM je z kapalného stavu do stavu pevného a zpět, v předem určených podmínkách. Samozřejmě ale mohou být použity i další změny skupenství, jako z kapalného do plynného, z pevného do kapalného a také z pevného do pevného skupenství [8,9].

1.3.5 Materiály s tvarovou pamětí

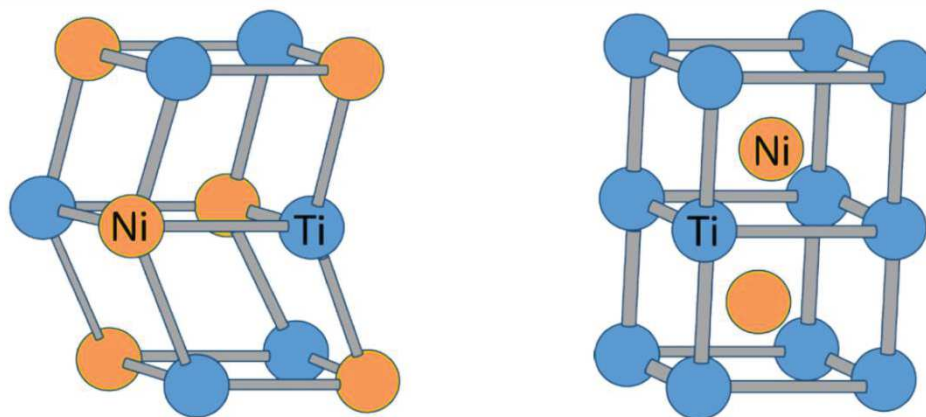
Materiály s tvarovou pamětí z anglického Shape Memory Materials (SMM). Tyto materiály jsou schopné vrátit se do původního stavu po jejich deformaci, po jejich vystavení určitým podnětům. Podněty mohou být tepelného, mechanického, magnetického nebo elektrického rázu. Nejčastěji se jedná o slitiny nebo polymery, ale může se jednat také o materiály na bázi gelů, keramiky, skla. Kromě vlastnosti pamatovat si tvar, mají některé tyto materiály i další

užitečné vlastnosti, jako je například elasticita, vysoká kapacita absorpce mechanické energie, která je následně přeměněna na teplo[9,10].

Oblečení se zabudovaným vláknem s tvarovou pamětí mohou použity jako samo adaptivní textilie se samo se regulující strukturou, která může pružně reagovat na změny klimatu. Příklady využití jsou: voděodolnost, větruodolnost a prodyšnost[7].

Materiály s tvarovou pamětí na bázi slitin

Z anglického Shape Memory Alloys (SMA), jsou materiály, které umí přeměnit tepelnou energii na mechanický pohyb[10]. Jejich hlavní vlastností je takzvaná tvarová paměť, kde se nejprve nastaví slitina do požadovaného tvaru ve kterém je potřeba ji zafixovat. Následně je potřeba slitinu zahřát na určitou teplotu po určitou dobu např. 500 °C po dobu 15 min. Slitina po následném ochlazení mění tvar a po zahřátí nad určitou charakteristickou teplotu se tvar materiálu vrátí do předem zapamatovaného tvaru[26]. U SMA se vyskytují dvě strukturní fáze, austenit a martenzit, jejichž struktura je zobrazena na obrázku 1.5. Austenit je struktura, kterou látka zaujímá při vyšších teplotách a má velmi symetrickou kubickou mřížku. Zatímco martenzit vzniká za nižších teplot a jeho kubická mřížka má značně nižší symetrii.



Obr. 1.5 – *Uspořádání atomů v martenzitické (vlevo) a austenitické (vpravo) struktuře slitiny NiTi, překresleno z [27]*

Hlavními představiteli této skupiny jsou především slitiny **Nikl-titanium (NiTi)** a slitiny na bázi mědi jmenovitě - **Cu,Al, Ni** a **Cu,Zn a Al**, tyto tři zástupce označuje HUANG, W.M. a spol. [12] za jediné tři relevantní zástupce pro komerční využití, popřípadě uvádí také slitiny na bázi železa. První volbou je díky svým vlastnostem jednoznačně slitina NiTi, která zajišťuje zdraví nezávadnost a nachází velké uplatnění v biomedicině. Slitiny NiTi mohou být

snadno vyrobeny v různých tvarech a velikostech, což je také jejich velká výhoda. Dají se vyrobit ve formě tenkých filmů, vláken, částic a dalších. Zástupci na bázi mědi mají zase výhodu v nižší ceně a v jednoduchosti zpracování. Slitiny na bázi železa slouží v úplném minimu aplikací, dají se využít například jako upevňovací prvek typu – svorky a to pouze jednorázové, ale své využití najdou kvůli jejich velmi nízké ceně[12]. V posledních letech se však dostal do popředí ještě jeden zástupce polykrystalické slitiny železa, který má velmi zajímavé vlastnosti pro použití v senzorech. Patří mezi ně například elasticita, která dosahuje až 13%, což je téměř dvakrát tolik co má NiTi, dále velká kapacita absorpce mechanické energie, tahová síla – více než 1 GPa a další[13]. V porovnání SMA a SMP jsou při změně tvaru SMA natolik silné, že dokážou zvednout váhu lidského těla[10].

Materiály s tvarovou pamětí na bázi polymerů

Tyto materiály mají zkratku SMP z anglického Shape Memory Polymers. SMP mají oproti SMA velmi dobrou zpracovatelnost a jejich cena a cena zpracování je velmi nízká, nižší hmotnost, větší roztažnost a kompatibilitu s textiliemi a také různá barevná provedení [7,12]. Dále disponují vlastnostmi jako je větší zpětná deformace a k návratu do původního tvaru může být cyklus spuštěn různými podněty jako je UV a infra záření, tepelné záření, elektrické a magnetické pole, dále chemické podněty jako změna pH, detekce vlhkosti nebo rozpouštědla a navíc dokážou reagovat na více podnětů současně. Další výhody těchto materiálu jsou, že některé ze SMP jsou přirozeně zdraví nezávadné a ekologické[11,12]. SMP mohou být použity do textilní struktury jako roztok, film, vlákno, pěna a další.

V současné době mají SMP největší potenciální využití v oblasti, kde textilie reaguje na změny teploty a vlhkosti a zajistit tak co největší komfort jejich nositelů. Příklady aplikací, kde se SMP využívají, jsou například textilní displeje, snímání úniku tekutiny, snímání zranění, textilie se samočisticí vlastností, textilie s regulací teploty atd. [23].

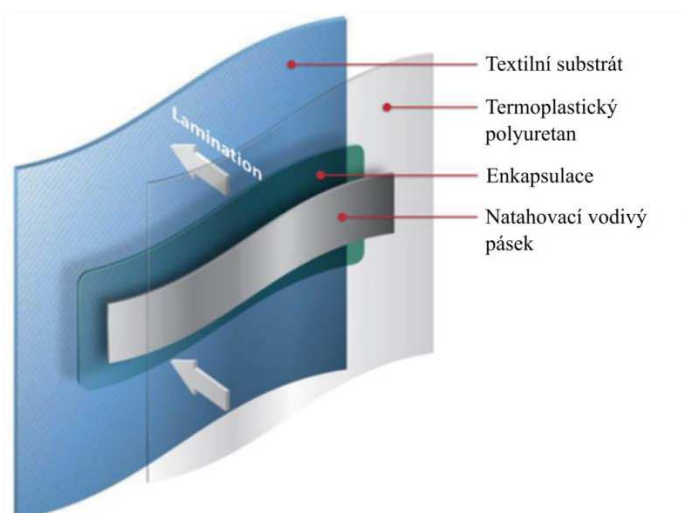


Obr. 1.6 – Ukázka materiálu s tvarovou pamětí reagující na změnu teplot, převzato z [26]

1.3.6 Vodivé inkousty

Vodivé inkousty tvoří velmi zajímavou oblast nanášení elektrických obvodů a propojení

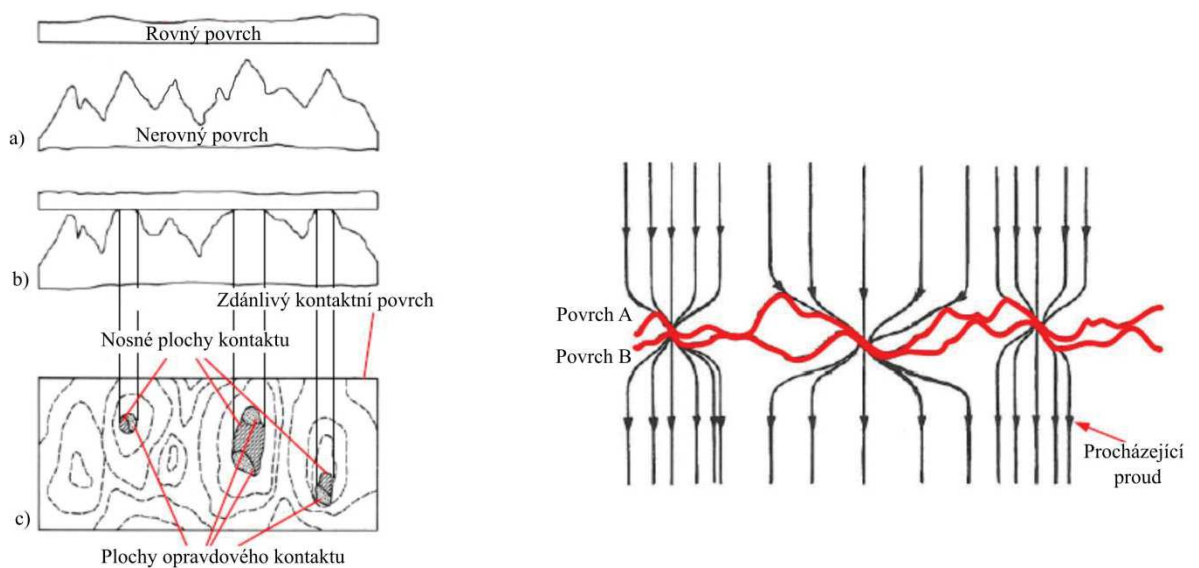
pomocí tisku. Řadí se mezi nejšetrnější vodivou úpravu v odvětví chytrých textilií a pomocí této technologie lze vytvářet i složité elektronické obvody. Tato technologie má však svá úskalí, týkající se zejména vodivosti inkoustů při natažení textilie, popřípadě při odstředování u pracích cyklů vznikají nejprve mikrotrhliny a následně může dojít k úplnému přerušení vodivého spojení. Vodivá složka je tvořena částicemi vodivých materiálů, jako jsou stříbro, měď, zlato atd. podle typu aplikace. Pro zajištění flexibility inkoustu a dalších vlastností pro mechanickou odolnost (přilnavost k textilnímu substrátu, odolnost proti oxidaci a oděru atd.) se přidává do inkoustu polymerní matrice, která ale snižuje vodivost daného inkoustu. V posledních letech byly vyvinuty již takové vodivé inkousty, které při natažení textilie sniží svou vodivost na dostatečnou hodnotu pro funkčnost daného systému. Příkladem může být vodivý inkoust vyvinutý pod vedením profesora Takaa Someyana z Tokijské univerzity, který obsahuje tři hlavní složky. Jsou jimi stříbrné vločky, fluorizovaný kaučuk a fluorové smáčedlo. Smáčedlo snižuje povrchové napětí a řídí tvorbu povrchově lokalizovaných vodivých sítí stříbrných vloček v tištěném vodiči, který má vysokou vodivost a roztažitelnost[23,24]. Společnost DuPont přišla v roce 2014 se zajímavým řešením, kde je inkoust nanesen na termoplastický Polyuretan a v tomto místě je připevněn například senzor, jako je tomu na obrázku 1.7. Následně se tato část přetiskne enkapsulantem s označením PE772, který byl vyvinut přímo pro oděvní elektroniku. Použití vodivého inkoustu v takovémto provedení je schopno odolat až 100 pracím cyklům a zajišťuje stabilní kontakt při opětovném mechanickém namáhání [28]. Nevýhodou tohoto řešení je jeho neprodyšnost[28].



Obr. 1.7 – *Tištěná elektronika od firmy DuPont natištěná na textil, převzato z [28]*
V oblasti smart textilií je využíváno mnoho dalších typů materiálů, které jsou již nad rámec zadání této práce.

2 Dostupné metody kontaktování

Na začátek bude nejprve popsán elektrický kontakt z fyzikálního hlediska, a čím je ovlivněn kontaktní odpor. Podmínkou elektrického kontaktu jsou vzájemně se dotýkající elektricky vodivé komponenty. Z fyzikálního pohledu nejsou povrchy pevných látek nikdy dokonale rovné. V malém měřítku je povrch vždy nepatrně zakřiven a dále povrch není nikdy dokonale čistý. Nerovnosti a nečistoty zapříčiňují, že ke kontaktu dochází vždy pouze v určitých bodech. Zde dochází k rozdělení kontaktu do tří oblastí: zdánlivý kontakt (A_z), nosná část kontaktu (A_n), skutečný kontakt (A_s). Princip je ilustrován na obrázku 2.1 vlevo.

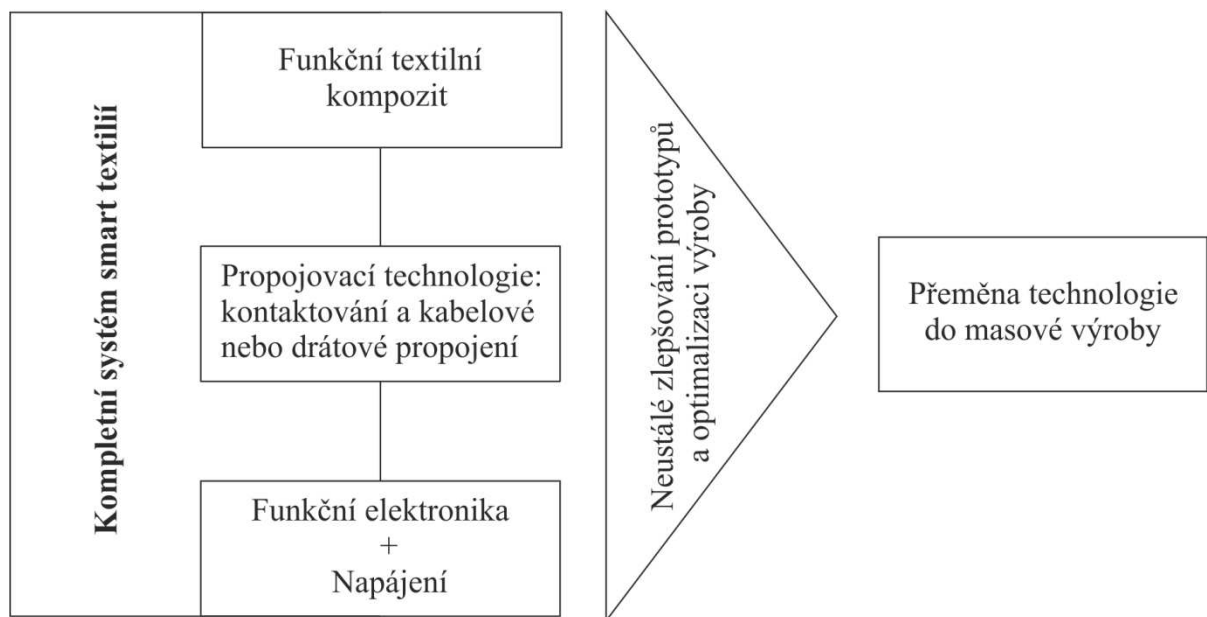


Obr. 2.1 – Teorie kontaktního odporu, převzato z [44]

V okolí jednotlivých skutečných míst kontaktu dochází k zužování proudu, procházejícím kontaktem zobrazeno na obrázku 2.1 vpravo. Čím tedy méně bude skutečných kontaktních míst, tím vyšší bude odpor daného kontaktu. Snaha je zajistit v propojeních co nejvíce těchto skutečných kontaktů, jedná se o tzv. mnohonásobné kontakty z anglického – multiple joints contact.

Smart textilie mohou být obecně popsány jako komplexní systém skládající se ze dvou základních elementů. Jedná se o funkční textilní komponenty (senzory) a elektronické periferie (aktuátory, napájení, řídicí jednotka atd.). Pro správnou funkci systému musí být všechny tyto komponenty a periferie elektricky propojeny (mezi sebou, popřípadě s řídicí jednotkou), aby mohly reagovat na podněty a změny v okolí a případně se přizpůsobit. Právě kontaktování, které tvoří klíčovou část celého systému, jelikož spojuje oba kritické elementy,

a to komponenty smart textilie a elektronické periferie. Obrázek 2.2 poukazuje na nepostradatelnost propojovací technologie pro systémy smart textilií a proto je propojovací technologie přímo uprostřed blokového schéma. V uplynulých letech se výzkum zaměřoval spíše na zdokonalení textilních komponent a periférií použitých ve smart textiliích ale nyní je však velkou výzvou zdokonalení právě propojení jednotlivých prvků celého systému, kterým je zajištěn nepřetržitý elektrický kontakt. Tento kontakt určuje spolehlivost celého systému a jsou na něj kladeny velké nároky, protože se jedná o kontaktování v textiliích, musí vydržet opakované ohýbání, co nejvíce pracích cyklů a další mechanické a elektrické namáhání.



Obr. 2.2 – Pozice propojovací technologie ve vývoji smart textilií

V současné době je poměrně mnoho možností jak zajistit funkční a efektivní kontakt mezi textilií (resp. textilní elektroniky) a elektronickou částí daného systému. Tyto možnosti se většinou odvíjí od dané aplikace využití celého systému a použitý řešení kontaktu často bývá kompromisem použitých materiálů, technologie výroby textilií a aplikace daného systému. Stále je určité množství kontaktovacích metod, které nejsou připravené pro jeden z nejkritičtějších aspektů, pro sériovou výrobu, s čímž je úzce spjatá následná automatizace procesů.

V následujících částech (2.1 a 2.2) bude popsáno rozdělení kontaktovacích metod na **rozebíratelné** a **nerozebíratelné** metody kontaktování.

2.1 Nerozebíratelné kontaktovací metody

Nerozebíratelné kontakty se nedají rozpojit bez poškození daného propojení. V následujících kapitolách budou popsány metody kontaktování elektroniky a textilu jako například sváření, pájení, mechanické spojování, spojování za pomoci lepidel a spojování s použitím šicích technik atd.

2.1.1 Svařování

Svařování nebo sváření je proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více součástí. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. Tato technologie se běžně používá pro spojování kovových materiálů. V posledních letech však začala tato technologie postupovat i do odvětví v kontaktování smart textilií, kde se jedná zejména o metody **odporového svařování** a **ultrazvukového svařování**. Při použití svařování je třeba dbát na teplotu, při které spojované materiály tají, z důvodu poškození okolní textilie, která nemá zpravidla takovou odolnost proti tepelnému poškození[2].

Ke svařování materiálů jako jsou například zlato, stříbro a měď je zapotřebí teplot okolo 1000 °C. Využit těchto teplot by bylo v odvětví kontaktování elektroniky k textiliím velice problematické. Lokálním zvýšením tlaku ovšem lze snížit teplotu tání použitých materiálů (snížení teploty tání u kovů až na úroveň – 300°C). Tato kombinace zvýšeného tlaku a teploty se nazývá termo-kompresní spojování[2]. Při použití ultrazvukových vibrací lze potřebnou teplotu tání snížit až na teplotu pokojovou. Například v drátovém propojení integrovaných obvodů se využívá kombinace ultrazvukového spojování a termo-kompresie při teplotě okolo 100 °C[38]. Vzhledem ke sníženým teplotám procesu svařování je možné jeho využití i v oděvním průmyslu [39] a dochází ke snížení rizika vzplanutí nebo propálení textilie v okolí kontaktu[2].

Odporové svařování

Elektrické odporové svařování je svařování tlakové, tzn. pro vznik svaru, se působí tlakem nebo tlakem a teplem. Nejdůležitější fyzikální veličinou při tomto způsobu svařování je elektrický odpor. Podstatou elektrického odporového svařování je skutečnost, že při průchodu elektrického proudu vodičem se zvyšuje jeho teplota. Teplo potřebné pro svařování

se tedy vytváří elektrickým proudem s využitím změny elektrického odporu ve svařované oblasti [48]. Množství vznikajícího tepla se stanovuje podle Joule-Lenzova zákona (1):

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (\text{J}) \quad (1)$$

kde I ... protékající proud (A), R ... elektrický odpor (Ω), t ... doba průtoku proudu (s) [49].

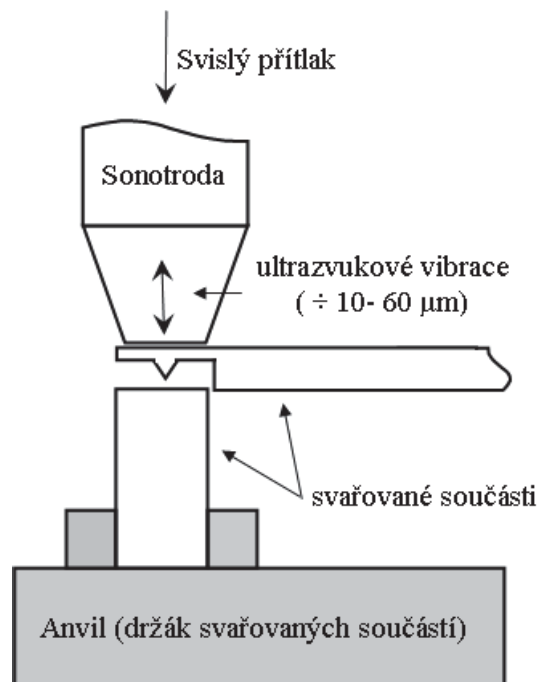
Čím větší odpor materiálu vodiče, tím větší nárůst teploty vodiče. Elektrický proud se do svařovaných částí přivádí elektrodami, které mají velmi dobrou elektrickou vodivost (jsou vyrobeny ze speciálních slitin mědi). Svařované části jsou z oceli a mají tedy mnohem vyšší elektrický odpor, čímž dochází k ohřevu stykových ploch svařovaných částí. Elektrody zároveň přitlačují stykové plochy k sobě[48].

Ultrazvukové svařování

V současné době se tato technologie běžně používá ke svařování téměř veškerých plastů i kovů. Ultrazvukové svařování je průmyslová technika, kde se dva kusy materiálu spojí dohromady skrze vysoko-frekvenční akustická chvění. Akustická energie je přeměněna na tepelnou energii třením a části jsou spojeny prakticky okamžitě [46].

Největšími přednostmi ultrazvukového sváření jsou vysoká rychlost (desetiny, maximálně jednotky sekund), čistota a kompaktnost (zařízení zabírá málo místa a nepotřebuje speciálně upravené pracovní místo, lze jej umístit kdekoli ve výrobní hale), nenáročnost na připojení (běžné napájení 230 V a přívod tlakového vzduchu), prakticky žádná údržba a to, že nevyžaduje žádný spotřební materiál, jako pájky apod. Velkou předností je rovněž vysoká životnost nástrojů, zpravidla statisíce svarů. Ultrazvukové svařování je také jedinečné v tom, že nejsou třeba žádné šrouby, spojky, hřebíky, pájecí materiály, nebo jiná adheziva nutná ke spojení dvou součástí [46]. U kontaktování ve smart textiliích se používá ultrazvukové sváření na bázi svařování plastů, kde se spoj vytváří kolmým působením ultrazvukových kmitů na rovinu spoje při současném působení přítláčivé síly, viz obrázek 2.3. Působením tepla, které vzniká třením na styčných plochách (kontakt představující akustický odpor) nebo absorpcí ultrazvukové energie v materiálech na místě sváru, dochází nejdříve ke změknutí a potom tavení (a tím vzájemnému promíchání styčných materiálů), až vznikne v místě pevná vazba. Přítláčivá síla se nechává působit ještě po ukončení ultrazvukových kmitů, aby spoj přešel z plastického do tuhého stavu. Celkový svařovací čas je krátký i při uvážení obou dvou operací, obvykle nepřesahuje 2 až 3 s [50]. Při svařování například drátků se pak nepoužívají vibrace v kolmém směru, ale ve směru vodorovném, kde se energie pomocí elektrod přenáší

mnohem efektivněji. Toto však není možné pro použití svařování textilních vodivých nití, protože by mohlo docházet k jejich potrhání.



Obr. 2.3 – Uspořádání pro ultrazvukové svařování plastických materiálů, převzato z [50]

2.1.1 Pájení

Pájení je proces, při kterém jsou dvě nebo více elektricky vodivých částí spojovány přídatným materiálem – roztaveným kovem (pájkou). Ke spojení dojde oboustrannou difúzí atomů pájky do materiálu spojovaných částí. Spoj zajišťuje intermetalická vrstva, která vzniká na hranici spojovaného materiálu a pájky při teplotě nižší, než je teplota tavení spojovaných materiálů. Výsledkem procesu pájení je vznik pájeného spoje s požadovanými vlastnostmi. Jestliže nejsou při pájení dodrženy požadované podmínky procesu v příslušných mezích, je jakost pájeného spoje nízká, což zapříčiňuje snížení nejen spolehlivosti funkce spoje, ale i celého systému [45].

Kvůli již zmiňované citlivosti textilií na vysoké teploty je využíváno výhradně měkké pájení, kde jako zástupce můžeme uvést například materiálová slitina cínu a olova, ale kvůli zdraví škodlivým účinkům se využívají jiné materiály, například slitiny cínu, stříbra a mědi. Takové pájení je realizováno při teplotách zejména nad 200 °C, ale existují i metody nízkoteplotního pájení s teplotou tavení pájky okolo 50 °C [40], kde jako příklad můžeme uvést slitinu cínu a india v poměru 52 % india, u takové slitiny je bod tavení 120 °C s rezistivitou $14,7 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ [41]. Jednou z podmínek pevného a těsného spojení pájením je dobrá

smáčivost základního materiálu roztavenou pájkou, která je (kromě na metalurgických vlastnostech) závislá na čistotě povrchu při teplotě pájení. Potřebná čistota se dosahuje při pájení v běžné atmosféře použitím tzv. tavidel (kyselina solná nebo fosforečná – nutné očistit spoj po pájení, kalafuna), nebo pájením v prostředí, které povrchové vrstvy brání dobrému smáčení odstraňují, jako jsou např. vysoké vakuum, redukční plynná atmosféra, solná lázeň [47]. Pájení jako takové však není příliš kompatibilní metoda do budoucna pro smart textilie, z důvodu používání poměrně vysokých teplot a pro kvalitní spoje je nutnost použití tavidel, které narušují kontakt a také strukturu textilního substrátu agresivně narušují. Pro pájky s vyšší teplotou tání se je potřeba přídavného materiálu např. FR4, na kterém se kontaktování provede, protože vyšší teploty by mohly narušit textilní substrát. Jedna z výhod této metody by mohla být relativně snadná automatizovaná výroba.

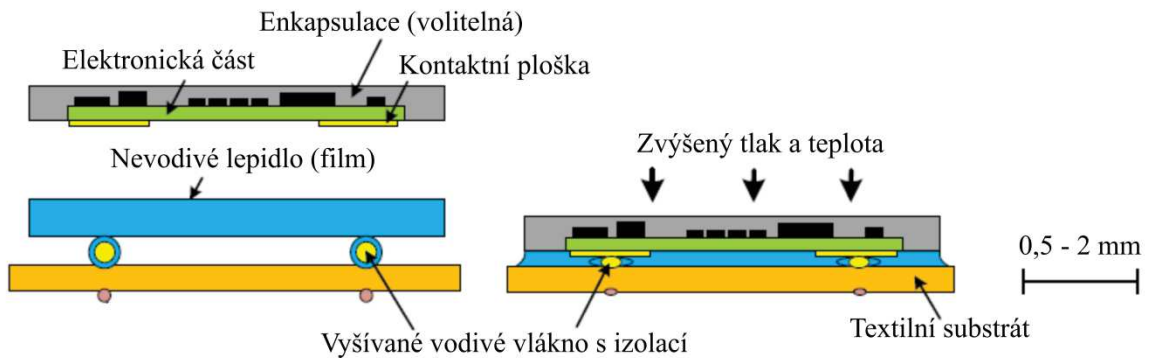
2.1.2 Lepené spojení

Podle typu vytvrzení můžeme rozdělit do tří kategorií [42]. V první kategorii lepidel dochází k vytvrzení ochlazením daného lepidla. U druhé kategorie dochází k vytvrzení chemickou reakcí a k vytvrzení lepidel třetí kategorie je třeba odstranit rozpouštědlo[2]. Dále se lepidla dají rozdělit na elektricky vodivá a nevodivá.

V textiliích je nejběžnější použití polymerních lepidel, kde nosnou složkou je rozpouštědlo, které se pro vytvoření spoje odpaří [39]. Vodivá lepidla obsahují částičky vodivého materiálu ve své struktuře, jsou jimi nejčastěji stříbro nebo grafit. V porovnání s pájením potřebuje epoxidová pryskyřice nižší teploty pro vytvrzení, což může být výhodou při použití lepidla v blízkosti teplotně citlivé textilie. Nevýhodou lepidel je vyšší rezistivita oproti pájkám a epoxidová část lepidla je lámavější a křehčí. Další velkou nevýhodou lepidel je jejich nestabilita při vyšších teplotách, kde může dojít k porušení nebo rozlepení spojů a také dochází ke snížení jejich elektrické vodivosti. Jako příklad elektricky vodivého lepidla můžeme uvést Epo-Tek® H20E, dvou-složkové lepidlo, které je třeba pro vytvrzení zahřát na 150 °C, po dobu jedné hodiny. Toto lepidlo má rezistivitu $400 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ [2].

V následující části bude popsána jedna z možností kontaktování za pomoci elektricky nevodivých lepidel podle T. Linze a spol. Na obrázku je znázorněn princip propojení elektronické části s textilií, kde elektronická část může být eventuálně zapouzdřená a textilie má našitá izolovaná vodivá vlákna, kde izolace vlákna v této aplikaci musí být z termoplastického materiálu, aby se při zahřátí a při zvýšeném tlaku vytlačila (znázorněno na obrázku 2.4 v pravé části) izolační část na okraje a umožnilo se tak bezproblémovému

elektrickému kontaktu mezi kontaktními ploškami a elektricky vodivými vlákny. Mimo kontaktní plošky tedy vytlačený izolační materiál zamezuje zkratu. Tento typ kontaktování je velmi spolehlivý, ale kvůli dlouhé době vytvrzení v řádech desítek minut – 1 hodiny je toto řešení nevyužitelné pro velkovýrobu.



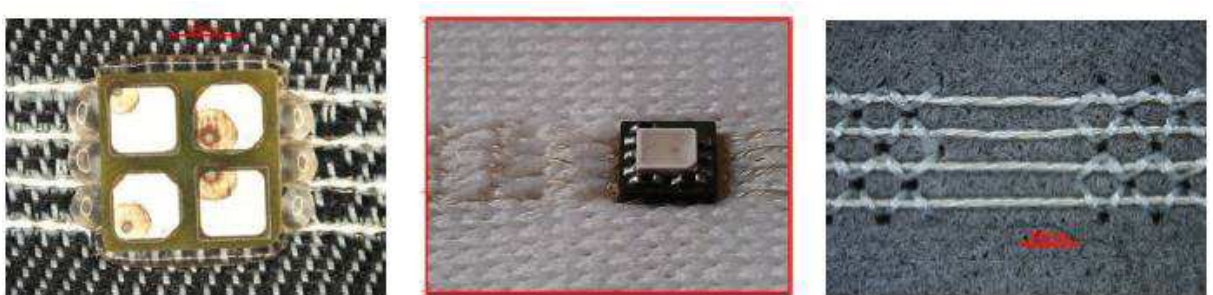
Obr. 2.4 – *Uspořádání pro lepené elektrické kontakty s pomocí nevodivého lepidla, převzato z [50]*

Elektricky nevodivá lepidla mohou být buď termoplastická nebo reaktoplastická [43]. Výhodou reaktoplastů je, že při zahřátí elektronické části již neměknou. Oba typy potencionálně mohou vylepšit spolehlivost systému při vystavení nepříznivým vlivů. Výhodou termoplastů je jejich schopnost znovu roztavení, která se dá využít například k opravě daného kontaktu nebo ke znovu použití některých komponent systému. Další výhodou je, když je použito lepidla z materiálu shodným s termoplastickým izolačním materiálem našitého kabelu, nevznikají žádné další plochy mezi vodivou ploškou a vodivým vláknem, které by ohrožovaly spolehlivost spoje.

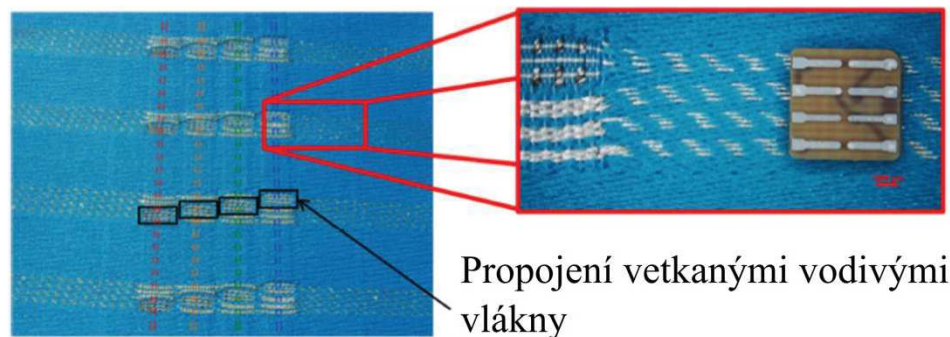
Z tohoto vyplývá nevýhoda kontaktování za pomoci reaktoplastických lepidel, kde při spojení našitého vlákna s lepidlem vzniká další izolační mezivrstva, protože vlákno bývá zpravidla termoplast, například na bázi polyuretanu a může tak vyvolat časem delaminaci nebo poškození v podobě mikro-trhlinek. Nevýhodou termoplastických lepidel spočívá v celkem složitém procesu vytvoření konečného kontaktu[43].

Na principu propojení podle obrázku 2.4 byla provedena studie Malte Von Krshiwoblozkiho a spol. [43], kde bylo provedeno testování a měření elektrických kontaktů tří možných provedení. Jedná se o použití LWAC (z anglického: Litz Wire with Aramid-Core) použitým na netkané textilii, izolovaným LWAC použitým na netkané textilii a tkané textilie s vetkaným vláknem ELITEX®. Na trojici obrázků 2.5 se jedná o dvě první zmíněné metody provedení a na dalším obrázku 2.6 se jedná o vetkané vlákno ELITEX®. U všech vzorků se

jedná o čtyři vodivá vlákna s roztečí 1,27 mm, na které jsou připojeny buď testovací moduly, nebo v jednom případě RGB LED modul.



Obr. 2.5 – Znárodnění připojení testovacích modulů na vodivá vlákna LWAC, převzato z [51].



Obr. 2.6 – Znárodnění připojení testovacího modulu na vetkaná vodivá vlákna ELITEX®, převzato z [51]

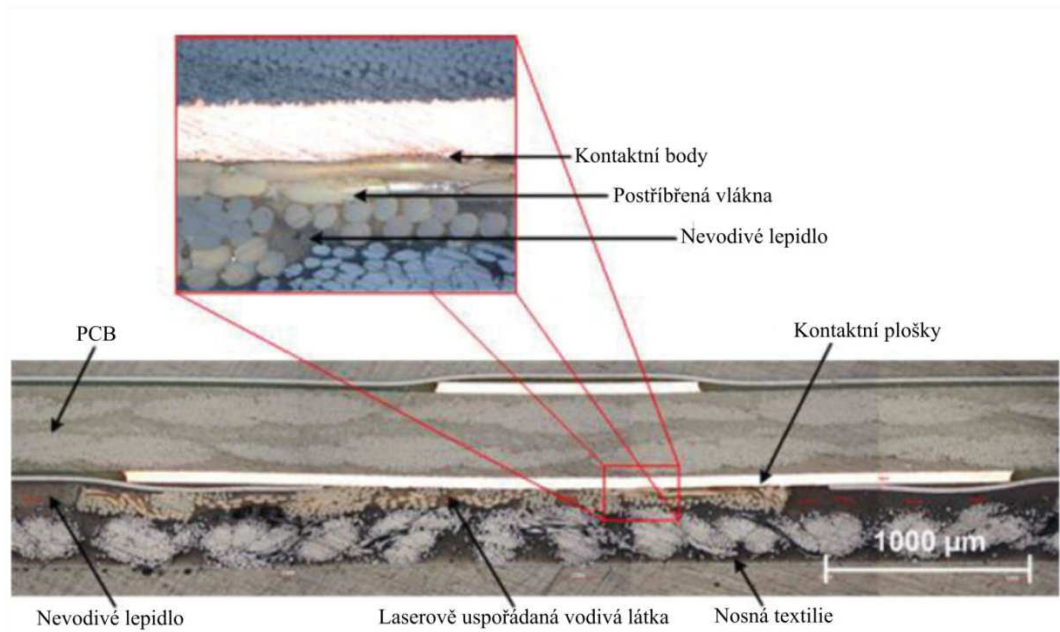
U všech vzorků byl elektrický kontakt mechanicky zajištěn pomocí nevodivé fólie nanesené za zvýšeného tlaku a teploty velmi přesným přístrojem FC150 od společnosti SÜSS MicroTech. Tímto způsobem kontaktování bylo zajištěno velmi kvalitního propojení s naměřenými hodnotami kontaktního odporu uvedených v tabulce 2.1.

Tabulka. 2.1 – Naměřené hodnoty kontaktního odporu z [51]

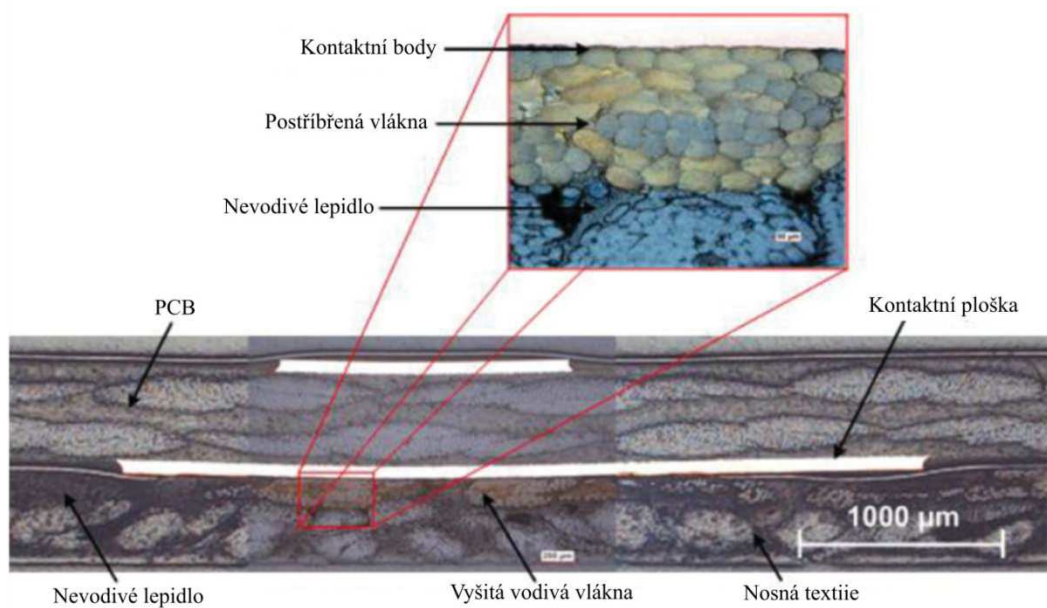
Typ textilního substrátu	Střední hodnota odporu	Odchylka	Počet vzorků
Netkaná textilie + LWAC	pod 2 mΩ	-	36
Netkaná textilie + izolovaný LWAC	pod 2 mΩ	-	36
Tkaná textilie + vetkaný ELITEX®	1 - 25 mΩ	do 66 mΩ	36

Všechny vzorky byly testovány v testech tepelného cyklování podle normy: JEDEC JESD22-A104-C (1000 cyklů se změnou teploty z - 40 °C na + 85 °C). V podání testovacích vzorků s použitím vodivých vláken LWAC nedošlo k žádnému nárůstu odporu. Za použití vodivých vláken ELITEX®, došlo k nárůstu kontaktního odporu v průměru o 20 %. Dále byly vzorky vystaveny testování za zvýšené vlhkosti podle JEDEC JESD22-A101-B (85 °C s relativní vlhkostí 85 % po dobu 1000 h), kde opět v případě prvních dvou metod kontaktování nedošlo ke změně odporu kontaktu a v případě kontaktu s vodivými vlákny ELITEX® došlo překvapivě k poklesu hodnoty kontaktního odporu, u žádného vzorku však nedošlo k úplnému přerušení vodivého propojení. V této studii však nebyly prováděny testy pracích cyklů, kde se dá předpokládat, že by tento typ kontaktování bez dalších úprav (zapouzdření) neměl šanci obstát.

Dalším reálným příkladem lepeného elektrického propojení může být podle studie Torstena Linze a spol. [43]. V této studii byly testovány dva typy lepeného elektrického propojení. První propojení bylo založeno na principu uspořádání vodivých vláken a textilie s pomocí laseru, detailní popis je na obrázku 2.7. Uspořádání na bázi vyšívací technologie je znázorněna na obrázku 2.8. Nevodivé spojení v obou alternativách bylo zajištěno termoplastickým filmem na bázi polyuretanu. Vodivé plošky byly vytvořeny stříbrným pokovením měděné mřížky na FR4 substrátu. Zhodnocení obou metod kontaktování je v tabulce 2.2. Touto metodou lze dosáhnout velmi nízké hodnoty odporu, kvalitního a hlavně spolehlivého propojení, které vykazuje podle JEDEC JESD22-A104-C po 1000 cyklech změny teploty z - 40 °C na + 85 °C a po 20 cyklech vyprání na 40 °C velmi konstantní hodnoty. Na druhou stranu je tento proces velice zdlouhavý a pro komerční masovou výrobu stále nevýhodný.



Obr. 2.7 – Řez uspořádáním kontaktu laserově uspořádaných vodivých vláken v textilií s vodivou ploškou na FR4, převzato z [43]



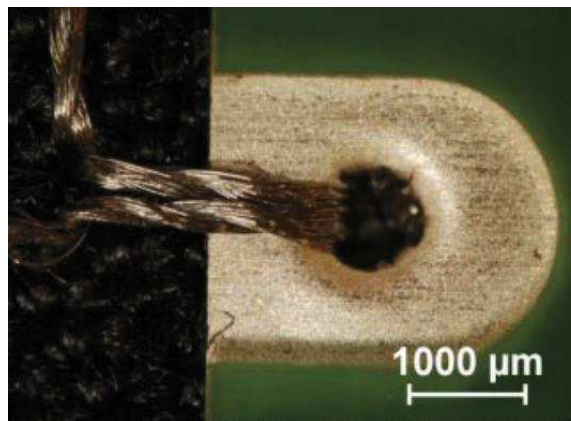
Obr. 2.8 – Řez uspořádáním kontaktu uspořádaných vodivých vláken technologií vyšívání v textilií s vodivou ploškou na FR4, převzato z [43]

Tabulka. 2.2 – Zhodnocení kontaktního odporu před testováním

Typ uspořádání textilního substrátu	Střední hodnota odporu	Odchylka	Počet vzorků
Laserové uspořádání textlie	16,5 mΩ	18,5 mΩ	75
Vyšívané uspořádání textlie	28,3 mΩ	14,7 mΩ	75

2.1.3 Mechanické spojení

Mechanické spojení drží dva objekty v kontaktu s pomocí podpůrného prvku, jako jsou například šrouby, nýty, svorky atd.[43]. Do této kategorie budu uvádět i metody kontaktování na základě šití a svázání prvků elektroniky s textilním vláknem. T. Linz přišel s vyšivacím strojem používající vodivá vlákna, který pro vytvoření kontaktu jehlou propíchnou elektricky vodivou plošku na flexibilním substrátu s elektronikou (resp. může být ploška předem provrtána) a utažením několika stehů vodivé niti (v jeho publikaci [44] byl použit Shieldex 117/17) resp. uzlem skrz otvor plošky dochází k vytvoření elektricky vodivému kontaktu. Zjednodušený princip je znázorněn na obrázku 2.9.



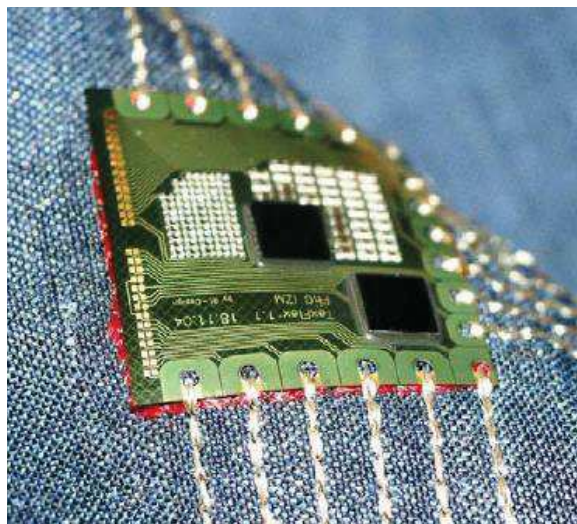
Obr. 2.9 – Detailní znázornění elektrického spojení textilní a elektrické části, převzato z [44]

Podle publikace T.Linze[44] je výhodnější metoda s propíchnutí vodivé plošky jehlou, kde se odpor kontaktu pohybuje okolo 410 mΩ oproti předvrtání a hodnota odporu se pohybuje okolo 2010 mΩ. Navíc v testu teplotního cyklování kontakty s předvrtanými otvory vykazují výrazně vyšší náchylnost k poškození elektrického kontaktu. Zlepšení kontaktního odporu lze dosáhnout vyšším počtem stehů propletených skrze propíchnutou vodivou plošku. V porovnání jednoho stehu se čtyřmi stehy, se může hodnota kontaktního odporu snížit z již zmíněných 410 mΩ na 115 mΩ a při testu tepelného cyklování samozřejmě kontakt se čtyřmi stehy dosahuje výrazně vyšší spolehlivosti. Hodnoty odporu kontaktu a také výchylky hodnot odporu stále dosahovaly neuspokojivých výsledků. Proto bylo pro zlepšení stability hodnot kontaktního odporu v [44] vyzkoušeno několik dalších opatření:

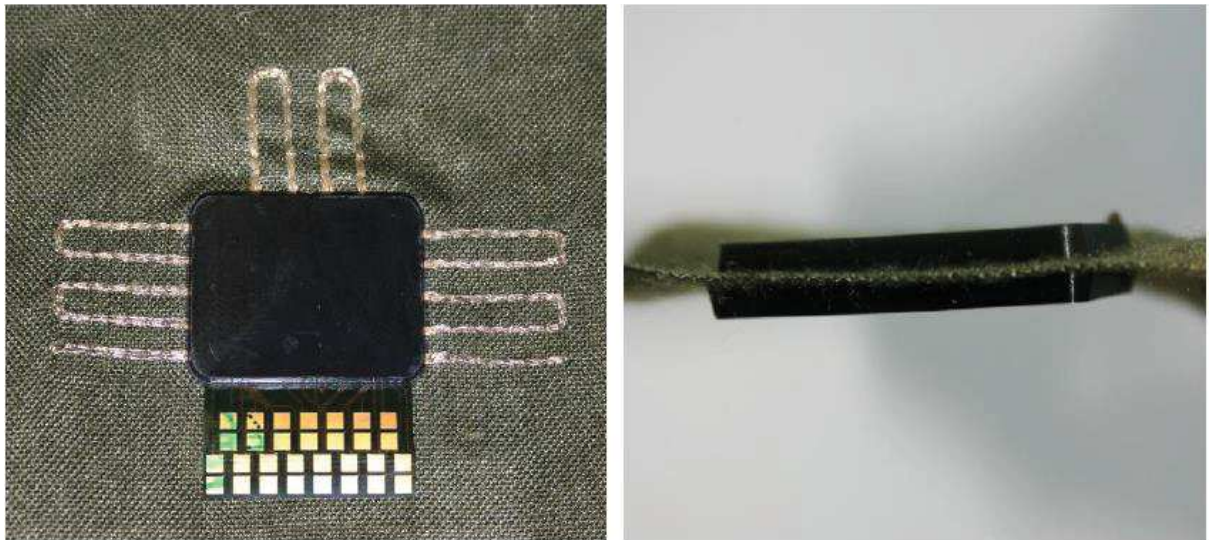
- enkapsulace (zapouzdrění) elektronické části včetně kontaktů
- enkapsulace plastovým materiálem z obou stran textilie pomocí formy

- enkapsulace termoplastem pouze z vrchní části textilie, ze spodní strany byl použitý nevodivý adhezivní film
- vytvrzení kontaktu pomocí epoxidového lepidla
- vytvrzení kontaktu pomocí izotropně vodivého lepidla
- kombinace epoxidového lepidla a izotropně vodivého lepidla
- překrytí kontaktu a části textilie ochranným flexibilním polyuretanovým filmem

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo pomocí enkapsulace elektronické části, kde vodivý kontakt byl zajištěn třemi stehy vodivého vlákna, jak znázorňuje nezapouzdřené provedení na obr. 2.10. Hodnota odporu se po takovýchto úpravách pohybovala okolo 35 mΩ s velmi malou odchylkou $\pm 0,6$ mΩ (měřeno pouze u dvou kontaktů), lze tedy předpokládat odchylku o něco větší, pokud bude měření podrobena více kontaktů. Ukázka takového zapouzdření je zobrazena na obrázku 2.11, kde je zapouzdřena celá elektronická část včetně prošítych vodivých plošek, které mají vyvedené měřicí kontaktní plošky na vnější straně zapouzdření, jak je vidět ve spodní části levého obrázku 2.11. Tento typ kontaktování textilií je navíc velmi stabilním řešením podle jeho výsledků po testech tepelným cyklováním a pracích testů, kde byl vzorek vystaven dvaceti pracím cyklům a ani v jednom z nich nedošlo k porušení elektrického kontaktu, zatímco kdyby prošité kontakty byly vně, elektrické propojení by nesneslo ani jediný prací cyklus. Toto řešení elektrického kontaktování je tedy velmi dobrým a odolným řešením v oblasti elektrického propojení elektronické a textilní části smart textilií. Jeho nevýhodou je však nepříliš velká flexibilita a pohodlnost.



Obr. 2.10 – Flexibilní elektronický modul připevněn pomocí vodivých vláken (před enkapsulací a bez vyvedených ploch pro měření odporu kontaktu), převzato z [32]



Obr. 2.11 – Flexibilní elektronický modul připevněn pomocí vodivých vláken (po enkapsulaci), převzato z [44]

Tabulka. 2.3 – Hodnoty odporu kontaktu s různými úpravami zajištění vodivých vláken s kontaktní vodivou ploškou [43]

Úprava vyšitých kontaktů	Střední hodnota odporu + hodnoty pro daný materiál vodivé plošky	Odchylka	Počet vzorků + materiál vodivé plošky pro kontaktování
a) Enkapsulace elektronické části se všemi kontakty (prošíti třemi stehy)	35 mΩ	0,6 mΩ	2 Au plošky (+28 vzorků*)
b) Enkapsulace termoplastem (pouze ze tří stran, jeden steh prošíti)	301 mΩ (Au: 273 mΩ; Ag: 314 mΩ)	119 mΩ (Au: 141 mΩ; Ag: 106 mΩ)	28 Ag plošky 14 Au plošky
Zajištění kontaktu pomocí epoxidové pryskyřice	185 mΩ (Au: 169 mΩ; Ag: 201 mΩ)	58 mΩ (Au: 52 mΩ; Ag: 59 mΩ)	28 Ag plošky 28 Au plošky
Zajištění kontaktu pomocí ICA**	135 mΩ (Au: 117 mΩ; Ag: 152 mΩ)	68 mΩ (Au: 51 mΩ; Ag: 79 mΩ)	11 Ag plošky 11 Au plošky
Zajištění kontaktu pomocí PU nevodivého filmu	561 mΩ	521 mΩ	46 Au plošky
Kombinace zajištění kontaktů epoxidem + enkapsulace b)	233 mΩ	66 mΩ	14 Ag plošky
Kombinace zajištění kontaktů ICA + enkapsulace b)	139 mΩ	35 mΩ	14 Ag plošky

*bylo měřeno dalších 28 vzorků, u kterých se nepodařilo naměřit tak malou hodnotu odporu přesně

**ICA – Izotropně vodivé lepidlo

Všechny úpravy vyšitých kontaktů byly otestovány v testu tepelného cyklování a dále byly vzorky podrobeny testu dvaceti pracím cyklům. Výsledky chybovosti nebo úplného selhání jsou shrnuty v tabulkách 2.4 a 2.5. V těchto tabulkách jsou znázorněny tři sloupce, kde je zaznamenán nárůst hodnot odporu u jednotlivých kontaktů nad 1 Ω , 10 Ω a 100 Ω . Nárůst hodnot nad meze těchto hodnot znamenají degradaci nebo přerušení elektrického spojení u daného vzorku.

Tabulka. 2.4 – Nárůst odporu kontaktu nad jednu ze tří stanovených mezí (1 Ω , 10 Ω a 100 Ω) v závislosti na testu tepelného cyklování (1025 tepelných cyklů) [43]

Úprava vyšitých kontaktů	1 Ω	10 Ω	100 Ω
a) Enkapsulace podle formy z obou stran	0%	0%	0%
b) Enkapsulace termoplastem z jedné strany	79%	36%	36%
Zajištění kontaktu pomocí epoxidové pryskyřice	0%	0%	0%
Zajištění kontaktu pomocí ICA	0%	0%	0%
Kombinace zajištění kontaktů epoxidem + enkapsulace b)	0%	0%	0%
Kombinace zajištění kontaktů ICA + enkapsulace b)	0%	0%	0%
Zajištění kontaktu pomocí PU nevodivého filmu	10%	10%	10%

Tabulka. 2.5 – Nárůst odporu kontaktu nad jednu ze tří stanovených mezí (1 Ω , 10 Ω a 100 Ω) v závislosti na testu 20 vyprání [43]

Úprava vyšitých kontaktů	1 Ω	10 Ω	100 Ω
a) Enkapsulace podle formy z obou stran	0%	0%	0%
b) Enkapsulace termoplastem z jedné strany	0%	0%	0%
Zajištění kontaktu pomocí epoxidové pryskyřice	4%	0%	0%
Zajištění kontaktu pomocí ICA	33%	0%	0%
Kombinace zajištění kontaktů epoxidem + enkapsulace b)	0%	0%	0%
Kombinace zajištění kontaktů ICA + enkapsulace b)	0%	0%	0%
Zajištění kontaktu pomocí PU nevodivého filmu	96%	64%	44%

Po provedení obou typů testování je nejspolehlivější řešení oboustranná enkapsulace (v tabulce 2.5 a)), kde nedošlo k nárůstu hodnot odporu kontaktu ani nad hranici 0,1 Ω ale problematickou část tvoří okraj enkapsulace, odkud vychází vodivá vlákna. Tato část systému

není schopna vydržet ani několik pracích cyklů, takže tato metoda není příliš vhodná v aplikacích, kde je nutnost praní dané textilie [43]. Ve všech typech kontaktů bylo použité vlákno Shieldex 117/17, které má poměrně velký odpor (348 mΩ/mm) a degraduje tak hodnoty kontaktních odporů. S použitím vodivého vlákna s lepšími vodivostními parametry by hodnoty kontaktních odporů dosahovaly zaručeně lepších hodnot.

2.2 Rozebíratelné kontaktovací metody

V této části bude popsán přehled rozebíratelných kontaktů, které se používají v elektronických textiliích. Jmenovitě se jedná například o použití suchého zipu, různé typy konektorů, druky, konektory s použitím magnetů, vodivé zipy, kapsové konektory atd.

2.2.1 Suché zipy

V anglickém jazyce se tyto kontakty nacházejí pod heslem „*hook and look connector*“. Největším a nejznámějším výrobcem tohoto typu kontaktovacích prvků je společnost Velcro®. Suchý zip se vyrábí z nylonu a polyesteru a v oděvním průmyslu mohou zastávat funkci jezdcových zipů, různých šňorovacích částí oděvů i knoflíků[29]. Vodivé suché zipy jsou komerčně dostupné např. na webové stránce:adafruit.com. Vodivý suchý zip disponuje 5000 cykly odepnutí a zapnutí s rezistivitou pod 2 Ω/sq. Vodivost je zajištěna pokovením vláken suchého zipu stříbrem. Nevýhodou elektricky vodivých suchých zipů je snadné zanesení různými typy nečistot a dochází k nárůstu odporu kontaktu. Vodivé suché zipy jsou nejčastěji používány pro elektrostatické stínění a právě pro elektrické kontaktování ve smart textiliích. Jejich uplatnění se ve smart textiliích nacházejí zejména v propojení bloků elektronických textilií [30]nebo textilních antén[31].

2.2.2 Druky

Druky nacházejí uplatnění v oděvním průmyslu již řadu let. Pokud je druk vyroben, popřípadě pokoven elektricky vodivým materiálem, může fungovat jako elektrický konektor resp. kontakt ve smart textiliích. Vodivé niti popřípadě vodivá vlákna jsou pak přichycena k jedné z části vodivého druku (část koženého oblečení na obrázku 2.12). Tato část propojení se již řadí mezi nerozebíratelné. Velká výhoda druků je jejich snadné sepnutí a rozepnutí.



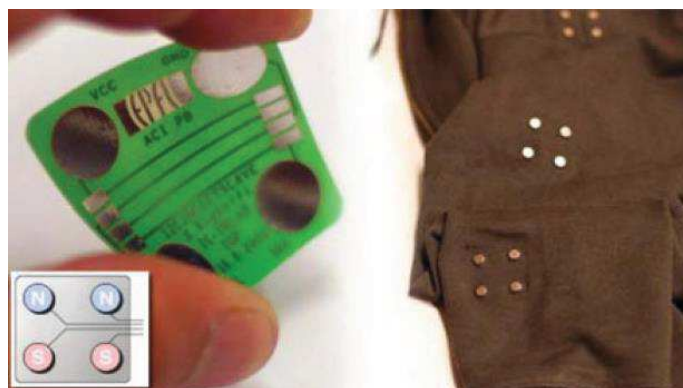
Obr. 2.12 – Ukázka použití druku v E-textiliích, převzato z[32]

V některých aplikacích je zapotřebí propojení elektroniky a textilie v odlučitelných procesech. Může se jednat o případy, kdy například výrobce nemá vybavení potřebné k integraci elektroniky nebo v aplikacích, kdy elektronické moduly jsou potřeba odejmout koncovým uživatelem (odejmutí displeje před praním textilie a jiných náchylných částí na vodu či vlhkost). V aplikaci druků na obrázku 2.12, kdy byla v horní části připojovací část druků napájena na zadní část displejového modulu na desku FR4 a část do které byl displejový modul přichycen, byl z postříbřené mosazi. Elektrický a mechanický kontakt tohoto propojení se projevil jako velmi spolehlivé řešení, kde se průměrná rezistivita pohybuje okolo 50 m Ω (maximální 150 m Ω). V porovnání s USB konektorem, kde se maximální rezistivita pohybuje okolo 30 m Ω , se jeví řešení za pomoci druků jako velmi dobré. U druků dochází k ovlivnění kontaktní síly vlivem opotřebení materiálu po 2000 cyklech připojení a odpojení (pro USB 1500 cyklů).

2.2.3 Magnetické kontakty

Magnetické konektory jsou v elektronice využívány kvůli jejich snadnému připojení a odpojení. Jako příklad můžeme brát tzv. MagSafe napájecí konektor od společnosti Apple [33]. S kontaktováním za pomoci magnetů v oblasti smart textilií přišel například K. Scheulen a spol. ve své studii rozebíratelných kontaktů s použitím magnetů [33], kde bylo využito neodymových magnetů. Výběr magnetů z tohoto materiálu spočívá v jejich dostupnosti v podobě různých tvarů a velikostí, mají relativně velkou přitlačnou sílu a jsou levné. Nevýhodou však je křehkost a náchylnost ke korozi, a proto se před použitím povrchově upravují. Příkladem povrchové úpravy může být právě podle K. Scheulena pokovení niklu a mědi o tloušťce 0,01-0,02 mm (10-20 mikronů), a dále pro lepší odolnost proti korozi pokovení velmi slabou vrstvou (méně než 1 mikron) zlata. Elektrická vodivost mezi dvěma

magnety je nižší než $0,01 \Omega$. Jednou z možností podle K. Scheulena je připevnění magnetů k textilií pomocí dvou typů lepidel. Elektricky nevodivé lepidlo zajišťující mechanickou pevnost a elektricky vodivé lepidlo zajišťuje elektrickou vodivost mezi magnetem a danou textilií. Rezistivita lepeného spoje mezi magnetem a textilií pokovené stříbrem je méně než 1Ω (pokud je magnet pokoven zlatem a jeho rozměr je 5 mm^2) [33]. S další možností kontaktování pomocí magnetů přišel X. Righetti a spol. ve své studii [34], kde vynalezli standardizovaný systém na bázi I²C (z anglického Inter-Integrated Circuit – multimasterová sběrnice) technologie pro oděvní elektroniku. Oděv obsahuje sběrnici obsahující 4 složené vodiče („Litz wire“). Moduly mohou být připevněny na různé pozice pomocí magnetických konektorů, jak je znázorněno na obrázku 2.13. Moduly jsou 0,4 mm tlusté a jedná se o tištěnou PCB. Magnety byly nalepeny na PCB elektricky vodivým lepidlem [34]. Dalším používaným magnetickým materiálem pro magnetické kontaktování jsou samariové magnety, které oproti neodymovým magnetům mají výrazně vyšší tepelnou odolnost.

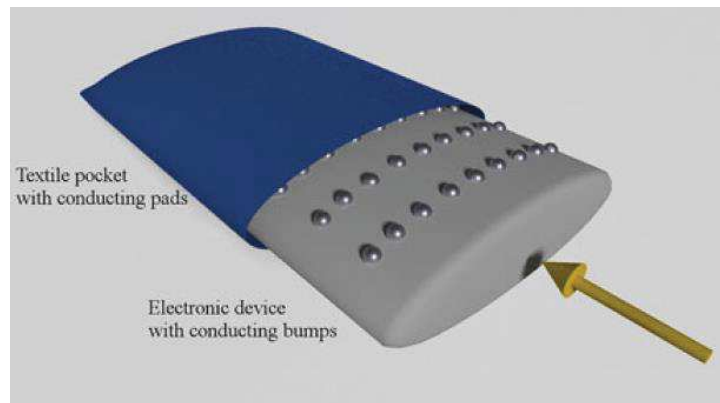


Obr. 2.13 – Magnetický konektor pro I²C PCB, převzato z [34]

2.2.4 Kapesní konektory

Dalším zajímavým typem konektoru elektroniky s textilií je tzv. kapesní konektor, který byl poprvé představen A. Mehmannelm. Princip tohoto typu konektoru je znázorněn na obrázku 2.14, kde elektronická část je zasunuta do natahovací kapsy. Tato část má měděné výstupky v maticové struktuře. Vnitřní část kapsy obsahuje vodivé plošky. V případě spojení měděných výstupků elektronické části na vodivé plošky uvnitř kapsy dochází k vodivému kontaktu. Výhoda tohoto provedení je ve výrobě samostatně elektronické a textilní části, takže jak odvětví elektroniky tak textilní může využít své výrobní procesy a materiály. Další výhodou tohoto systému je, že elektronická část může být lehce vyjmuta i zasunuta. Při praní

textilie tedy není problém elektronickou část vyjmout, taktéž při nabíjení nebo výměně elektrického zařízení[34].



Obr. 2.14 – Ukázka kapesního konektoru, převzato z [34]

2.2.5 Speciální konektory

Speciální konektory mohou být vyráběny v různých tvarech, uspořádání a velikostech podle konkrétního použití. Zde budou uvedeny některé příklady pevných zástrčkových kontaktů v aplikacích pro textil. Výrobce Ohmatex nabízí pratelný typ konektoru s šesti propojitelnými body[2]. Konektor se skládá ze dvou částí, jak je vidět na obrázku 2.15. Spodní část konektoru se připevňuje na část vodivé textilie[35]. T. Wilson a J. Slade v jejich publikaci [36] zveřejnili přezkový typ konektoru, který je zobrazen na obrázku 2.16. Dalším příkladem může být stuhový kabel, tzv. FFC (z anglického flexible flat cable) s nakrimpovanými konektory. Ukázka tohoto typu konektoru je znázorněna na obrázku 2.17.



Obr. 2.15 – Zástrčkový konektor od společnosti Ohmatex, převzato z [35]



Obr. 2.16 – Ukázka přezkového konektoru, převzato z [36]



Obr. 2.17 – Ukázka nakrimpovaného konektoru na FFC, převzato z [37].

Tabulka. 2.6 – Zhodnocení výhod a nevýhod metod kontaktování aktivních prvků ve Smart textiliích

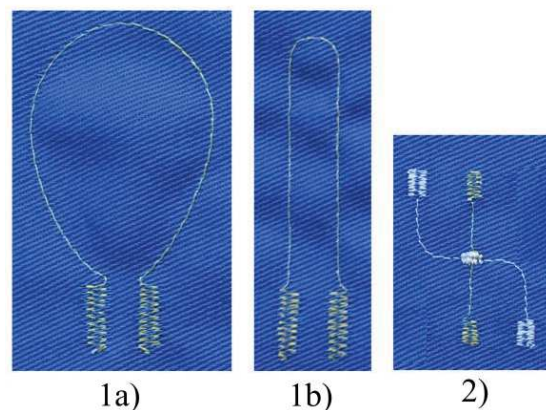
Metoda kontaktování	Vlastnosti						
	Velikost kontaktního odporu	Spolehlivost kontaktu	Mechanická odolnost	Odolnost proti pracovním cyklům	Kompatibilita s textilními procesy	Životnost kontaktu	Náročnost zpracování
Odporové sváření*	Vysoká	Střední	Střední	Vysoká	Střední	Střední	Nízká
Ultrazvukové svařování*	Střední	Vysoká	Vysoká	Střední	Střední	Střední	Nízká
Pájení	Nízká	Vysoká	Vysoká	Střední	Nízká	Vysoká	Vysoká
Lepené spojení	Střední	Střední	Střední	Nízká	Střední	Nízká	Nízká
Mechanické spojení**	Střední	Vysoká	Vysoká	Střední	Střední	Vysoká	Střední
Suchý zip	Vysoká	Nízká	Nízká	Střední	Vysoká	Nízká	Střední
Druky	Střední	Střední	Střední	Vysoká	Vysoká	Střední	Střední
Krimpy	Střední	Střední	Střední	Střední	Střední	Střední	Střední
Magnetické kontakty	Střední	Vysoká	Střední	Vysoká	Střední	Vysoká	Vysoká
Speciální konektory	Vysoká	Střední	Střední	Střední	Střední	Střední	Vysoká

*s přidáním vodivého materiálu na textilní substrát

**s enkapsulací

3 Realizace demonstrátoru a výběr vhodných metod pro kontaktování hybridních nití

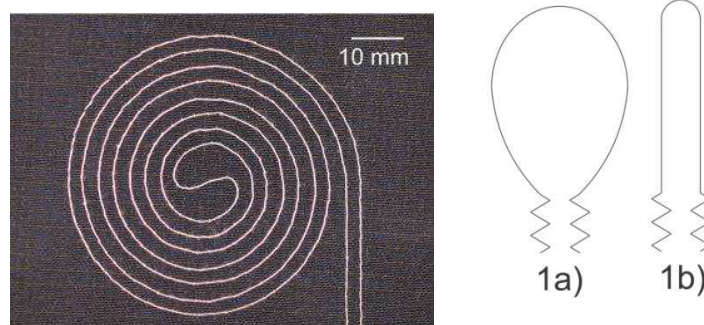
V následující části bude popsána praktická část diplomové práce, kde bude vysvětlen výběr metod pro kontaktování, a tak popsáno zhotovení vzorků pro kontaktování, které budou následně podrobeny testování. Přehled vyšitých tvarů s příslušným označením je znázorněn na obrázku 3.1, kde vzorky označené 1a) a 1b) byly navrženy pro dvoubodové měření a vzorky s tvarem 2), byly zvoleny pro čtyřbodové měření.



Obr. 3.1 – Přehled tvarů demonstrátorů s označením.

3.1 Realizace testovacích vzorků - demonstrátoru

První fází realizace testovacích vzorků bylo jejich hrubé navržení, které bylo provedeno v softwaru Corel Draw v. 2017, další úprava pak proběhla v PC s pomocí softwaru pro vyšivací stroj, pomocí kterého byly vzorky vyšity. Navrženy byly dva tvary vzorků (viz obr 3.2 vpravo), sloužící jako simulace vyšivaného teplotního senzoru, kde je však použito poměrně velké množství sensorové (odporové) nití, viz obr 3.2 vlevo. Tato diplomová práce je však zaměřena převážně na kontaktování funkčních prvků, byla tedy vyšita jen nezbytná část pro otestování elektrického propojení, jak je vidět na obr3.2 vpravo.



Obr. 3.2 - Vyšitý teplotní senzor (vlevo), navržené tvary vzorků pro testování (vpravo)

Vzorků 1a) bylo vyšito více, kvůli předpokladu menšího namáhání našité nití v horní části motivu, který má významně větší poloměr než motiv u vzorku 1b). Při vyšívání příliš malého poloměru dochází k velkému namáhání jak textilie, tak nití a v důsledku toho by mohlo dojít snáze k jejímu přetržení nebo poškození. Vzorky 1a) a 1b) byly určeny pro dvoubodové měření odporu.

Dalším postupem bylo převedení výkresu z programu Corel Draw do softwaru od výrobce šicího stroje BERNINA. V tomto softwaru byly provedeny úpravy vzorků, jako například výrazné zhuštění stehů ve spodní části obou navržených vzorků viz obr 3.2 vpravo, tato část slouží právě ke kontaktování a zhuštění prošití zajišťuje více kontaktních ploch k propojení. V programu byly také nastaveny tři varianty překrytí nití pro tvar vzorků s označením 2) pro čtyřbodové měření: PW04V1, PW05V2 a PW06V1 zobrazené na obrázku 3.4. Jednou z dalších možností softwaru je prohlédnout si simulaci vyšití jednotlivých vzorků steh po stehu a následně lze velmi přesně nakonfigurovat kontaktní plošky pro kontaktování. Celé pracoviště pro vyšívání vzorků je zobrazeno na obr. 3.3.

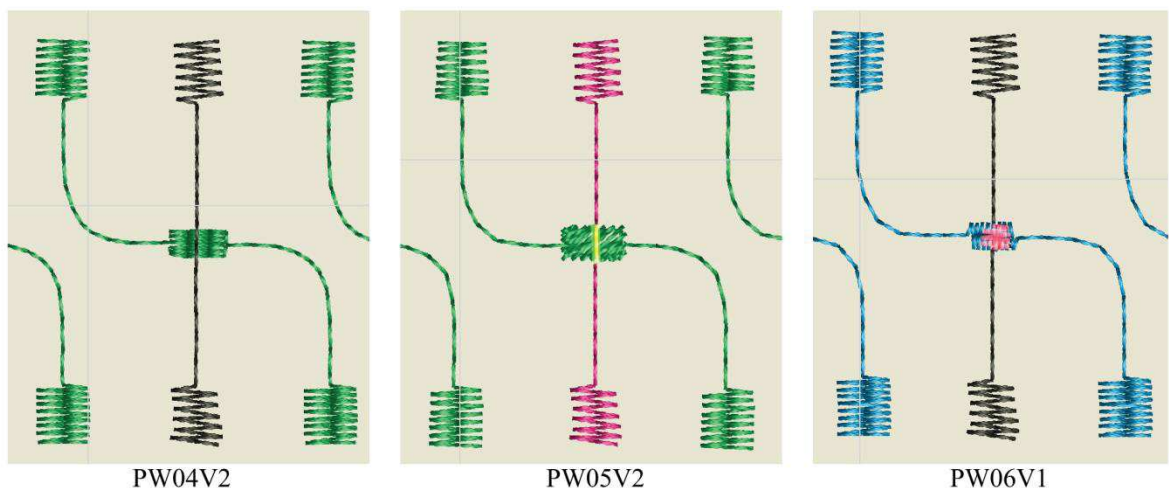


Obr. 3.3 – Pracoviště pro vyšití vzorků resp. demonstrátorů

Pro čtyřbodové měření odporu byl zvolen třetí tvar zobrazený na obr 3.1 s označením 2). Vzorek se skládá ze dvou překřížených nití. Svislá rovná nit je vždy zastoupena stejně jako v předchozích vzorcích sensorovou resp. odporovou nití na bázi chromniklové oceli. Druhou nit s dvojnásobným zahnutím tvoří hybridní šicí nit na bázi postříbřených měděných vláken, dále bude používán termín Cu/Ag nit. V místě křížení nití byla vyšita malá kontaktní ploška pomocí Cu/Ag nití, a čtyřbodové měření odporu bylo provedeno pomocí sond s pružinovými

jehlami s pozlacenými kontakty, které dosedají na vyšité plošky na koncích nití. Byly zvoleny tři různé varianty překrytí nití, které jsou zobrazeny na obrázku 3.4 následujícím popisem:

- PW04V2 - první vyšita vodivá Cu/Ag nit s vodorovným prošíáním v oblasti kontaktní plochy, která byla následně překryta sensorovou nití
- PW05V2 – první vyšita svislá sensorová nit (vespod- zvýrazněno žlutě), následně přešíta Cu/Ag nití s prošíváním v oblasti kontaktní plochy pod úhlem 45 ° tvarem prošívání v oblasti kontaktní plochy
- PW06V1 – první vyšita sensorová nit s prošíáním v oblasti kontaktu obou nití (zvýrazněno růžově), následně přešíta Cu/Ag nití se svislým prošíáním v oblasti kontaktní plochy



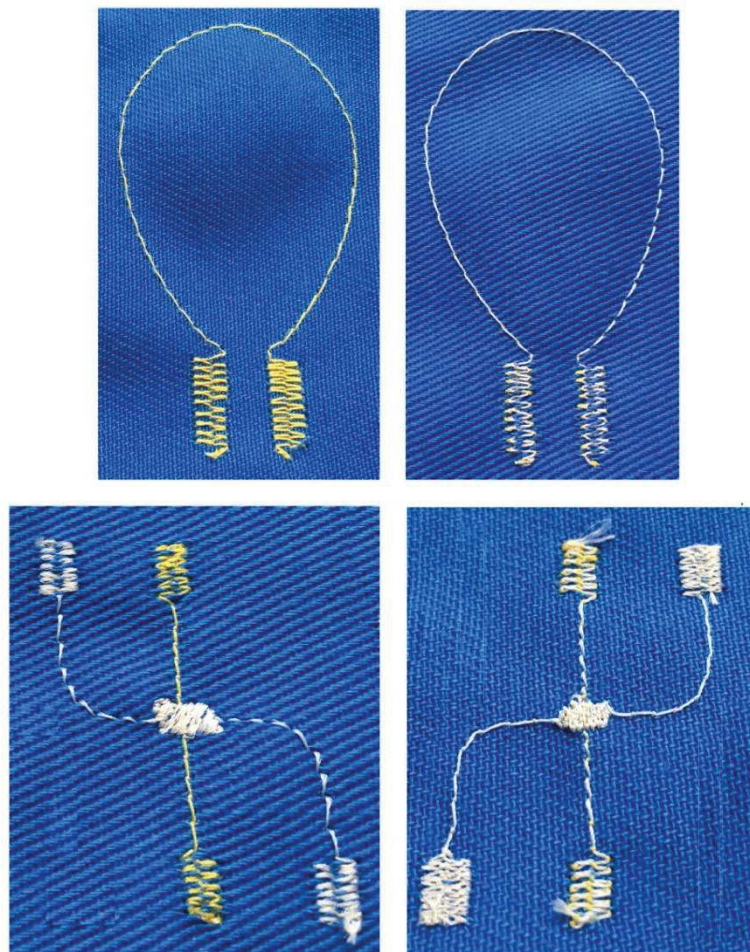
Obr. 3.4 – Detailní zobrazení překrytí hybridních nití

Další drobnější úpravy, jako například síla utahnutí stehu a rychlost vyšívání, se volí přímo na displeji vyšívacího stroje. Popis pracovního postupu vyšítí vzorku:

1. Připevnění textilního substrátu do rámu, kterým je možné po správném uchycení textilie natáhnout, aby se při procesu šití neprohýbala a šití tak bylo přesné. Rám se následně s uchycenou textilií připevní do držáku šicího stroje.
2. Pro vzorky zobrazené na obrázku 3.5 s označením 1a), (stejně tak pro vzorky označené 1b) byla shora použita běžná nit (žlutá), která slouží k přichycení odporové niti zesponu vzorku (šedivá)

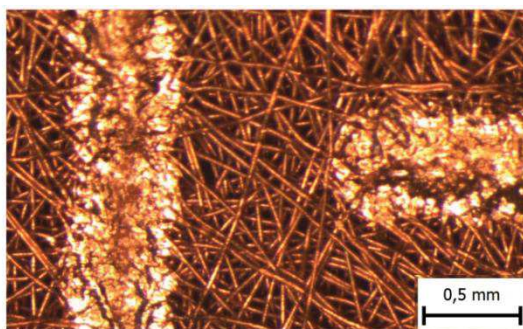
- b*) pro vzorky s označením 2) byla použita vždy jedna ze zmíněných variant přešití nití, které již bylo zmíněno výše
3. Nastavení pevnosti utažení jednotlivých švů (byla zvolena úroveň 6 z 10) a rychlost šití se pohybovala přibližně 220 stehů za minutu (rychlost lze nastavovat i v průběhu vyšívání)
 4. Zahájení vyšívání
 5. Po skončení vyšívání se pouze uvolní rám z držáku stroje a textilie se uvolní z držáku

Detailní podoba vzorku 1a), pro dvoubodové měření je zobrazena na následujícím obrázku 3.5, kde v levé horní části je zobrazen vzorek z horní strany (nevodivá strana), v pravé horní části je pak vzorek zobrazen ze spodní strany, kde bylo následně prováděno vodivé kontaktování. V levé dolní části je zobrazen detailně vzorek 2), pro čtyřbodové měření z vrchní strany, a v pravém dolním rohu ze spodní, vodivé části.

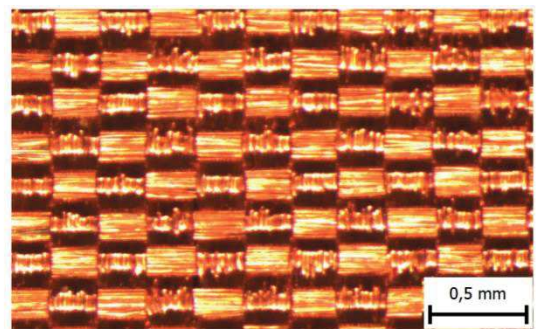


Obr. 3.5 – Detailní zobrazení vzorků s označením 1a) v horní části a 2) ve spodní části

Po vyšití vzorků bylo nutné odříznutí všech přebytečných nití, protože se vzorky vyšívají po více sériích a šití je spojitě. Dále byly provedeny pro zlepšení kvality kontaktních plošek úpravy pro zajištění lepšího a spolehlivějšího kontaktu mezi sensorovou a vodivou nití. Pouze přešité plošky by dosahovaly zcela nevyhovujícím výsledků, například při změně teploty by docházelo k poměrně velkým šumům při měření jejich odporu a tomu bylo právě cílem co nejvíce zamezit a přiblížit se spolehlivým metodám s nezašuměným průběhem odporu neboť by nemuselo k vodivému propojení vůbec dojít. Pro zlepšení vodivosti kontaktů byly použity materiály, jejichž struktury jsou znázorněny v následujícím přehledu na obr. 3.6, vyfocené pod mikroskopem. Vodivý inkoust a silikon byly foceny nanesené na kontaktní místo textilie. U zástupců tafet a textilií byla vyfocena struktura těchto materiálů samostatně.



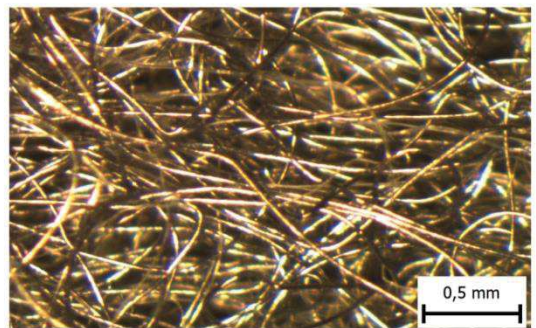
a) Netkaná měděná textilie s označením Kiel + 30 od Stetex



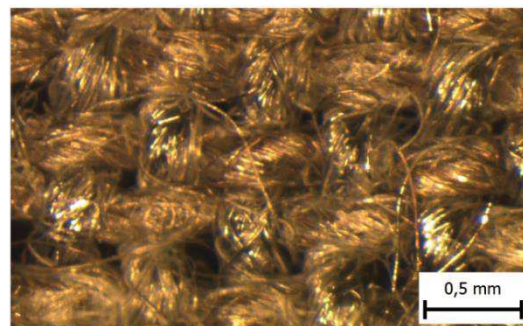
b) Měděná tafetta



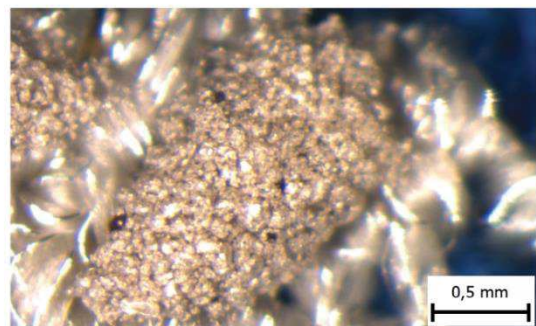
c) Vodivý inkoust s nanočásticemi stříbra



d) Netkaná textilie obsahující stříbrná vlákna od Statex



e) Textilie složená z 60% Shieldex a 40% PES



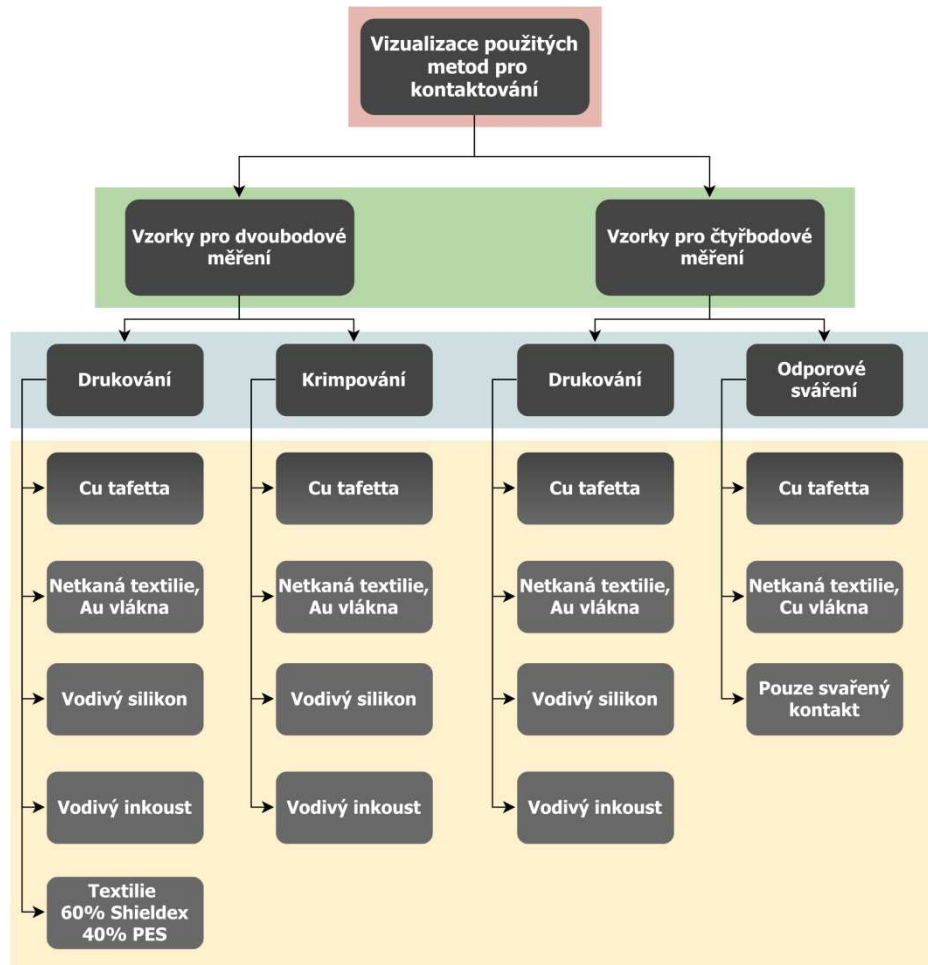
f) Vodivý silikon s částicemi stříbra

Obr. 3.6 - Detail materiálů nebo metod pro zlepšení elektrického kontaktu

Nanesení vodivého inkoustu bylo prováděno, pro kontaktování druky vždy z obou stran vodivých plošek pro kontaktování, zatímco pro krimpy bylo nanesení inkoustu provedeno pouze z vodivé strany, tedy zespod vzorku. Po nanesení inkoustu byly vzorky vloženy do pece kvůli vytvrzení inkoustu při teplotě 140 °C po dobu 10 min. Kontaktovací prvky (druky, krimpy) byly aplikovány až po vytvrzení inkoustu. V případě nanášení vodivého silikonu, který byl nanášen disperzerem, bylo nezbytné, hlavně v případě krimpování, nakrimpovat kontaktní plochy maximálně do 30 minut po nanesení, dokud vodivý silikon vykazoval pružnou strukturu. Krimpování po delší době zaschnutí silikonu nemusí být kvalitní z důvodu špatného přichycení krimpu přes již zatvrdlou strukturu vodivého silikonu.

3.2 Výběr vhodných metod pro kontaktování hybridních nití

Nejprve bylo naplánováno na základě provedené rešerše a předběžných experimentů, jakým typům kontaktování se budu v rámci této práce věnovat. Byly vybrány následující metody: odporové sváření, drukování, krimpování a různé úpravy pro tyto metody jako například různé pořadí přešití hybridních nití, použití vodivých tafet, vodivého silikonu a vodivého inkoustu. Podrobnější přehled bude uveden v kapitole věnující se testování vzorků. **Metoda odporového sváření** byla vybrána, protože dosud nebyla nijak úzce komerčně odzkoušena. Očekávání od testování této metody bylo jak, zjištění kvality elektrického kontaktování, tak i vliv na poškození vláken v místě sváru a jeho blízkém okolí. Navíc by se jednalo v případě masové výroby o velmi rychlý a nenáročný způsob vhodný pro automatizaci. **Metoda drukování** byla vybrána na základě, že se jedná o spolehlivý typ kontaktování, protože při lisování druku do textilie dochází k vtažení kontaktní plošky nýtem na protilehlý kus druku a po zalisování vzniká velký přítlak mezi těmito dvěma částmi druku. Navíc by měla být kontaktní ploška dostatečně odizolována od namáhání při pracích testech. **Metoda krimpování** byla vybrána, protože se jedná o další pevné mechanické připevnění na kontaktní místo a oproti odporovému sváření mají krimpované i drukované kontakty zajištění z obou stran textilie. Navíc oproti drukům se jedná o menší spoj a v tedy i komfortnější v potencionální aplikaci. Pro většinu typů kontaktování bylo zvoleno 5 vzorků, v některých případech 10. Celkový přehled testovaných metod a jejich variant je zobrazen na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 – Vizualizace použitých metod pro testování demonstrátoru

3.2.1 Kontaktování krimpy

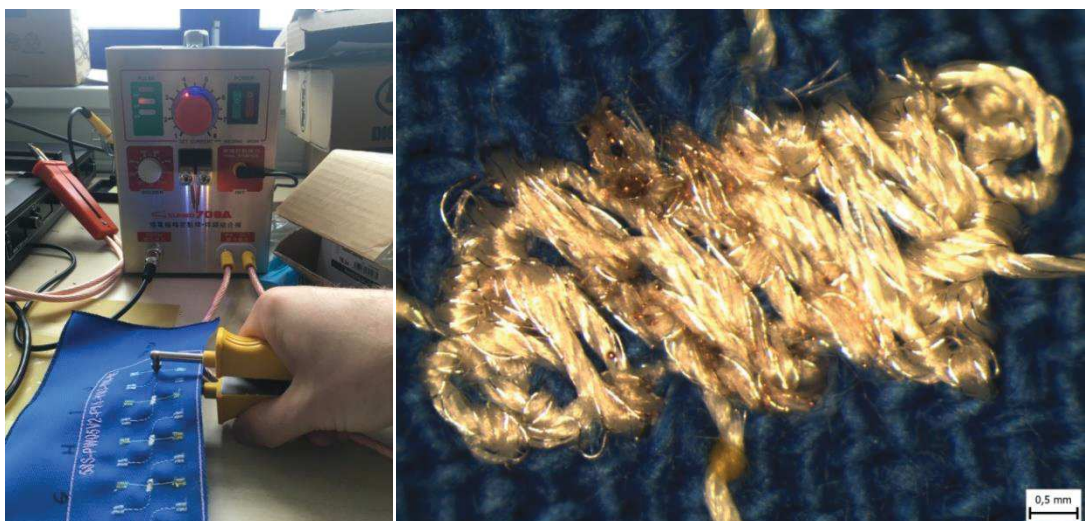
Metoda krimpování byla použita pouze u vzorků pro dvoubodové měření, kde bylo potřeba kvůli krimpovacím kleštím zastříhnout vzorky pro správné umístění krimpu doprostřed vyšitého prostoru určeného pro kontaktování, kde je největší pravděpodobnost propojení sensorové nití s krimpem, znázorněno na obr 3.8. Zuby krimpu projdou textilií, přitlakem dojde ke kontaktu krimpu se sensorovou nití a na druhé straně textilie se o hranu kleští zuby krimpu ohnou a zafixují tak celý kontakt. Pro zlepšení stability kontaktního odporu zde bylo využito materiálů uvedených v přehledu na obr. 3.7.



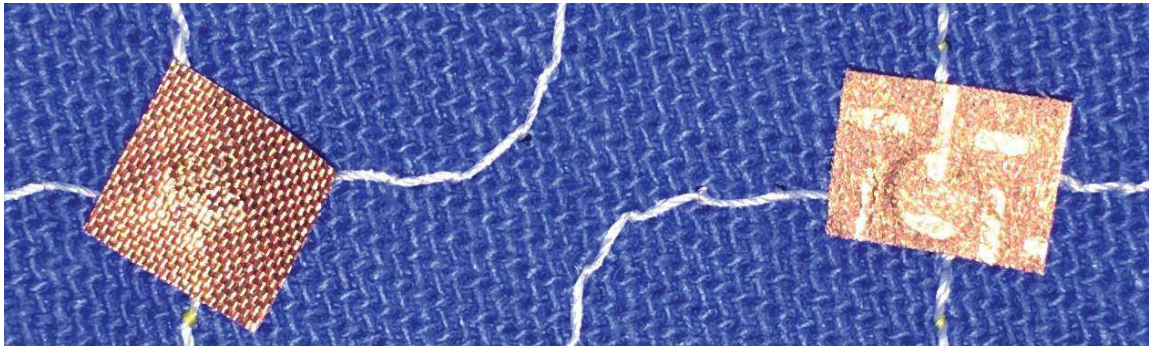
Obr. 3.8 - Kontaktování pomocí krimpovaných spojů

3.2.2 Odporové svařování

Odporové sváření bylo prováděno pouze u vzorků s variantami prošití PW05V2 a PW06V1 z důvodu vyšší senzorní niti jako první, její následné překrytí vodivou nití bylo uvažováno jako ochrana senzorní niti proti poškození svařováním. Odporové svařování bylo prováděno ruční bodovou svářečkou Sunko 709A přiložením elektrod z obou stran kontaktní plošky viz obr. 3.9 vlevo, kde je zobrazena pouze metoda odporového svařování bez přídavných materiálů pro zvýšení vodivosti. Detail svařeného spoje je vidět na obr 3.9 vpravo. Následně byla pro porovnání použita stejná metoda odporového sváření s přidáním dvou typů vodivých tafet. Detail svařeného spoje s tafetou a netkanou měděnou textilií je zobrazen na obrázku 3.10. Sváření bylo prováděno při proudu přibližně 250 A v šesti pulzech průběhu proudu trvajících 2 – 20 ms.



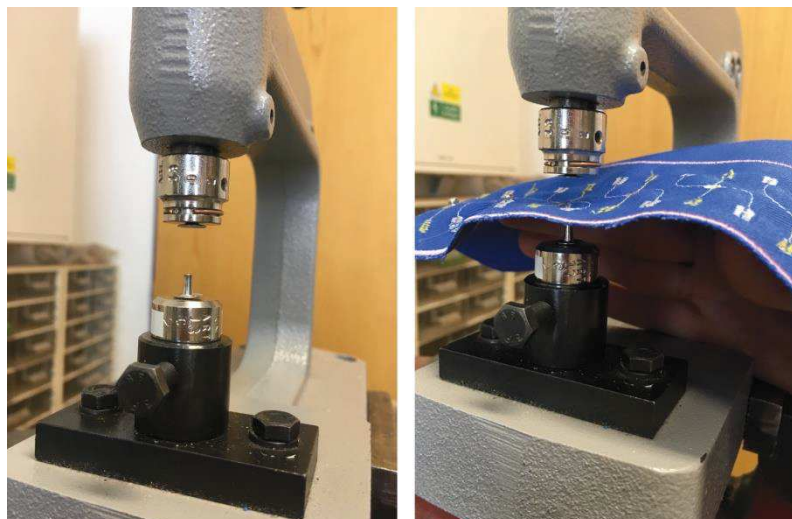
Obr. 3.9 - Kontaktování odporovým svářením, v levé části zdroj s vyvedenými elektrodovými kleštěmi, v pravé části detailní snímek svařeného spoje



Obr. 3.10 -Detail přivařené měděné tafety (vlevo) a netkané Cu textilie (vpravo)

3.2.3 Kontaktování druky

Drukování bylo prováděno u pro všechny typy vzorků. Použity byly dvě velikosti druků typu WUK, 4 a 3/2 obě z poniklované mosazi. Druky byly na textilii připevněny lisem, s pomocí dvou protikusů podle obrázku 3.11. Do horní čelisti se nejprve našrouboval horní nástavec tzv. piston (vel. 2, označení D), do kterého se přichytil samec k nalisování. Do spodní části lisu se zastrčila druhá část pistonu (vel. 2, označení C), která byla přichycena šroubem, aby při lisování nedocházelo k jejímu odjištění. Následně se na vyčnívající část nasadila nýtová část druky. Na pravé části obrázku 3.11 je zobrazena již textilie, která byla nastrčena mezi lisovací čelisti, a následně bylo provedeno zalisování na požadovanou kontaktovací plošku, popřípadě na plošku byl ještě nanesen materiál pro zlepšení spolehlivosti kontaktu.



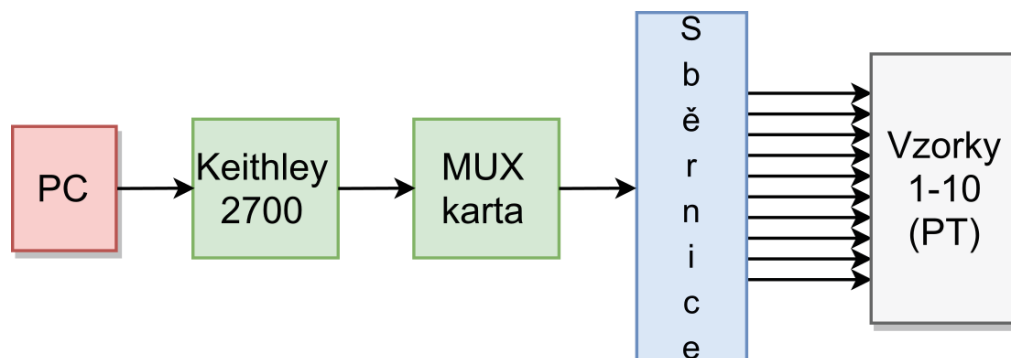
Obr. 3.11- Kontaktování pomocí druků

4 Měření a testování realizovaného demonstrátoru

Ve fázi testování byly provedeny dvě rozdílná měření u vzorků pro dvoubodové připojení a u vzorků pro čtyřbodové připojení. U vzorků připojených dvoubodově byly prováděny dva typy testů tepelným cyklováním, které byly zvoleny pro detekci šumů (nahodilým skokovým změnám odporu) na připojených kontaktech, při měnící se teplotě. Druhým měřením bylo čtyřbodové měření odporu za stálé pokojové teploty, které bylo zvoleno kvůli předpokládanému velmi malému odporu měřených kontaktních, a tedy pro jejich co nejpřesnější naměření.

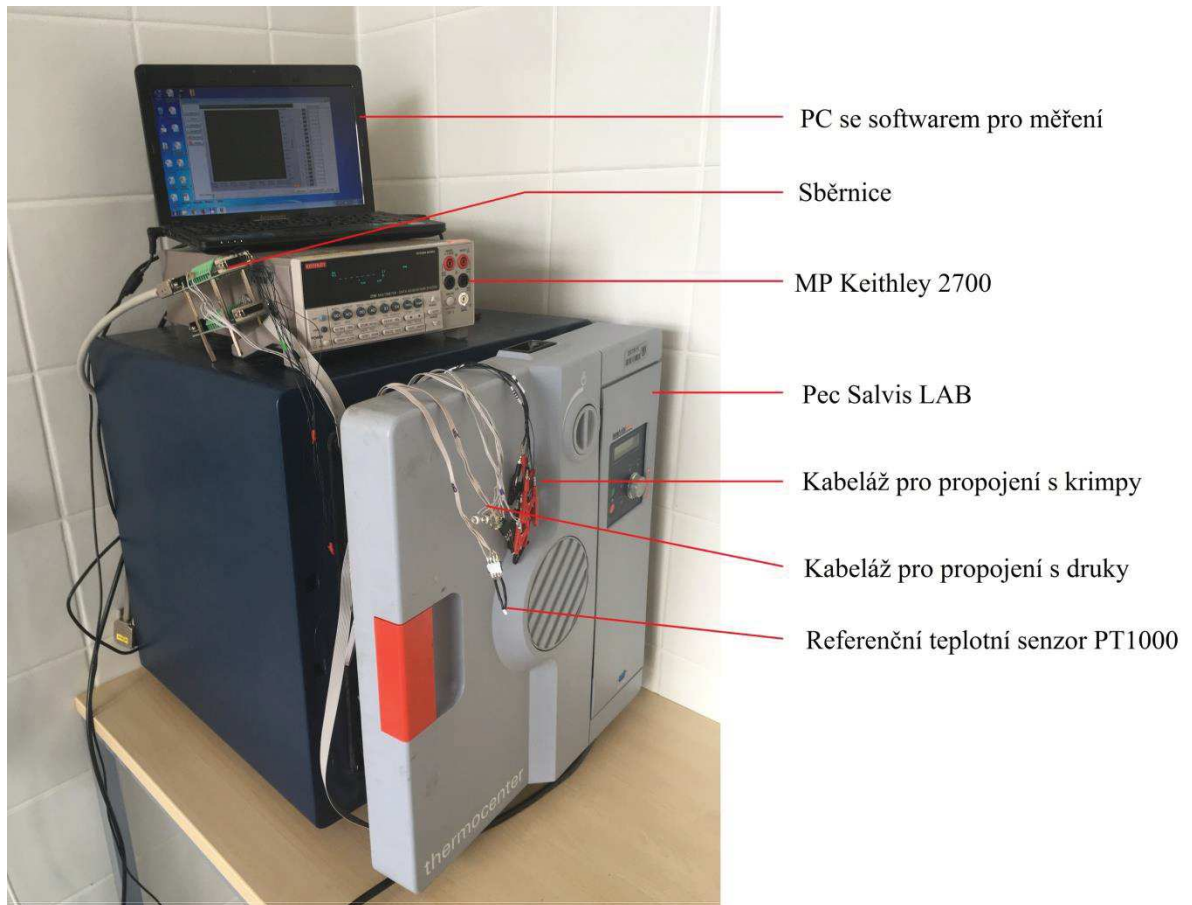
4.1 Příprava testovacího ústrojí pro test tepelného cyklování

Před měřením bylo potřeba připravit kabeláž pro propojení měřicího ústrojí s testovanými vzorky, kde bylo využito buď druků nebo krimpů. Kabeláž pro druky byla zhotovena z více žilového svazku se zakončením s protikusem druku, kam byla kabeláž napájena olovnatou pájkou SnPb 60/40, kvůli snadnému připojení vzorků pro měření. Kabeláž pro připojení krimpovaných kontaktů byla zhotovena z jednotlivých kabelových žil s konci napájenými na krokosvorky, kterými byl zajištěn kontakt s vzorky. Vzorky byly následně spojeny kabeláží se sběrnici, propojenou s multiplexorovou kartou 7702 zapojenou do měřicího zařízení Keithley 2700, propojeným s PC. Blokové schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 4.1.

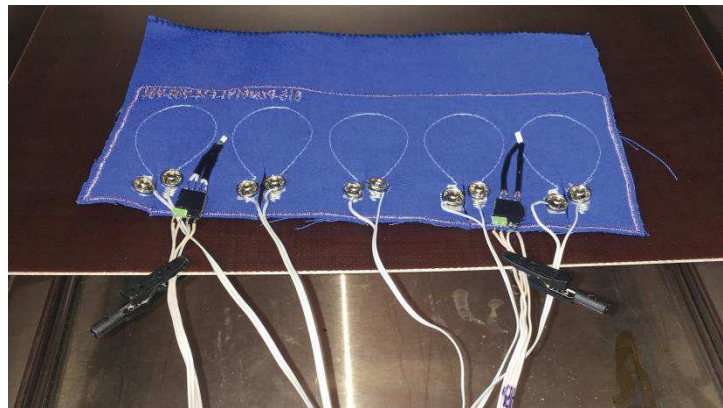


Obr. 4.1 - Blokové schéma zapojení pro měření testů tepelným cyklováním.

Celé měřicí stanoviště pro testování tepelnými cykly je zobrazeno i s popisem na obrázku 4.2. Detailní ukázka vzorků připravených v peci pro měření je zobrazena na obr. 4.3. Měřící vzorky v peci byly vždy doplněny dvojicí odporových teplotních senzorů PT1000 třídy A (na obr. 4.3 připevněné krokosvorkami), jako referenční odpor pro daná měření. Odporové senzory byly zvoleny dva kvůli případnému výpadku nebo chybě, v případě chyby jednoho senzoru se nemuselo měření přerušovat nebo opakovat.



Obr. 4.2 – Pracoviště pro měření tepelného cyklování.

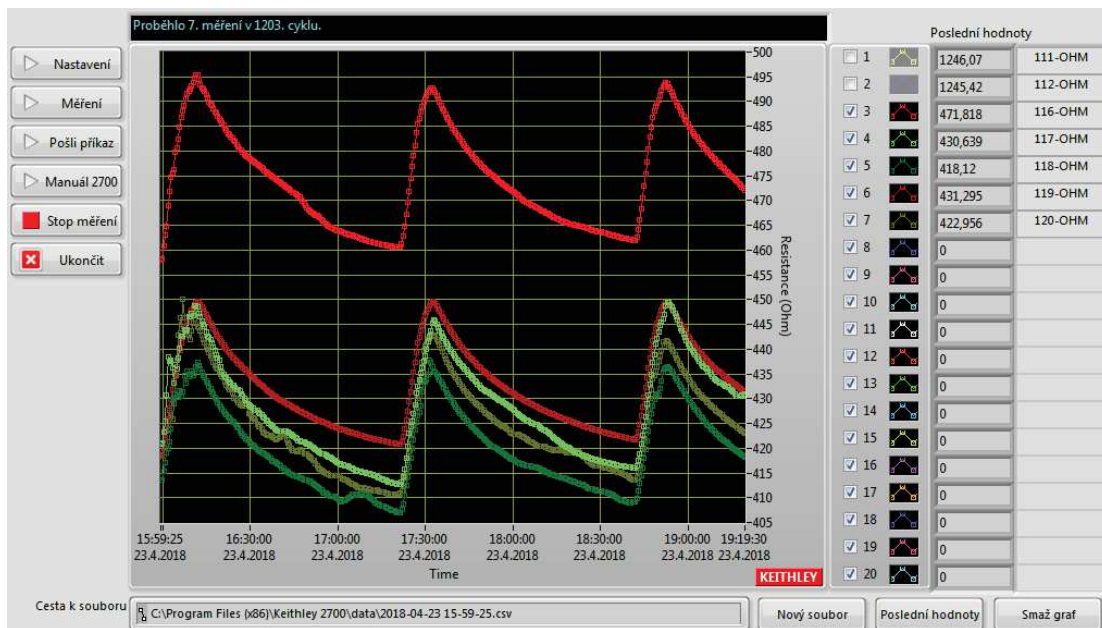


Obr. 4.3 – Detail vložených vzorků v peci, připravených pro měření.

4.2 Měření elektrického odporu při tepelném cyklování

Změny elektrického odporu v závislosti na teplotě byly měřeny pro dvě různá nastavení průběhu tepelného cyklování. Tepelné cyklování mělo ukázat spolehlivost kontaktů a velikost odchylek odporu při změnách teplot. Oba programy pro tepelné cyklování byly nastaveny v rozmezí 40 °C až 120 °C. První program (dále P01) spočíval v co nejrychlejším nárůstu teploty z hodnoty okolo 40 °C na hodnoty 120 °C s minimálně dvěma periodami průběhu.

Jeho průběh je vidět na obr. 4.3. Druhý program (dále P02) simuloval tzv. schodovitý průběh změn teplot, z přibližně 40 °C do 120 °C s ustálením teploty po 10 °C po dobu 10min. Ze 120 °C zpět na hodnoty 40 °C byl teplotní krok zvětšen na 20 °C. Odečítání hodnot odporu probíhalo vždy po deseti sekundách. Testy tepelného cyklování byly prováděny pouze u vzorků s 1a) a 1b). Na obrázku 4.3 je znázorněn průběh pěti vzorků a referenční odpory jsou odškrtnuty pro zvýraznění hodnot měřených vzorků.



Obr. 4.3 – Měřící software s průběhy prvního programu testu tepelného cyklování P01 pro 5 připojených vzorků.

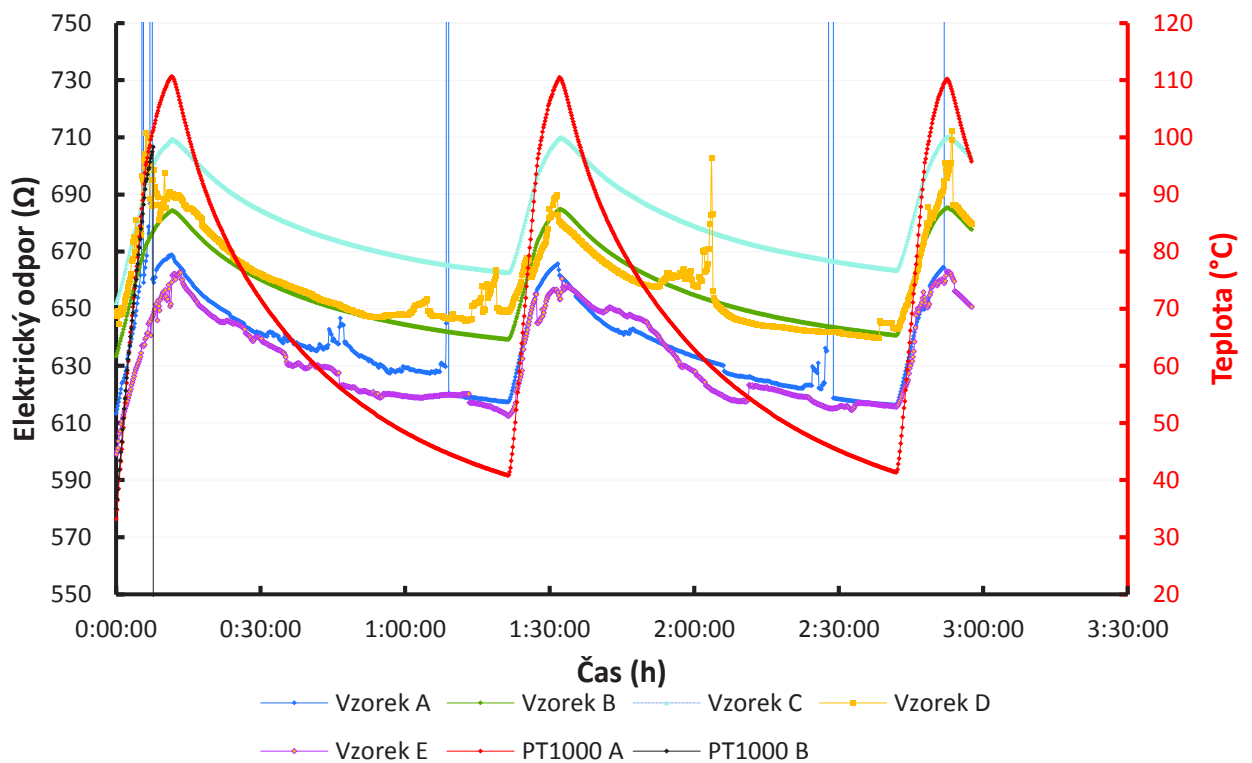
4.3 Výsledky měření v testech tepelného cyklování

Výsledné měření testu tepelného cyklování je zobrazeno na následujících obrázcích 4.4 a 4.5. Na obrázku 4.4 je zobrazeno 5 průběhů závislostí změny odporu na měnící se teplotě pro 5 shodně provedených metod kontaktování. Dva další průběhy měli být pro referenční odporové teplotní senzory PT1000, které mají v průbězích červenou a černou barvu. Pro tyto průběhy bylo nejprve nutné vypočítat z naměřeného odporu a koeficientů pro PT1000 teplotu podle rovnice (2):

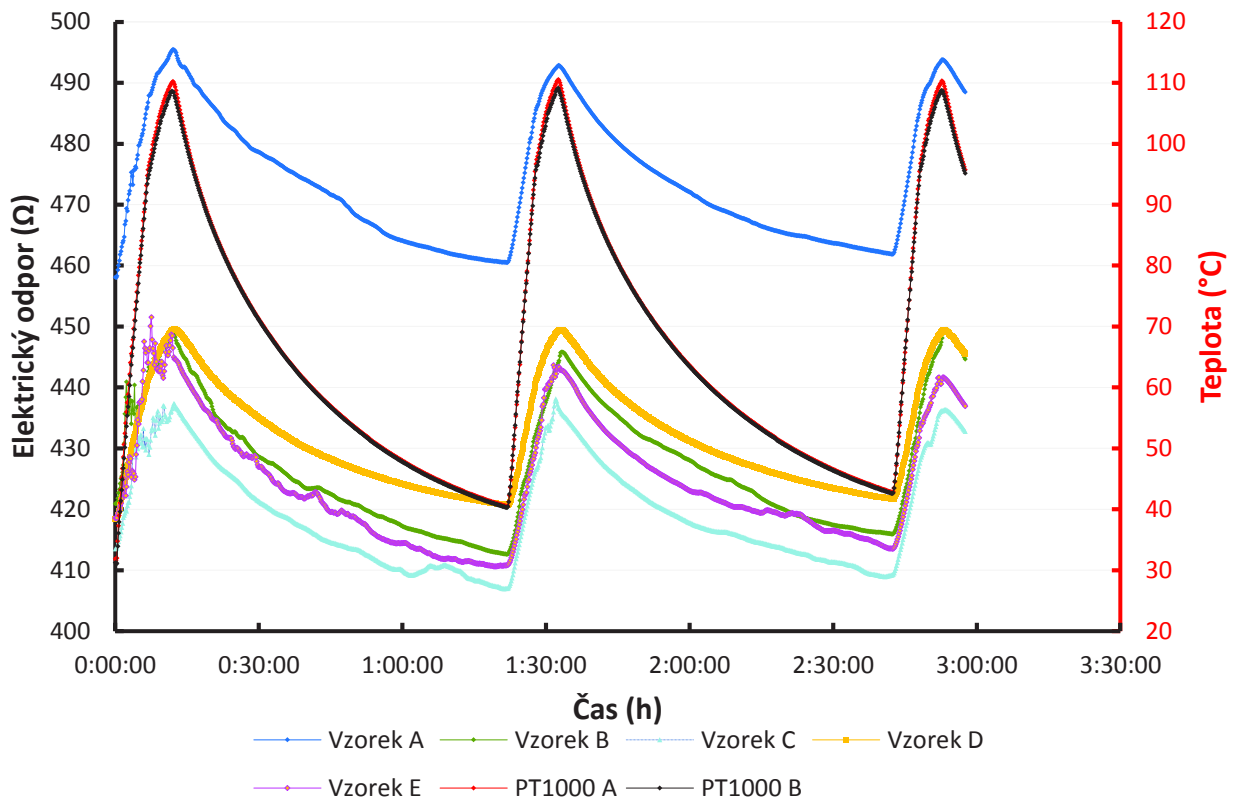
$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right)}}{2B} \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (2)$$

kde A ($3,9083 \cdot 10^3 \text{C}^{-1}$ - TKR platiny) a B ($5,775 \cdot 10^{-7} \text{C}^{-2}$) jsou koeficienty pro PT1000, R_T ...odpor při měřené teplotě, R_0 ...odpor při teplotě 0°C (pro PT1000 = 1000 Ω).

Ve výsledných grafech jsou tyto průběhy pro teplotní senzory PT1000 vyneseny v závislosti teploty na čase. Senzor s černou barvou po nějaké chvíli přestal měřit, což bylo způsobeno z důvodu nespolehlivého nakontaktování senzoru. U prvního vzorku A, s tmavě modrou barvou, dochází ke značným rozptýlům hodnot měřeného odporu mimo stupnici grafu, to značí, že takový kontakt není vhodný pro použití. Vzorky D (oranžová) a E (růžová) mají také nezanedbatelné hodnoty šumů pro použití takového kontaktu pro teplotní senzor. Tyto šумы mohou vznikat například kvůli poměrně malé ploše kontaktních vodivých míst. Do vodivé niti jsou zakomponována vodivá vlákna, která jsou opředena po obvodu nitě, ale ne vždy dojde k přímému kontaktu vodivých ploch přímo kvůli nízkému počtu těchto vláken. Někdy může kontakt nastat přes polyesterové multifilamenty, které zajišťují mechanickou pevnost dané nitě. Zbylé dva kontakty B (zelená) a C (světle modrá) mají velmi hladký průběh změny odporu. Na obrázku 4.5 je zobrazena nejslibnější metoda před testováním pracími cykly. Jedná se o metodu kontaktování pomocí tisku velikosti 3/2, kde byl na kontaktovací plochy nanesen vodivý inkoust z obou stran. Na obrázku je vidět, že všechny průběhy, až na růžový průběh vzorku E, mají čistý průběh bez větších šumů, kde vzorek D má jednoznačně nejčistší průběh z těchto vzorků. Grafy pro zbylé metody testovaných vzorků se nacházejí v příloze pod označením obrázků P1 – P8, pro tepelné cyklování s programem P01.



Obr. 4.4 – Průběh závislosti změny odporu na změně teplot, program P01, 53S-Pzar01V1 - Krimp + vodivý silikon (nanesen vertikálně)



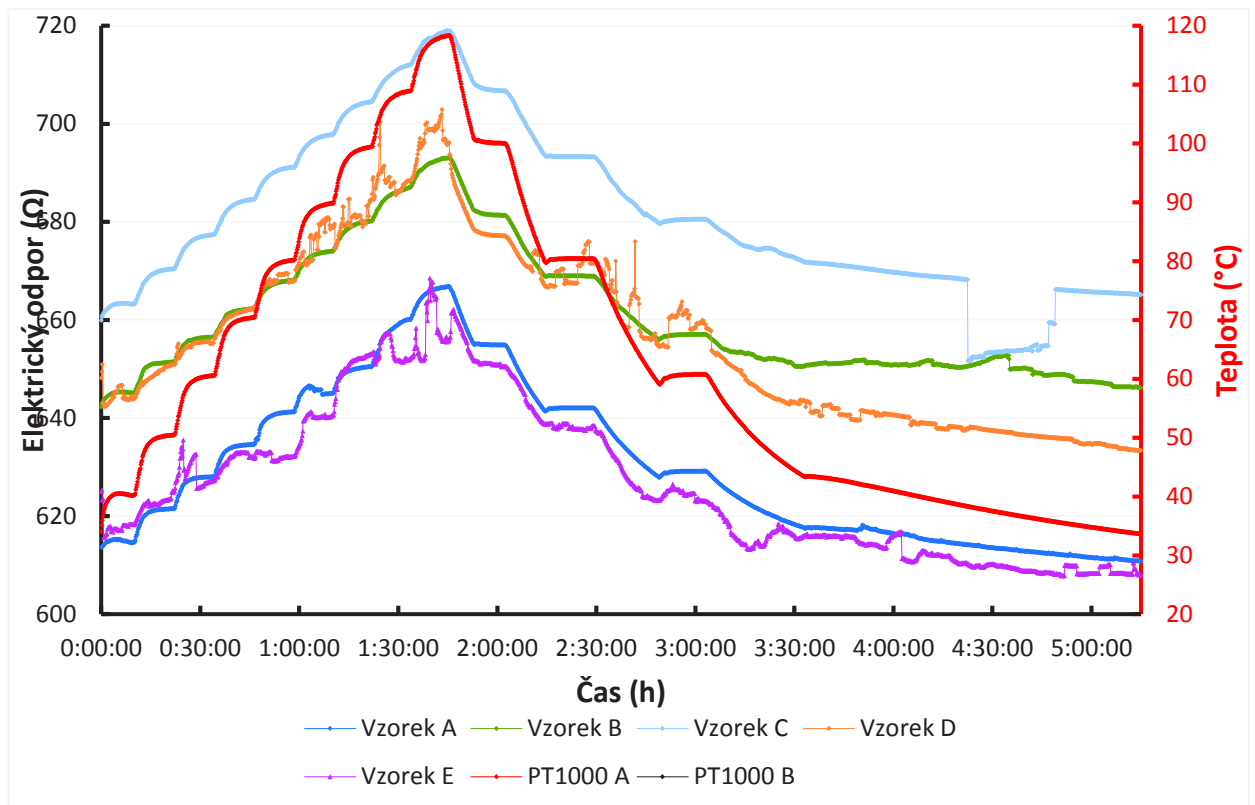
Obr. 4.5 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 55S-Pzar01VI-Druk+vodivý inkoust

V následující tabulce 4.1 je zobrazen přehled výsledků kvality kontaktů pro všechny testované metody, kde tato kvalita byla vyhodnocena z hladkosti průběhu z vyhodnocených grafů. Princip hodnocení byl volen třemi stupni, kde absolutně hladký průběh byl ohodnocen v tabulce zeleným polem s hodnocením „Dobrá“, kontakty s mírnými odporovými šumy „Střední“ a kontakty s velkými šumovými skoky „Špatná“. Příkladem může být obrázek 4.4, kde jsou vidět dva jednoznačně dobré kontakty v celé délce testování s označením B a C. Kontakty A a D mají oproti kontaktu E značně větší odchylku od očekávaného průběhu, bylo pro ně tedy zvoleno hodnocení kvality kontaktu špatné a pro kontakt E střední.

Tabulka. 4.1 – Přehled kvality kontaktu z hlediska odporových šumů

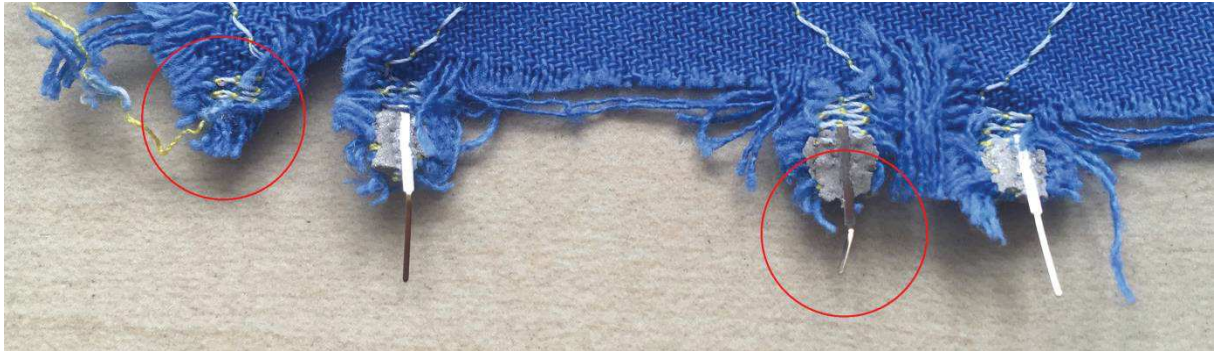
Metoda kontaktování	Kvalita kontaktu				
	A	B	C	D	E
Druky+netkaná Au textilie (shora)	Střední	Dobrá	Špatná	Střední	Dobrá
Krimp+netkaná Au textilie	Dobrá	Špatná	Špatná	Špatná	Střední
Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES (shora)	Špatná	Střední	Střední	Dobrá	Střední
Krimp + Cu tafeta	Špatná	Špatná	Dobrá	Střední	x
Krimp + vodivý silikon (nanesen vertikálně)	Špatná	Dobrá	Dobrá	Špatná	Střední
Krimp + vodivý silikon (nanesen horizontálně)	x	Špatná	x	x	Špatná
Druk+vodivý inkoust	Dobrá	Střední	Střední	Dobrá	Střední
Krimp+vodivý inkoust	Střední	Střední	Dobrá	Špatná	Střední
Druky+netkaná Au textilie (zespod)	Špatná	x	x	Špatná	Špatná
Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES(zespod)	Špatná	Dobrá	Dobrá	Špatná	Špatná

Druhý program testu tepelného cyklování (P02) byl proveden pouze u vzorků, které po prvním programu testu tepelného cyklování ukázaly potencionální šance pro použití dané metody. Příklad průběhu je zobrazen na následujícím obrázku 4.6, který popisuje průběh testování na stejném vzorku, jako je na obrázku 4.4, kde jsou jasně vidět dobré výsledky pro kontakty s označením B (zelená) a C (světle modrá), ale při pohledu na průběhy na obrázku 4.6 jsou vidět u kontaktu B při klesání teploty ze 70 °C na 60 °C nerovnosti průběhu. V podobě kontaktu C došlo dokonce ke značnému propadu hodnoty odporu na dobu přibližně 25 minut. Cílem druhého programu testu tepelným cyklováním bylo odhalit kontaktní šumy především pro kontakty, které vykazaly dobré vlastnosti v prvním testu tepelným cyklováním. Grafy pro zbylé metody testovaných vzorků se nacházejí v příloze pod označením obrázků P9 – P13, pro tepelné cyklování s programem P02.



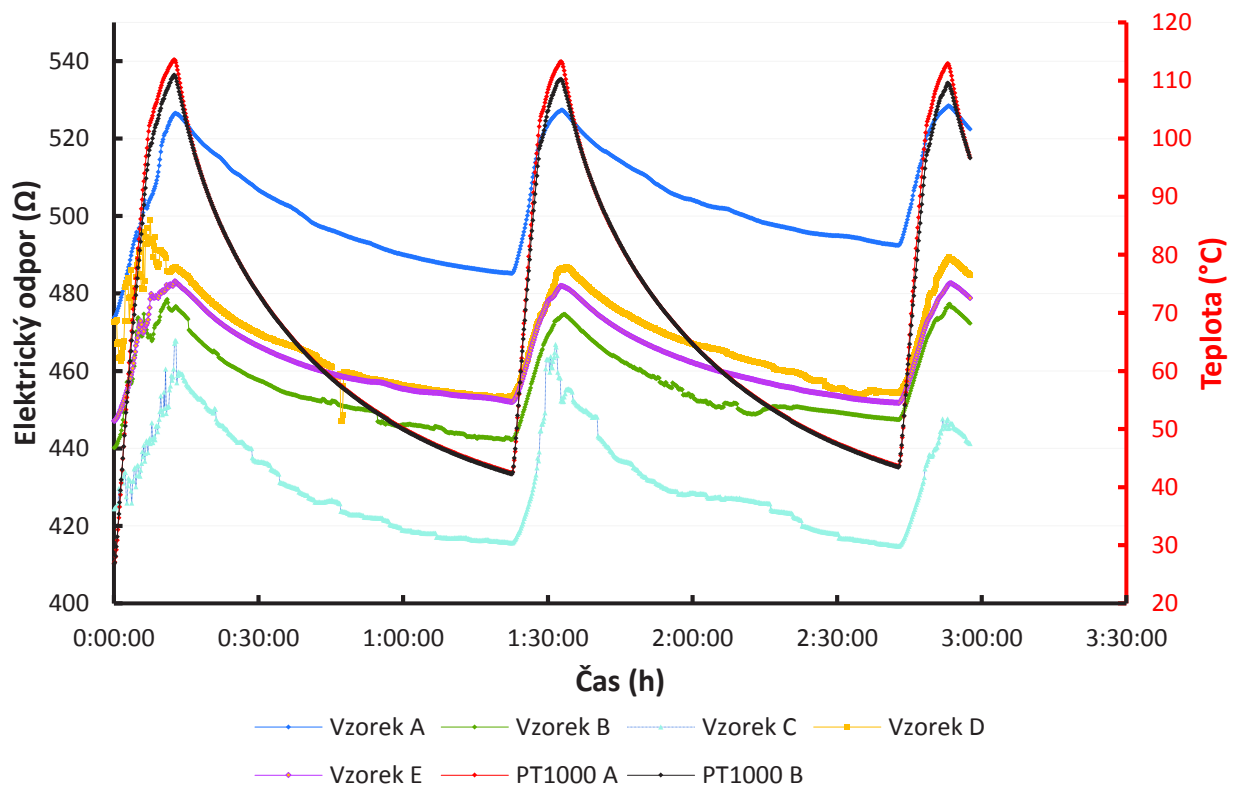
Obr. 4.6 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P02, 53S-Pzar01V1 - Krimp + vodivý silikon (nanesen vertikálně)

Po obou programech testů tepelným cyklováním byly vzorky podrobeny deseti pracím cyklům, jejichž nastavení je blíže popsáno v kapitole 4.5 a následně byly vzorky, u kterých nedošlo po pracích testech k přerušení kontaktu, znovu podrobeny testu tepelného cyklování s průběhem P01. Podoba vzorků po deseti pracích cyklech je vidět na obrázku 4.7, kde je vidět jasný nedostatek této metody kontaktování a to jak pro krimpování, tak pro druky. V případě krimpů bylo potřeba textílii v okolí kontaktu odštíhnout jak již bylo zmíněno dříve z důvodu umístění kontaktního místa do krimpovacích kleští. V případě druků bylo nutné vzorky také rozštíhnout z důvodu přílišné blízkosti kontaktů po připojení kabeláže pro měření. To mělo za následek velké třepení textilního substrátu. Dále na obrázku 4.7, v zakroužkované oblasti vlevo došlo k uvolnění krimpu, pravá vyznačená oblast znázorňuje, že v průběhu pracích cyklů docházelo k náhodnému zapichování krimpů do okolních textílií a docházelo k jejich velkémunamáhání.



Obr. 4.7 – Detail problematických částí kontaktování po 10 pracích cyklech

Nejlépších výsledků bylo dosaženo metodou nakontaktování pomocí druků s naneseným vodivým inkoustem. Tyto kontakty vykazují velmi dobré výsledky i po 10 pracích cyklech, jak je vidět na obrázku 4.8. Dobrých výsledků dosahují i krimpky nanesené na kontakty s naneseným vodivým inkoustem, viz obrázek v příloze.



Obr. 4.8 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 55S-Pzar01V1-Druk+vodivý inkoust

Dalších zajímavých výsledků bylo dosaženo kontaktováním vodivé textilie s 60% Shieldex vlákna a 40% PES, kde bylo dosaženo zaručeně nejčistšího průběhu (kontakt C – světle modrý) pro závislost odporu v závislosti na změně teploty ze všech použitých metod, viz

obrázek P16 v příloze. Tabulka 4.2 znázorňuje kvalitu jednotlivých kontaktů po deseti pracích cyklech, které slouží pro porovnání kvality kontaktů před pracími testy, jejichž shrnutí je uvedeno v tabulce 4.1.

Tabulka. 4.2 – Přehled kvality kontaktu z hlediska odporových šumů po deseti pracích cyklech

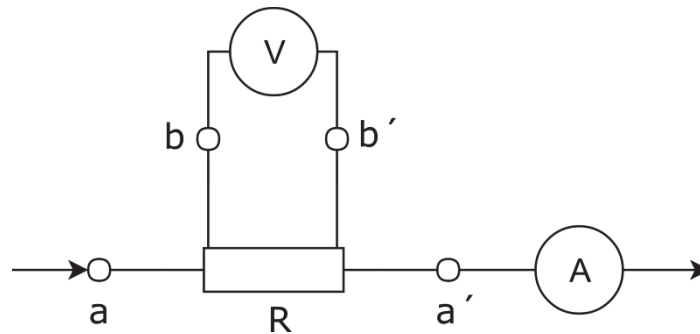
Metoda kontaktování	Kvalita kontaktu				
	A	B	C	D	E
Druky+netkaná Au textilie (shora)	x	Dobrá	Střední	x	Dobrá
Krimp+netkaná Au textilie	Dobrá	Střední	Špatná	Střední	Střední
Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES (shora)	Dobrá	Střední	Střední	Špatná	Střední
Krimp + Cu tafeta	x	x	x	Střední	x
Krimp + vodivý silikon (nanesen vertikálně)	Špatná	x	Špatná	Střední	Špatná
Krimp + vodivý silikon (nanesen horizontálně)	x	x	x	x	x
Druk+vodivý inkoust	Dobrá	Střední	Špatná	Střední	Dobrá
Krimp+vodivý inkoust	Střední	Dobrá	Špatná	Dobrá	x
Druky+netkaná Au textilie (zespod)	Špatná	x	Špatná	x	Špatná
Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES (zespod)	Špatná	Špatná	Dobrá	Špatná	Špatná

Z tabulky 4.2 vycházejí s nejlepšími výsledky metody tisků na plošku s naneseným vodivým inkoustem, podobné vlastnosti vykazuje použití nalisovaného krimpů přes plošku s naneseným vodivým inkoustem. Další potenciálně použitelná je metoda krimpování s připevněnou netkanou textilií, kde došlo k výraznému zlepšení stability kontaktů, než tomu bylo před pracími testy. Dvou dobrých průběhů bylo dosaženo také metodou kontaktování za pomoci tisků s připevněnou netkanou Au textilií z horní strany. Opomenout nelze ani metody za použití vodivé textilie s 60% Shieldex vlákna a 40% PES připevněné tiskem. Grafy pro ostatní vzorky jsou uvedeny v příloze pod označením obrázků P13 – P20, pro tepelné cyklování s programem P01 po 10 pracích cyklech.

4.4 Čtyřbodové měření kontaktního odporu

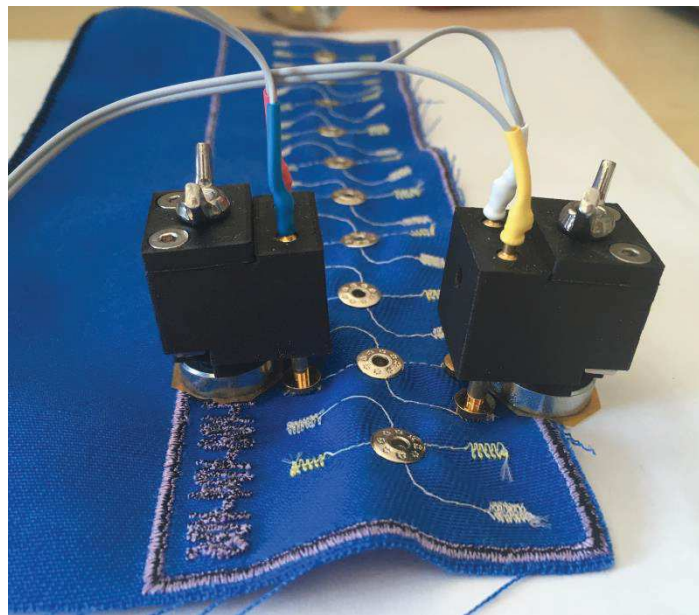
Vzorky s označením 2) byly měřeny čtyřbodově, a protože předpokládané rozmezí měřených hodnot bylo v řádech jednotek až stovek $m\Omega$, byla zvolena právě čtyřbodová metoda měření odporu. Logika čtyřbodového měření vyplývá z následujícího obrázku 4.9, kde vnější kontakty a, a' označovány jako proudové, se připojí sériově do obvodu se zdrojem proudu a mezi vnitřními kontakty b a b' se měří napětí. Odpor v obrázku simuluje prostřední plošku vzorku, kde se překrývají vodivá a sensorová nit. V tomto uspořádání změříme odpor mezi napěťovými kontakty b a b', odpor přívodních vodičů ani přechodový odpor se neuplatní. Pro malé odpory teče voltmetrem velice zanedbatelný proud kvůli jeho velkému vnitřnímu

odporu, oproti proudu tekoucím odporem R a odpory přívodů k voltmetru a kontaktů se tedy neuplatní [52].



Obr. 4.9 – Zapojení měření odporu čtyřbodovou metodou, překresleno z [52]

Reálné měření je pak znázorněno obrázkem 4.10, kde jsou vidět dvě sondy, kterými se měří odpor pomocí dvou pozlacených pružinových jehel. Kontakt pro měření kontaktů je zajištěn pomocí pružinových jehel, které jsou součástí měřících sond. Sondy byly propojeny s měřicím přístrojem Keithley 2701, kde je nutné nastavit pouze snímání čtyřbodového měření odporu.

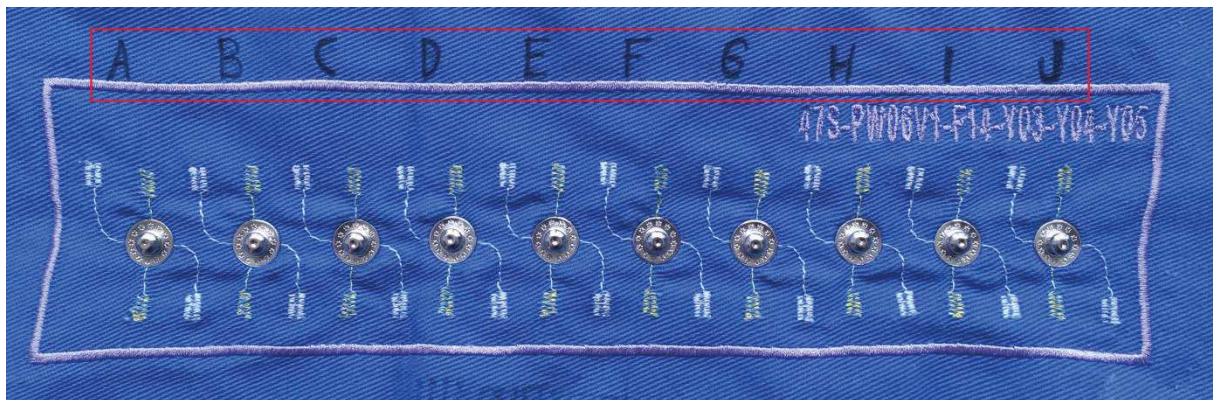


Obr. 4.10 – Měření kontaktního odporu čtyřbodovou metodou

4.5 Výsledky čtyřbodovým měřením odporu

Celkový přehled dosažených výsledků je shrnut v tabulce 1 v příloze, kde jsou uvedena zpracovaná data. U každého kontaktu byl měřen kontaktní odpor pětkrát a z naměřených hodnot byl vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Celý tento proces byl proveden nejdříve před testem pracími cykly a po testu pracími cykly. Vzorky byly před

praním umístěny do polyesterových košíčků kvůli ochraně vzorků před mechanickým poškozením od vývodů krimpů. Praní vzorků proběhlo v deseti cyklech na program pro syntetické textilie při teplotě lázně o 40°C a s rychlostí otáček 400 ot./min. Délka jednoho programu trvala 60 minut. Nejprve bylo provedeno 5 pracích cyklů v řadě, po té byly vzorky vyskládány k sušení na horizontálně přichycené síto přes noc. Další den bylo provedeno dalších 5 pracích cyklů v řadě se stejným způsobem sušení, které trvalo okolo 14 hodin, poté bylo provedeno čtyřbodové měření odporu. Toto testování bylo provedeno z důvodu zjištění odolnosti vybraných kontaktovacích metod proti pracím cyklům a kvůli následnému vyhodnocení změn hodnot kontaktních odporů. Při měření byly nezměřitelné odpory označeny v tabulce symbolem „x“, nestabilní kontakty byly označeny světle červenou barvou a kontakty velmi nestabilní byly označeny barvou sytě červenou. Značení jednotlivých kontaktů na vzorcích bylo tvořeno označením od A do J, jak je znázorněno v červeném obdélníku na obrázku 4.11.



Obr. 4.11 – Znárodnění značení jednotlivých kontaktů na vzorku 47S-PW06V1

Pro metodu kontaktování druků s naneseným vodivým silikonem dosáhly nejlepších výsledků vzorky 47S a 65S. Pro vzorek 47S se jedná o rozmezí hodnot aritmetických průměrů naměřených odporů od 1,77 m Ω do 3,44 m Ω s rozptylem od 0,86 m Ω do 1,77 m Ω . Pro vzorek 65S bylo naměřeno rozmezí odporů od 4,2 m Ω do 5,2 m Ω s rozptylkou 0,36 m Ω do 1,37 m Ω .

Metodou za použití druků s vodivým inkoustem bylo dosaženo nejlepších výsledků u vzorku 47S, kde bylo dosaženo rozsahu z průměrných hodnot od 1,78 m Ω do 2,56 m Ω s rozptylem do 1 m Ω . Pro vzorek 57S jsou hodnoty také přijatelné (do 5 m Ω), ale 2 z 5 kontaktů byly přerušeny. Rozptyl z naměřených hodnot se pohyboval od 1,1 m Ω do 1,84 m Ω .

Pro kontaktování druky s připevněnou vodivou Cu tafetou bylo dosaženo nejlepších výsledků u vzorku 63S, kde se bylo naměřeno rozmezí hodnot aritmetických průměrů naměřených odporů od 1,5 mΩ do 2,7 mΩ, s tím že byly přerušeny 2 z 5 kontaktů. Dobrých výsledků bylo dosaženo také u vzorku 46S, kde se rozmezí hodnot pohybuje od 4,04 mΩ do 5,22 mΩ s rozptylem od 1,46 mΩ do 2,47 mΩ.

Metodou kontaktování druků s použitím netkané Ag textilie bylo dosaženo nejnižších hodnot odporu u vzorku 63S s rozmezím od 1,5 mΩ do 4 mΩ a rozptylem do 1 mΩ.

Poslední zkoušenou metodou bylo odporové sváření, kde nebylo dosaženo téměř žádných akceptovatelných výsledků. Na vzorku 58S-PW05V2 byly zkoušeny svařit pouze kontaktní plochy pomocí dvou elektrod ale ani jeden kontaktní odpor se nepodařilo naměřit. V druhém případě bylo vyzkoušeno přivaření dvou měděných drátků pro zlepšení vodivosti, ale byly naměřeny pouze dva kontakty z deseti s průměry hodnot odporu 69 mΩ a 80mΩ. Špatné výsledky této metody mohly být způsobeny nesprávným nastavením velikosti svařovaného proudu, ale i s nastavenou hodnotou proudu na přibližných 250 A, kdy docházelo k jiskření a propalování v místě svařování. Tato metoda není tedy příliš šetrná k vyšším kontaktním plochám.

5 Závěr

Tato práce poskytuje ucelený přehled o problematice smart textilií, jejich aplikacích a materiálech využívaných v této oblasti. Dále poskytuje zmapování dostupných metod a technik kontaktování elektronických funkčních prvků integrovaných do textilií a jejich následné zhodnocení.

Nalézt podrobné informace o relevantních technikách kontaktování funkčních prvků současných technologií smart textilií je velmi problematické, protože společnosti nebo vědecké ústavy, které vynaleznou nadějně technologie a postupy většinou informace neposkytnou veřejně. V současné době je stále snaha vynalézt lepší řešení pro kontaktování, protože dosud nebyl vynalezen odolný a spolehlivý kontakt, který by možné vyrábět sériově. Dostupné informace jsou převážně zastaralé a v komerčních aplikacích mají limitované využití.

V této práci byly vybrány metody drukování, krimpování a odporové sváření, které byly otestovány na navržených testovacích vzorcích. První část testování byla zaměřena na kontaktování, kde první typ navrženého testovacího vzorku simuluje teplotní vyšitý senzor. Zde bylo dosaženo nejlepších výsledků metodami kontaktování pomocí připevnění druků nebo krimpů na kontaktní vyšitou plošku pokrytou vodivým inkoustem. V tomto případě byly vždy aplikovány kontaktovací prvky až po vytvrzení inkoustu. V dalším výzkumu bych doporučil otestovat i jiný postup, kde by se nanesl vodivý inkoust na kontaktovací plošku, poté by byl připevněn kontaktovací prvek (krimp nebo druk) a poté by se dal vzorek do tepelné komory na vytvrzení vodivého inkoustu.

Z tabulky 4.2, ve které jsou shrnuty výsledky testu tepelného cyklování po 10 pracích cyklech, vycházejí s nejlepšími výsledky metody kontaktování druků na plošku s naneseným vodivým inkoustem, podobné vlastnosti vykazuje i použití nalisovaného krimpu přes plošku s naneseným vodivým inkoustem. Další potencionálně použitelná je metoda krimpování s připevněnou netkanou textilií, kde došlo k výraznému zlepšení stability kontaktů, než tomu bylo před pracími testy. Dvou dobrých průběhů bylo také dosaženo metodou kontaktování za pomoci druků s netkanou Au textilií, která byla připevněna z horní strany. Opomenout nelze ani metody s použitím vodivé textilie s 60% Shieldex vlákna a 40% PES připevněné drukem. Nedostatkem byla nutnost rozstříhávání vzorků, aby bylo možné je nakontaktovat pomocí krimpů. Problém pak nastával při praní, kde docházelo k velkému namáhání jak na samotné krimpy, které byly převážně po praní ohnuté, ojediněle dokonce odtržené, tak i na samotnou

textilii, kde došlo k vytrhávání vláken v okolí kontaktů. Pro tuto problematiku bych navrhoval řešit buď úpravu nosné textilie v okolí kontaktů zapožitím jemnou nití, aby nedošlo k omezení přítláčné síly při krimpování nebo dalším možným řešením by mohla být úprava samotného krimpovacího zařízení, kde by bylo umožněno krimpování do středu textilie a ne jen na její okraje.

V druhé části praktické části byla provedena testování, která se věnovala kvalitě elektrického kontaktu pomocí čtyřbodového měření. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s nakontaktováním pomocí druků s naneseným vodivým inkoustem a vodivým silikonem na vzorek s variantou přešití nití s označením PW06V1, kde se pohybovaly hodnoty kontaktního odporu v rozmezí od 1,7 m Ω do 3,4 m Ω s rozptylem do 2,2 m Ω . Dobrých výsledků bylo dosaženo také u vzorku s nalisovanými druky a variantou přešití PW02V2 za použití Cu tafety a netkané Au textilie, kde bylo dosaženo kontaktního odporu v rozmezí od 1,5 m Ω do 4 m Ω s rozptylem do 2,2 m Ω . U některých vzorků docházelo k přerušení kontaktů po pracích testech, a proto bych doporučoval provést analýzu přetržených vláken konfokálním mikroskopem případně pomocí rentgenových snímků.

V rešeršní části této práce byla shrnuta problematika smart textilií, jejich aplikací a materiálů využitých v této oblasti. V kapitole 2 byla provedena rešerše dostupných metod a technik kontaktování elektronicky funkčních prvků integrovaných do textilií a tyto metody byly zhodnoceny v tabulce 2.6. V praktické části je v kapitole 3 popsán návrh a realizace testovacích vzorků (demonstrátoru), pro které byly navrženy metody kontaktování. V kapitole 4 je popsáno měření a testování realizovaných testovacích vzorků i s diskuzí výsledků vždy na konci podkapitoly pro daný typ měření.

Seznam literatury

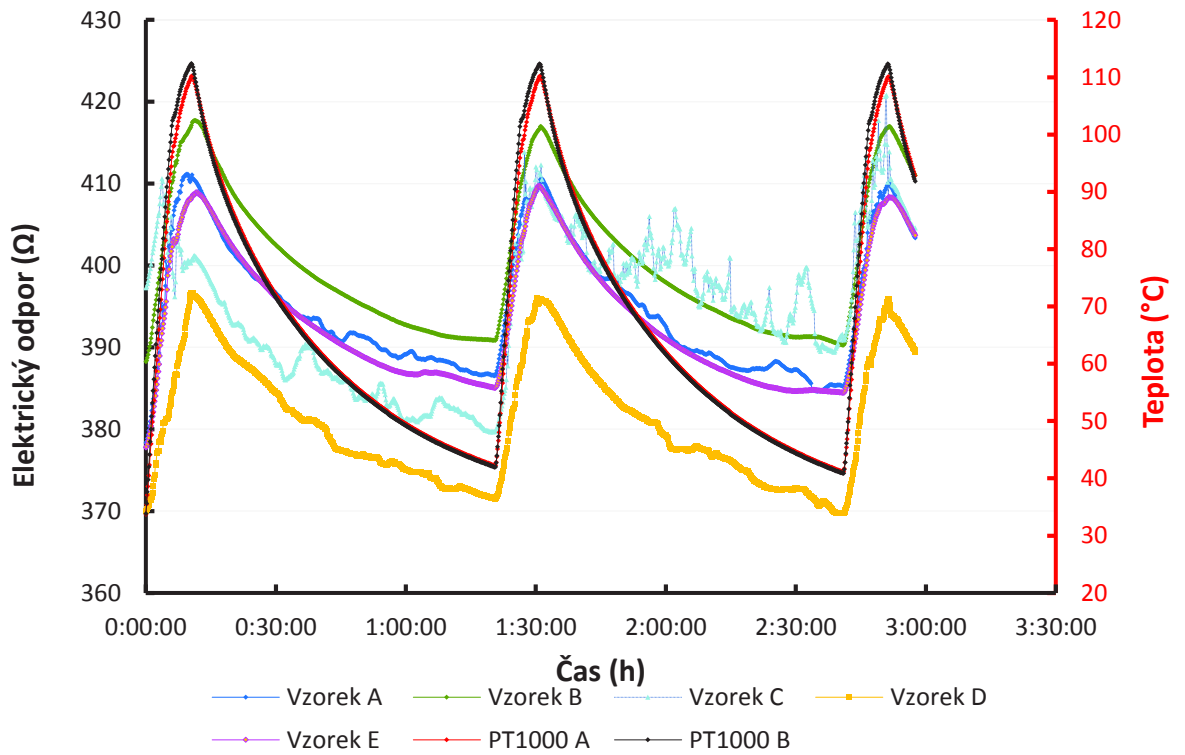
- [1] Smart Textile.Technicaltextile[online]. 2005,2005, 21 [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: http://www.technicaltextile.net/articles/sport-textiles/detail.aspx?article_id=2592&pageno=1
- [2] SCHNEEGASS, Stefan a Oliver AMFT, ed.SmartTextiles[online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2017-11-18]. Human–ComputerInteractionSeries. ISBN 978-3-319-50123-9.
- [3] HUNDE DADI, Henock. Literatureoverviewof Smart textiles.Diploma thesis. 2010,2010(1), 53.
- [4] ZHANG, X., Tao, X., 2001a, Smart Textiles: Passive Smart, Active Smart, Very Smart. TextilesAsia, June 2001
- [5] Vývojové trendy textilního a oděvního oboru. Metodický inspiromat [online]. 2015, 2015,55[cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.nuv.cz/pospolu/vyvojove-trendy-textilniho-a-odevniho-oboru-odborny>
- [6] Smart Textiles [online]. 2010, 2010, 15 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://tectextnu.wordpress.com/2010/02/11/introduction/>
- [7] SARIF ULLAH PATWARY, MdSyduzzaman. Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview.Journalof Textile Science &Engineering[online]. 2015,05(01), - [cit. 2017-11-16]. DOI: 10.4172/2165-8064.1000181. ISSN 21658064. Dostupné z: <http://omicsgroup.org/journals/smart-textiles-and-nanotechnology-a-general-overview-2165-8064.1000181.php?aid=40254>
- [8] FARID., M.M., et al, 2004. A review on phasechangeenergystorage: materials and applications. EnergyConservation and management, Vol 45, pp1597-615
- [9] LAM PO TANG, S., STYLIOS, G., 2005. Anoverviewofsmarttechnologiesforclothingdesign and engineering. International JournalofClothing Science and Technology, Vol. 18 No. 2, 2006, pp 108-128
- [10] CHAN Vili, Y., 2007. Investigating Smart TextilesBased on ShapeMemoryMaterials. Textile ResearchJournal, 2007, 77, 290
- [11] RUSSELL, D. A., HAYASHI, S., YAMADA, T., 1999. ThepotentialusesofShapeMemoryFilm in Clothing. Techtexile 1999, Frankfurt 12-16 May 1999
- [12] HUANG, W.M., Z. DING, C.C. WANG, J. WEI, Y. ZHAO a H. PURNAWALI. Shapememorymaterials.MaterialsToday[online]. 2010,13(7-8), 54-61 [cit. 2017-11-17]. DOI: 10.1016/S1369-7021(10)70128-0. ISSN 13697021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702110701280>
- [13] TANAKA, Y., et al. “FerrousPolycrystallineShape-MemoryAlloyShowingHuge Superelasticity.” Science, vol. 327, no. 5972, 2010, pp. 1488–1490.JSTOR, JSTOR, www.jstor.org/stable/40544710.
- [14] ANDREONI, Giuseppe, Carlo STANDOLI a Paolo PEREGO. DefiningRequirements and RelatedMethodsforDesigningSensorizedGarments. Sensors [online]. 2016, 16(6), 769- [cit. 2017-11-19]. DOI: 10.3390/s16060769. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/769>
- [15] ANWAR, Sikander. ManufacturingofElectronic Textile. Textile learner [online]. , 3 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/7124/manufacturing-of-electronic-textile?page=1>

- [16] Conductive And Conformable. In: [Http://www.textileworld.com](http://www.textileworld.com) [online]. USA, 2010 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://www.textileworld.com/textile-world/quality-fabric-of-the-month/2010/09/conductive-and-conformable/>
- [17] TAO, XIAOMING, ed. Handbook of Smart Textiles [online]. Singapore: Springer Singapore, 2015 [cit. 2017-11-19]. ISBN 978-981-4451-44-4.
- [18] COCHRANE, C., Koncar, V., LEWANDOWSKI, M., DUFOUR, C., 2007. Design and Development of a Flexible Strain Sensor for Textile structures Based on a conductive polymer composite. *Sensors* 2007, 7, pp 473-492
- [19] E-Textiles 2017-2027: Technologies, Markets, Players [online]. 2017, 2017 [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <https://www.idtechex.com/research/reports/e-textiles-2017-2027-technologies-markets-players-000522.asp?viewopt=desc>
- [20] AmeriResearch Inc. Smart Textiles Market To 2024 [online]. 2017, , 240 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <https://www.ameriresearch.com/product/smart-textiles-market-to-2024-in-depth-market-view-key-product-categories-technologies-product-pipeline-top-players-company-share-competitive-dynamics-end-market-mix-technology-outlook-gr-2/>
- [21] KREMENÁKOVÁ D., MILITKÝ J., ŠESTÁK J. Eds: Vlákenné struktury pro speciální aplikace, nakladatelství ZČU Plzeň, 2013, ISBN 978-80-87269-32-9
- [22] Conductive And Conformable. In: [Http://www.textileworld.com](http://www.textileworld.com) [online]. USA, 2010 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://www.textileworld.com/textile-world/quality-fabric-of-the-month/2010/09/conductive-and-conformable/>
- [23] THAKUR, Suman. ShapeMemoryPolymersfor Smart Textile Applications. KUMAR, Bipin a Suman THAKUR, ed. TextilesforAdvancedApplications [online]. InTech, 2017 [cit. 2017-11-29]. DOI: 10.5772/intechopen.69742. ISBN 978-953-51-3500-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/textiles-for-advanced-applications/shape-memory-polymers-for-smart-textile-applications>
- [26] EUFIGER, Karin. Standardizationofsmarttextiles and wearableintelligence [online]. In: . 2016, s. 34 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: http://www.centexbel.be/files/extra/Standardisation_smart-textiles-wearable-intelligence_20161014.pdf
- [24] STOPPA, Matteo a Alessandro CHIOLERIO. WearableElectronics and Smart Textiles: A CriticalReview. *Sensors* [online]. 2014, 14(7), 11957-11992 [cit. 2017-12-04]. DOI: 10.3390/s140711957. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/11957/>
- [25] BEHL, M., K. KRATZ, U. NOECHEL, T. SAUTER a A. LENDLEIN. Temperature-memory polymer actuators. *ProceedingsoftheNationalAcademyofSciences* [online]. 2013, 110(31), 12555-12559 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.1073/pnas.1301895110. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1301895110>
- [26] MOHD JANI, Jaronie, Martin LEARY, Aleksandar SUBIC a Mark A. GIBSON. A reviewofshapememoryalloyresearch, applications and opportunities. *Materials& Design* (1980-2015) [online]. 2014, 56, 1078-1113 [cit. 2017-12-19]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913011345>
- [27] MACHEK, Václav. KOVOVÉ MATERIÁLY S TVAROVOU PAMĚTÍ [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/strojnarstvo-extra/2742-kovove-materialy-s-tvarovou-pameti>
- [28] PrintedWearables: ElectronicInksfortheWearableWorld [online]. In: . 2014, s. 14 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/DuPont-Electronic-Inks-for-the-Wearable-World.pdf>
- [29] Inventors and inventions. Vol.2Singapore: MarshallCavendish, 2008. ISBN 978-0761477617. (2008)

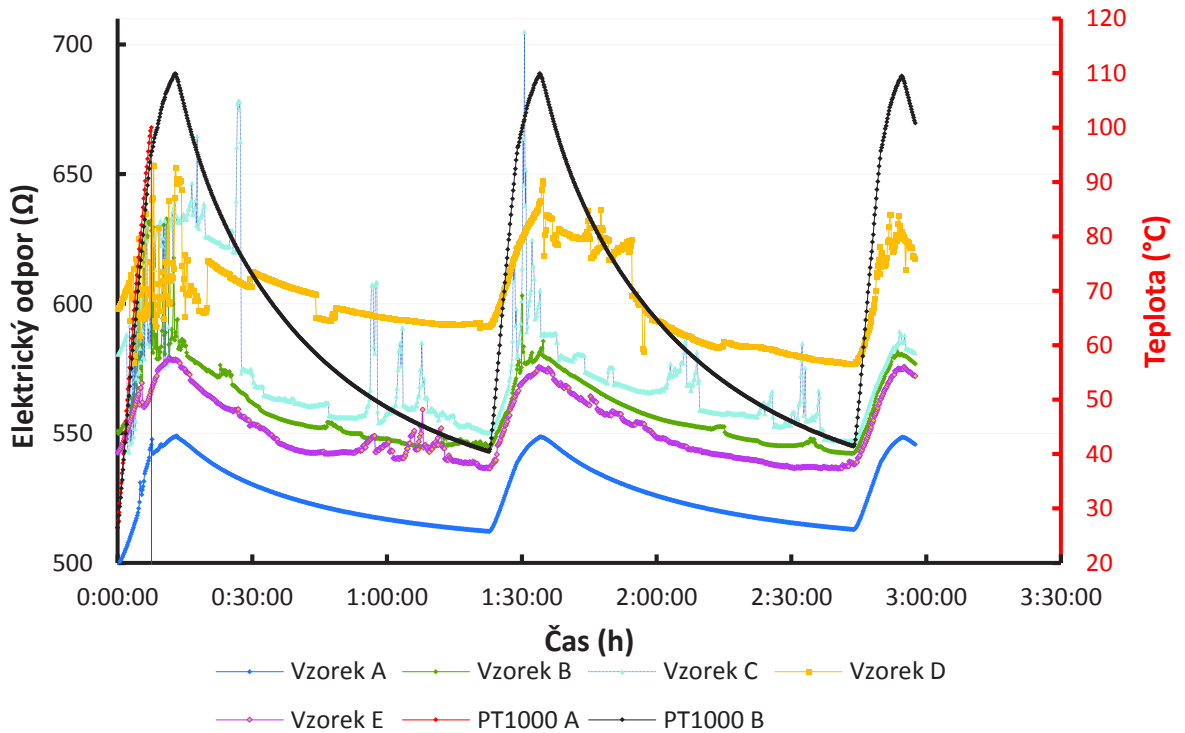
- [30] NANDA, G.: Accessorizing with networks. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology (2005)
- [31] SEAGER, R., CHAURAYA, A., ZHANG, S., WHITTOW, W., VARDAXOGLU, Y.: Flexible radio frequency connectors for textile electronics. *Electron. Lett.* 49(2), 1371–1373 (2013)
- [32] LINZ, T., KALLMAYER, C., ASCHENBRENNER, R., REICHL, H.: New interconnection technologies for the integration of electronics on textile substrates. *Ambience 2005* (2005)
- [33] SCHEULEN, K., SCHWARZ, A., JOCKENHOEVEL, S.: Reversible contacting of smart textiles with adhesive bonded magnets. In: *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers. ISWC'13*, New York, NY, USA, ACM, pp. 131–132 (2013)
- [34] RIGHETTI, X., THALMANN, D.: Proposition of a modular i2c-based wearable architecture. In: *MELECON 2010 – 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp. 802–805 (2010)
- [35] Ohmatex washable connector. www.ohmatex.dk [online]. [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.ohmatex.dk/shop/connectors/washable-textile-connector/>
- [36] WILSON, T., SLADE, J.: Development of non-standard wearable connectors for a USB 2.0 textile cable. Technical report, DTIC Document (2006)
- [37] Hayeon: How to connect conductive thread ribbon cable with Flexible Flat Cable (FFC) connectors., 20 December 2015. <http://www.instructables.com/id/How-to-connect-conductive-thread-ribbon-cable-with/>
- [38] HARMAN, G.G.: *Wire Bonding in Microelectronics*, 3rd edn. McGraw-Hill, New York (2010)
- [39] RUSSELL, S.: *Handbook of Nonwovens*. Woodhead Publishing, Cambridge (2006)
- [40] MEI, Z., HUA, F., GLAZER, J., KEY, C.: Low temperature soldering. In: *Twenty-First IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, 1997, pp. 463–476 (1997)
- [41] GLAZER, J.: Metallurgy of low temperature Pb-free solders for electronic assembly. *Intern. Mater. Rev.* 40(2), 65–93 (1995)
- [42] KINLOCH, A.: *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Springer Science & Business Media, Heidelberg (2012)
- [43] LINZ, Torsten, Malte VON KRSHIWOBLOZKI, Hans WALTER a Philipp FOERSTER. Contacting electronics to fabric circuits with nonconductive adhesive bonding. *Journal of the Textile Institute* [online]. 2012, 103(10), 1139–1150 [cit. 2018-02-14]. DOI: 10.1080/00405000.2012.664867. ISSN 0040-5000. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000.2012.664867>
- [44] LINZ, Torsten. Analysis of Failure Mechanisms of Machine Embroidered Electrical Contacts and Solutions for Improved Reliability [online]. University of Gent, 2011 [cit. 2018-02-15].
- [45] ADÁMEK A SPOL., Martin. Pájení v elektrotechnické výrobě Kontrola jakosti spojů [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, , 14 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf
- [46] DOC. ING. HYNEK, Martin, PhD. a kolektiv. Ultrazvukové svařování [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/2-06-41.pdf>
- [47] Pájení. In: *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1jen%C3%AD>
- [48] Elektrické odporové svařování. eluc.kr-olomoucky.cz [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1808>

- [49] Technologie s vyšší koncentrací tepla [online]. In: . Technická univerzita v Liberci, s. 48 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD12_prezetace.pdf
- [50] Ultrazvukové svařování plastů – princip. [Http://ultratech.cz](http://ultratech.cz) [online]. 2014 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://ultratech.cz/ultrazvukove-aplikace/ultrazvukove-svarovani-plastu/>
- [51] VON KRSHIWOBLOZKI, Malte, Torsten LINZ, Andreas NEUDECK a Christine KALLMAYER. Electronics in Textiles – Adhesive Bonding Technology for Reliably Embedding Electronic Modules into Textile Circuits. *Advances in Science and Technology* [online]. 2012, 85, 1-10 [cit. 2018-03-16]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.85.1. ISSN 1662-0356. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AST.85.1>
- [52] BROŽEK, Pavel. Měření malých odporů [online]. In: . s. 6 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.pavelbrozek.com/verejne_soubory/PraktikaII/4.%20M%EC%F8en%ED%20mal%FDch%20odpor%F9.pdf

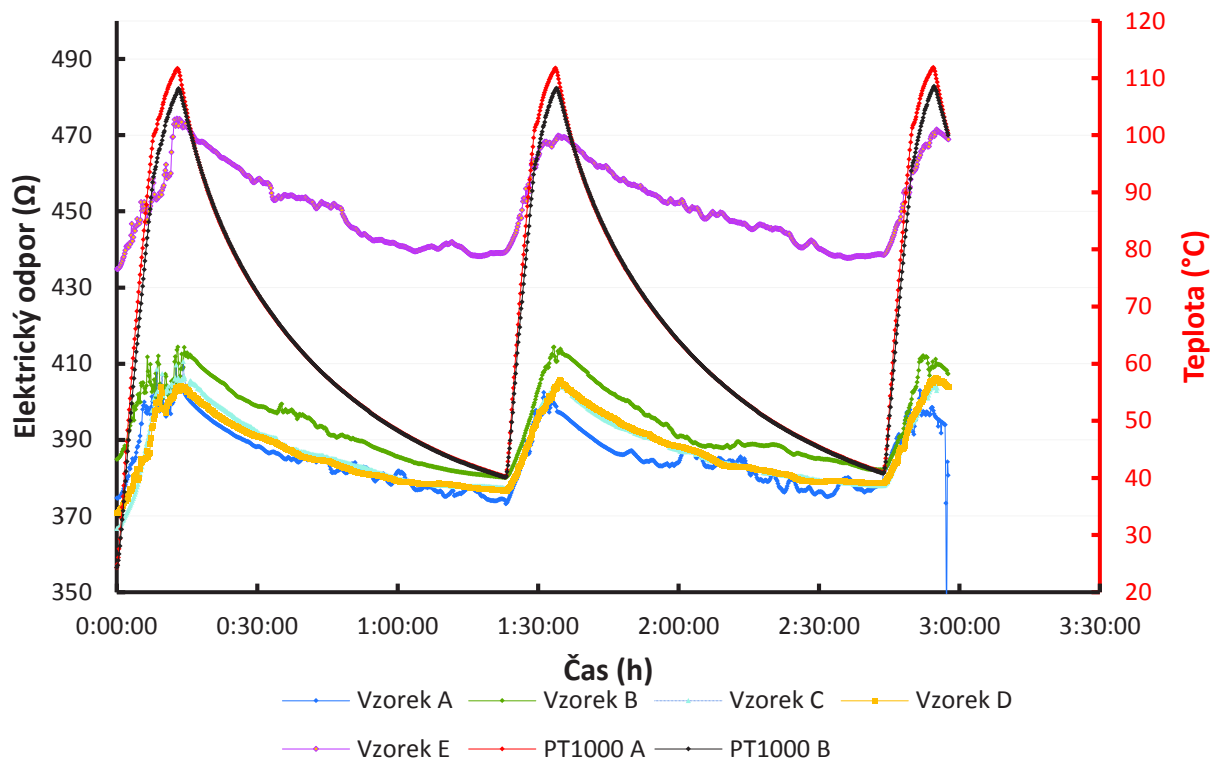
Přílohy



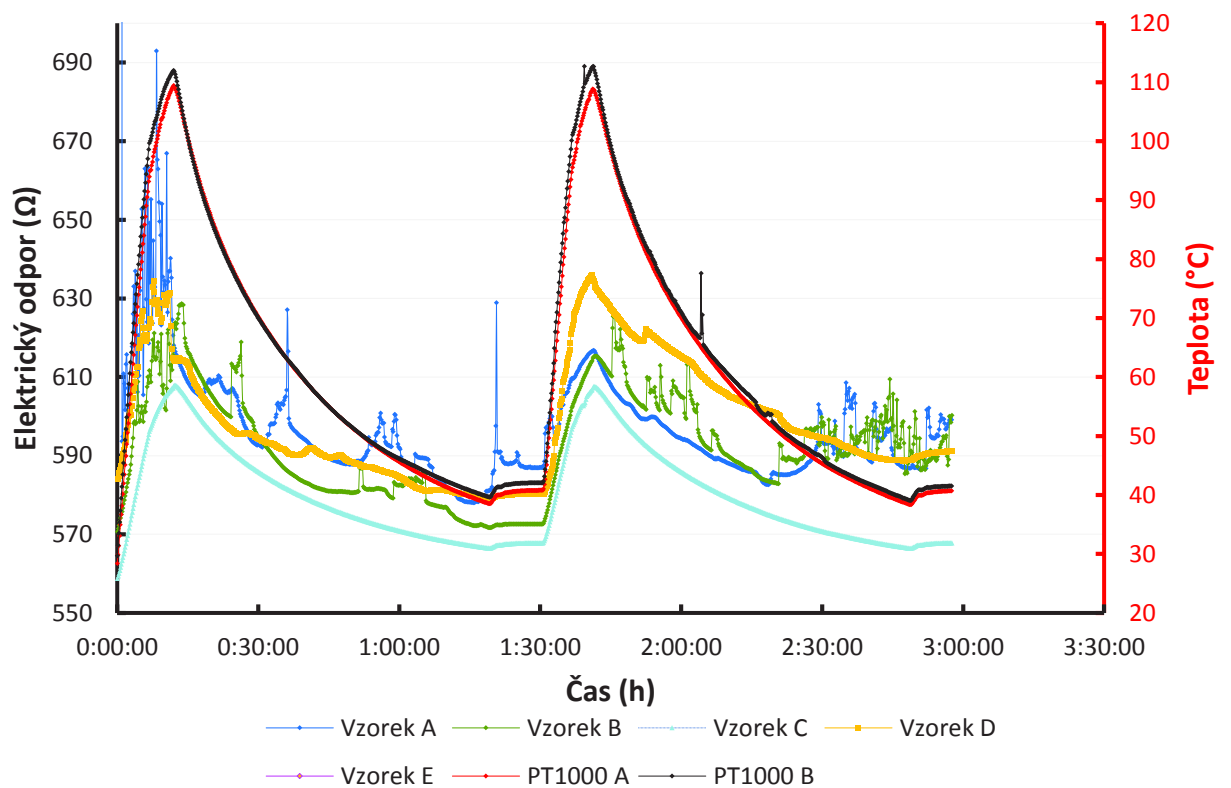
Obr. P1 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 50S-Pzk01V1-Druky+netkaná Au textilie (přípevněna shora)



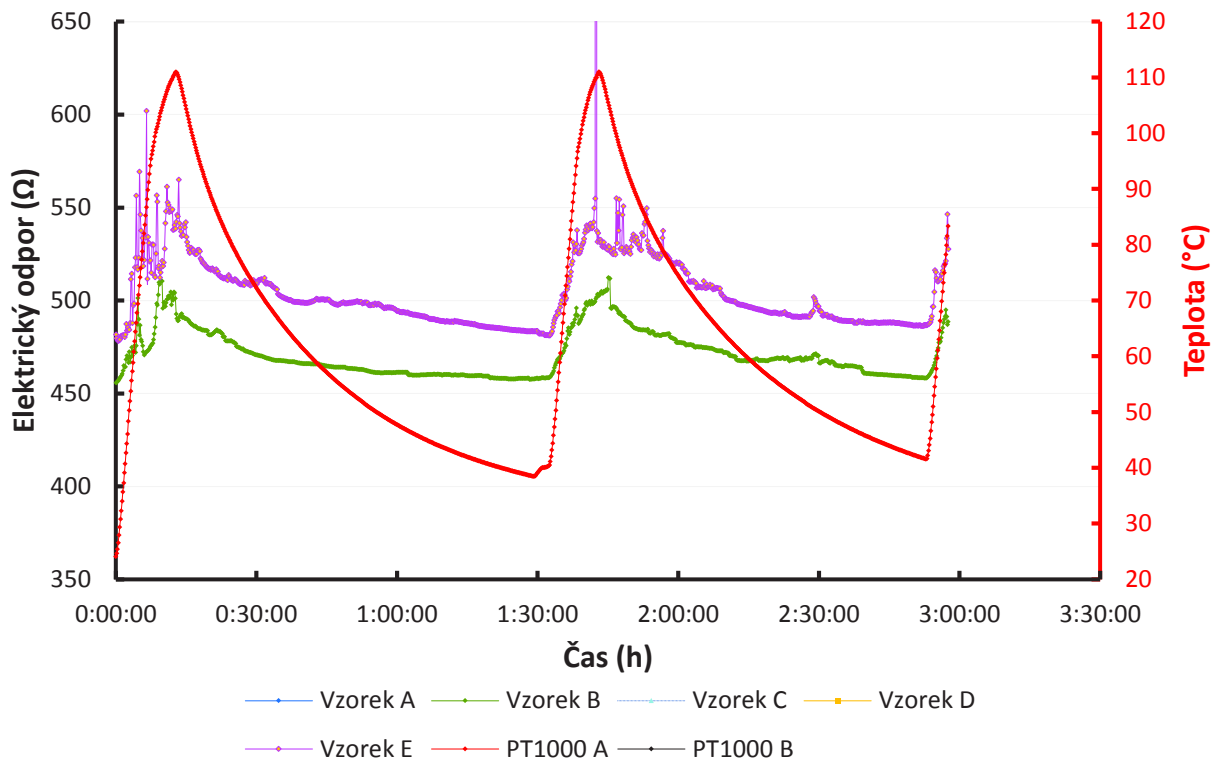
Obr. P2 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 50S-Pzar01V1-Krimp+netkaná Au textilie



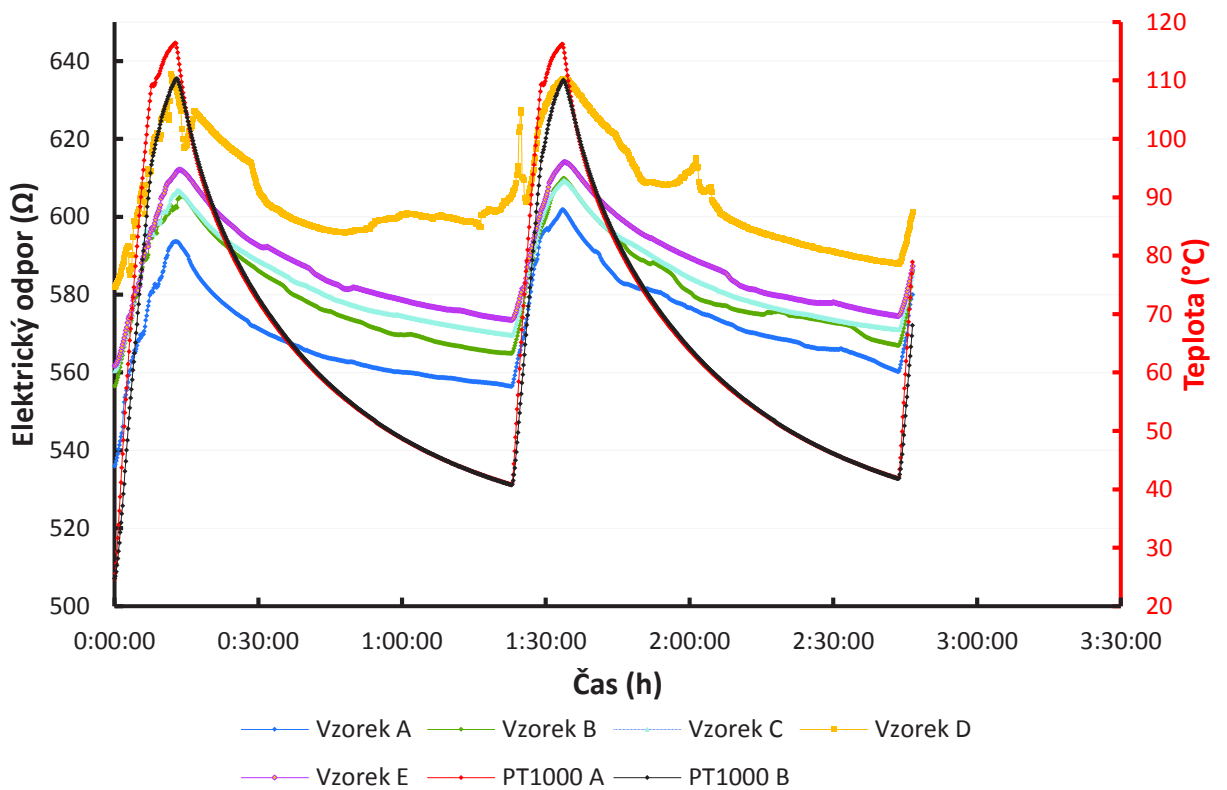
Obr. P3 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 51S-Pzar01V1-Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES (přípevněna shora)



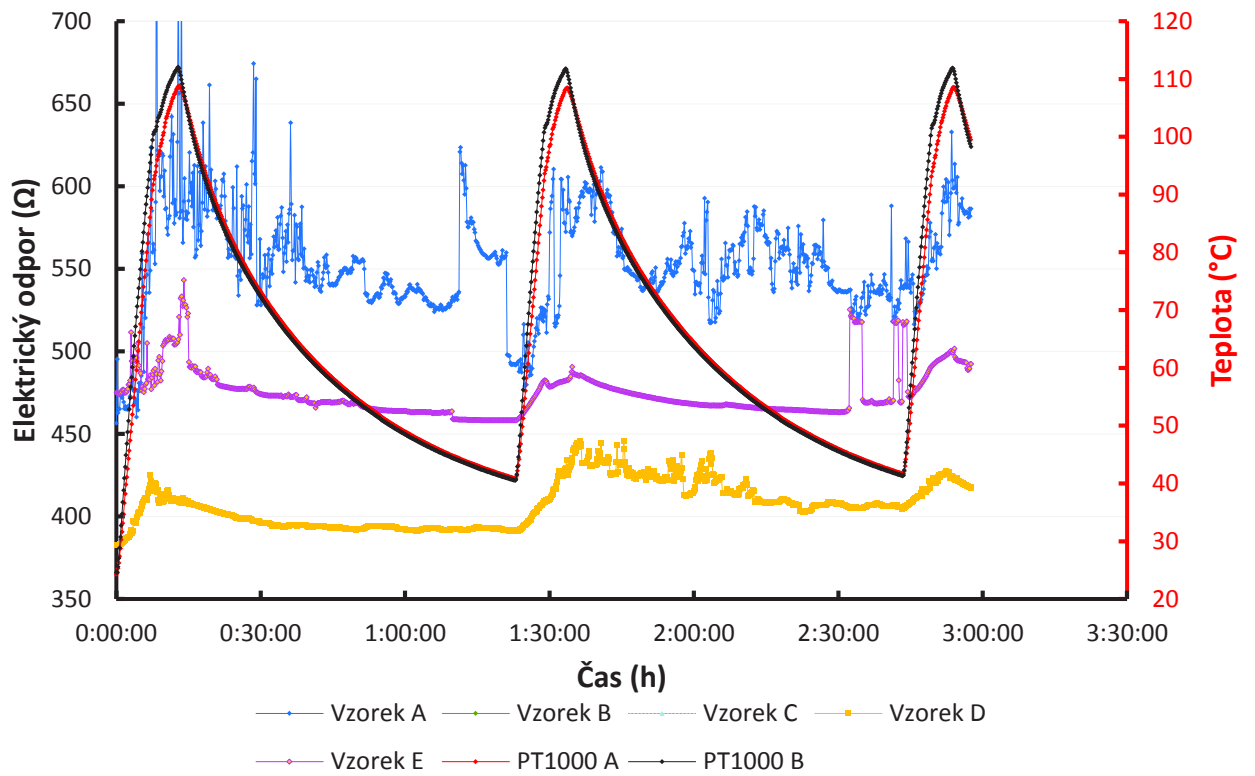
Obr. P4 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 52S-Pzar01V1-Krimp + Cu tafetta



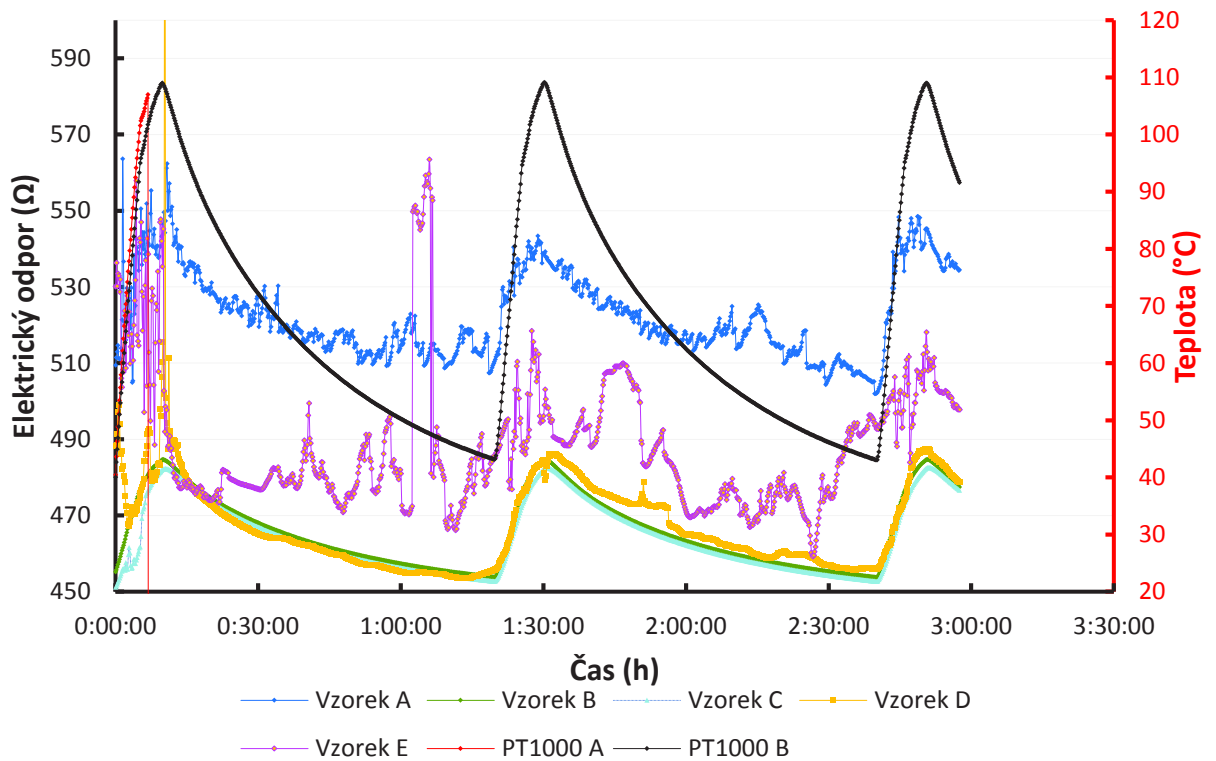
Obr. P5 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 54S-Pzar01V1 - Krimp + vodivý silikon (nanesen horizontálně - dvě linky)



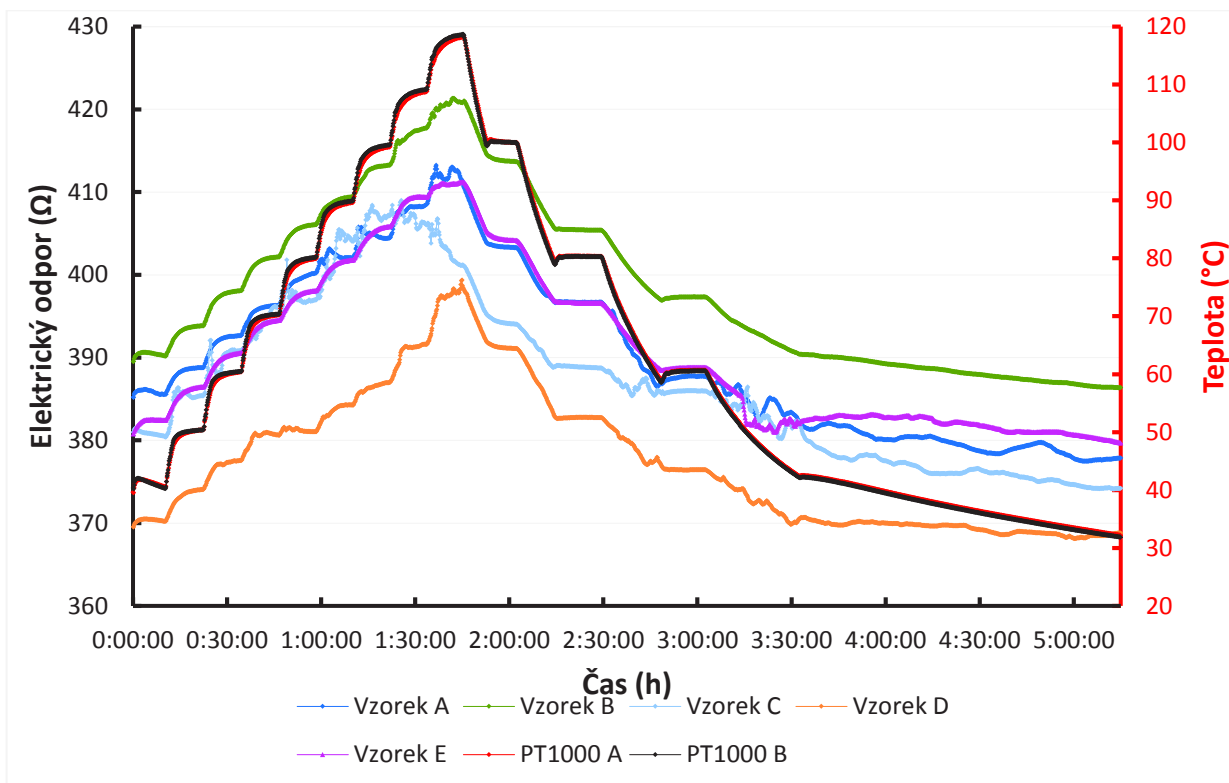
Obr. P6 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 59S-Pzar01V1-Krimp+vodivý inkoust



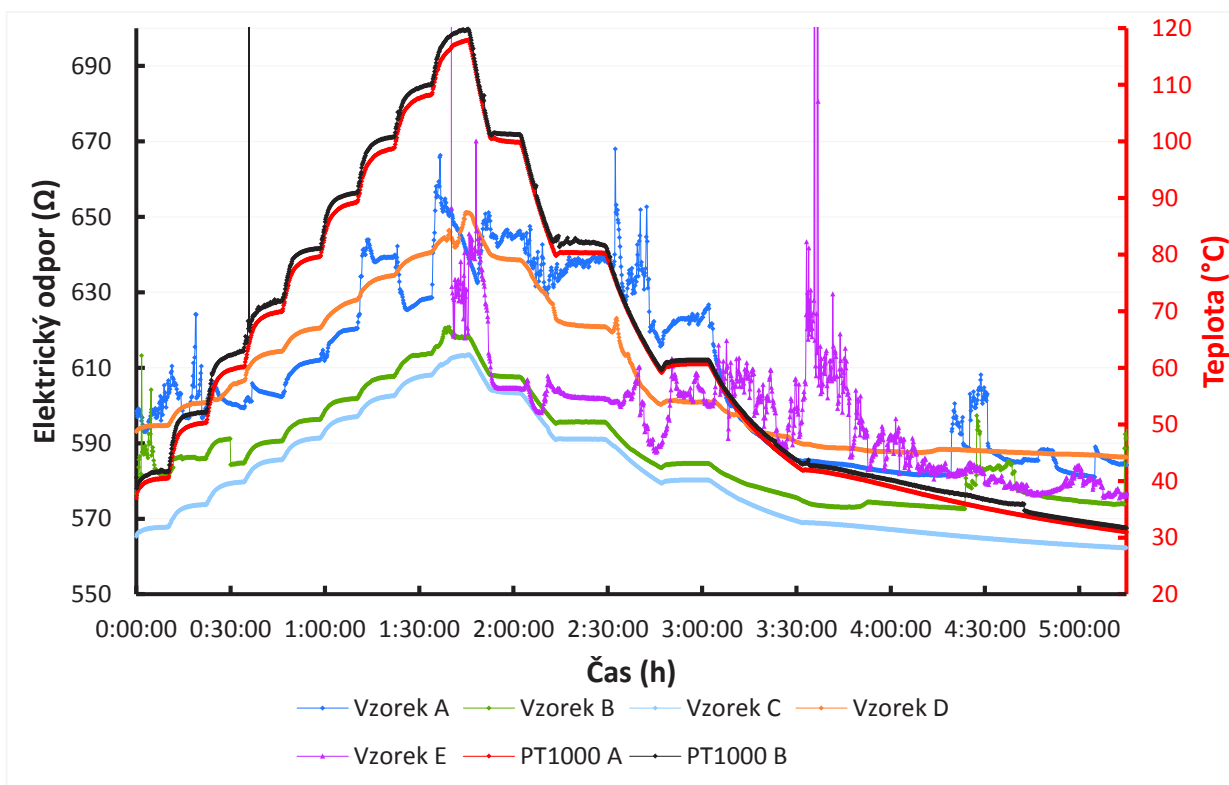
Obr. P7 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 60S-Pzar01V1-Druky+netkaná Au textilie (přípevněna zespod)



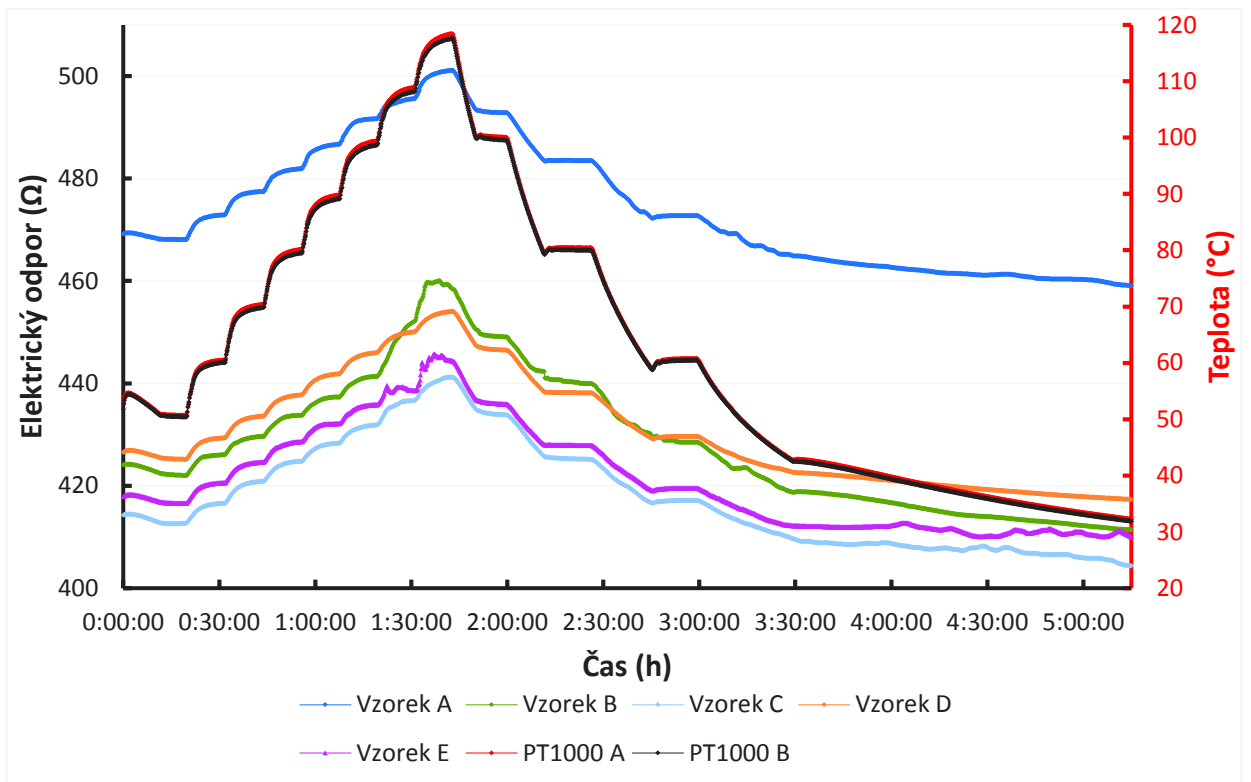
Obr. P8 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01, 61S-Pzar01V1-Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES (přípevněna zespod)



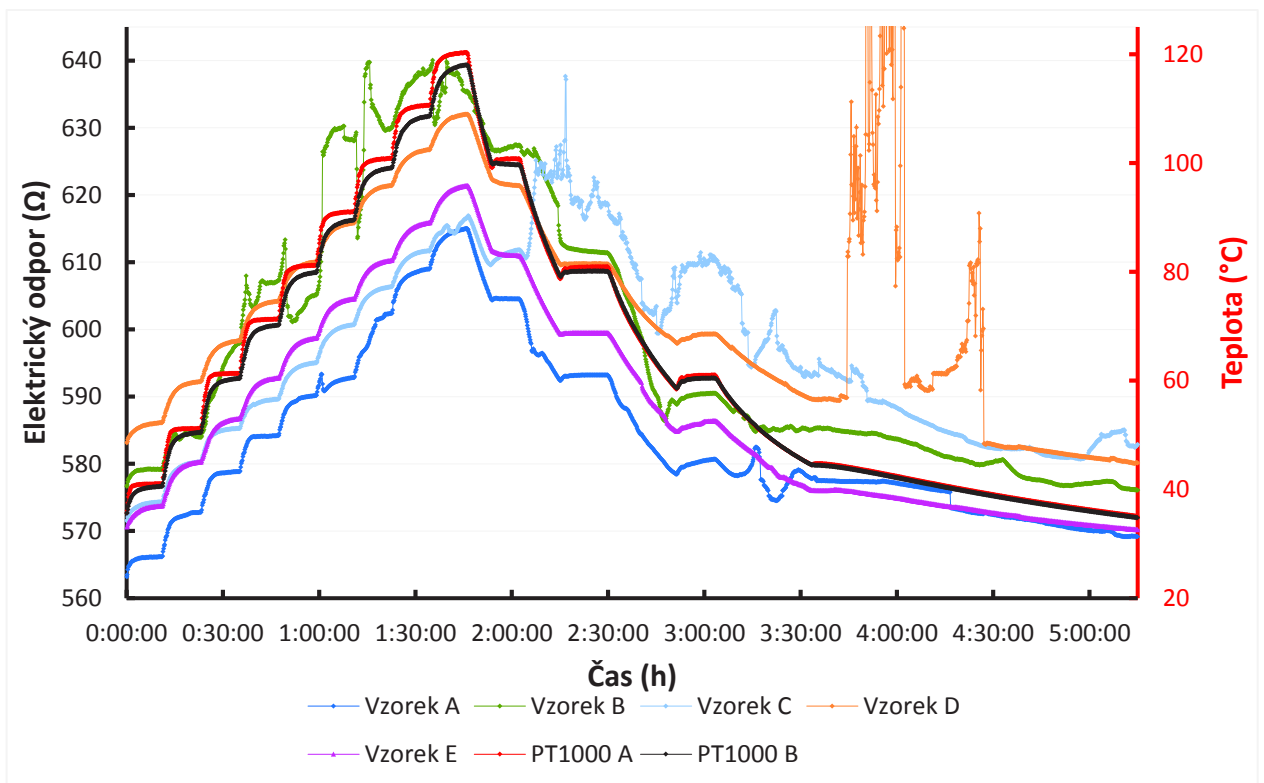
Obr. P9 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P02, 50S-Pzk01V1-Druky+netkaná Au textilie (přípevněna shora)



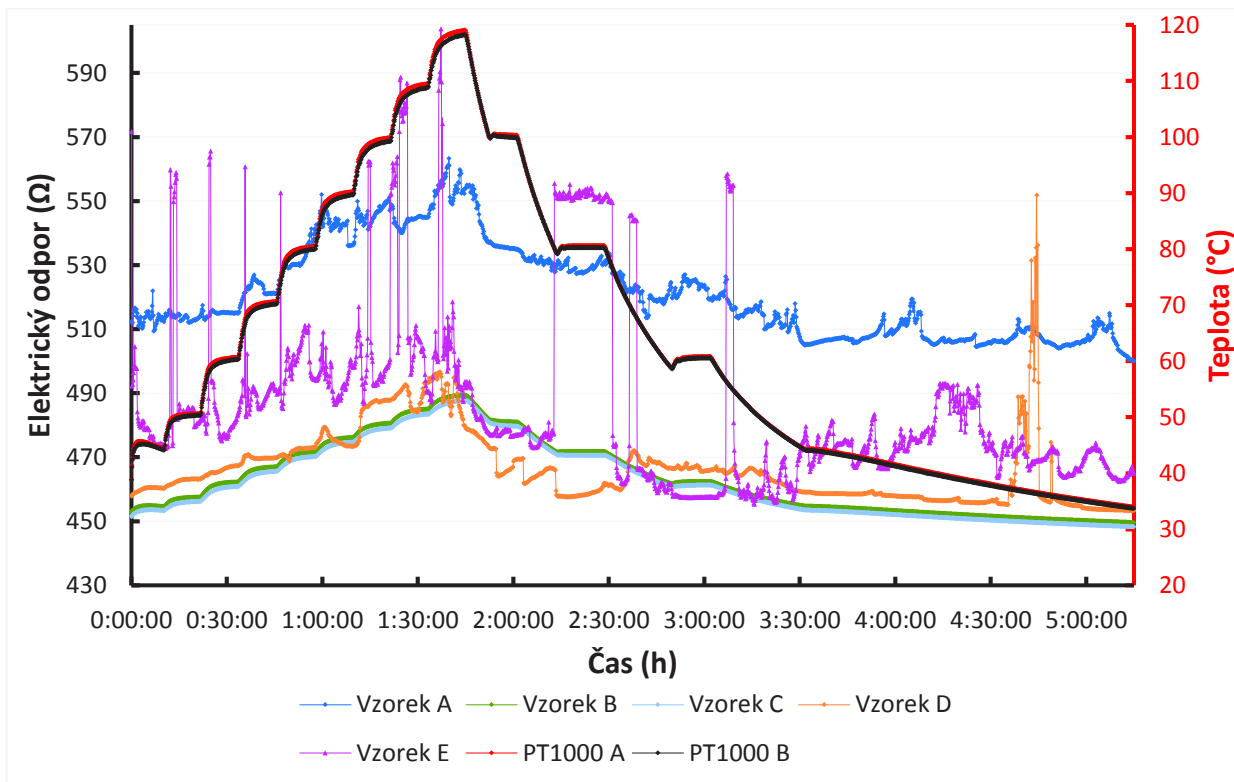
Obr. P10 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P02, 52S-Pzar01V1-Cu tafetta



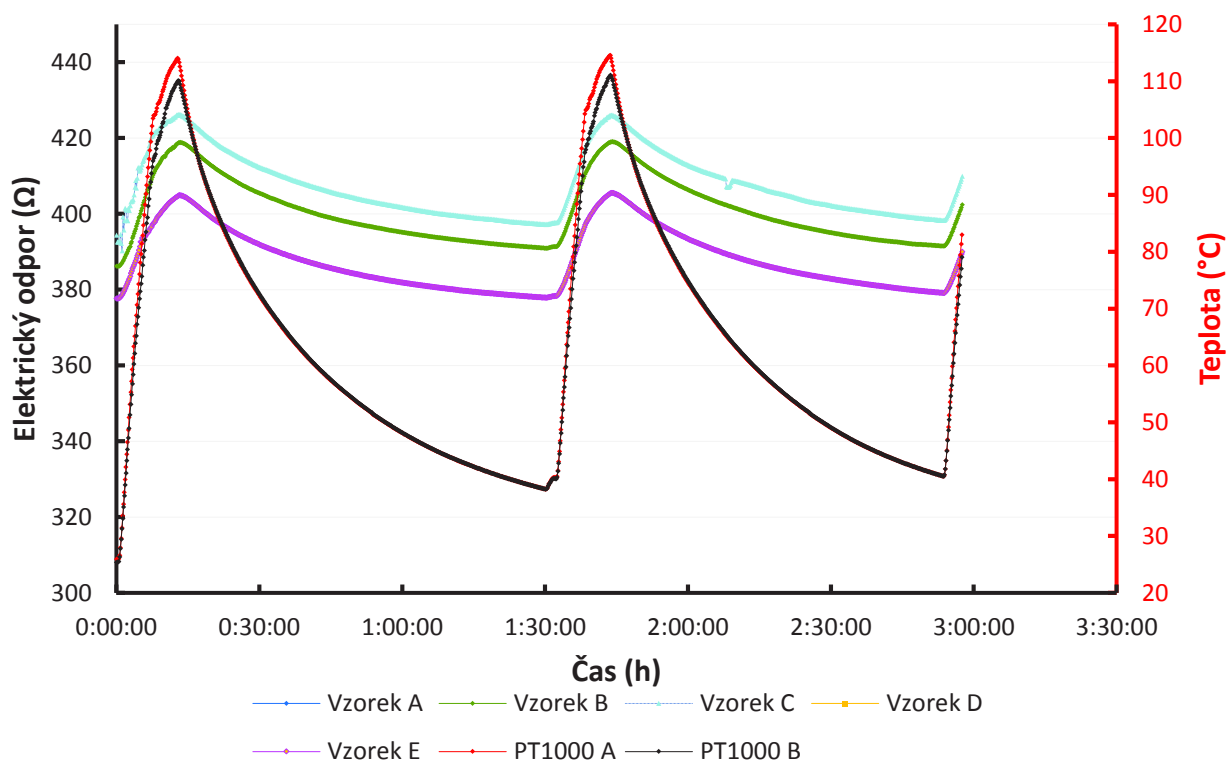
Obr. P11 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P02, 55S-Pzar01V1-Druk+vodivý inkoust



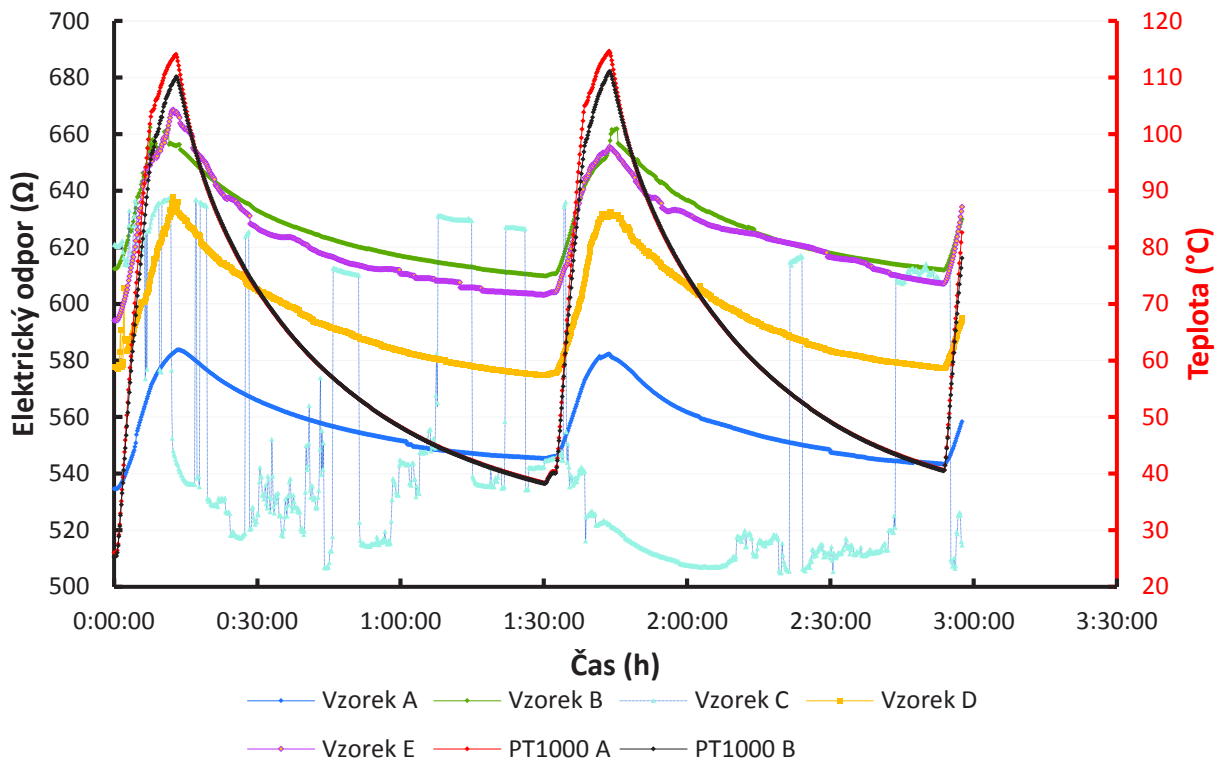
Obr. P12 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P02, 59S-Pzar01V1-Krimp+vodivý inkoust



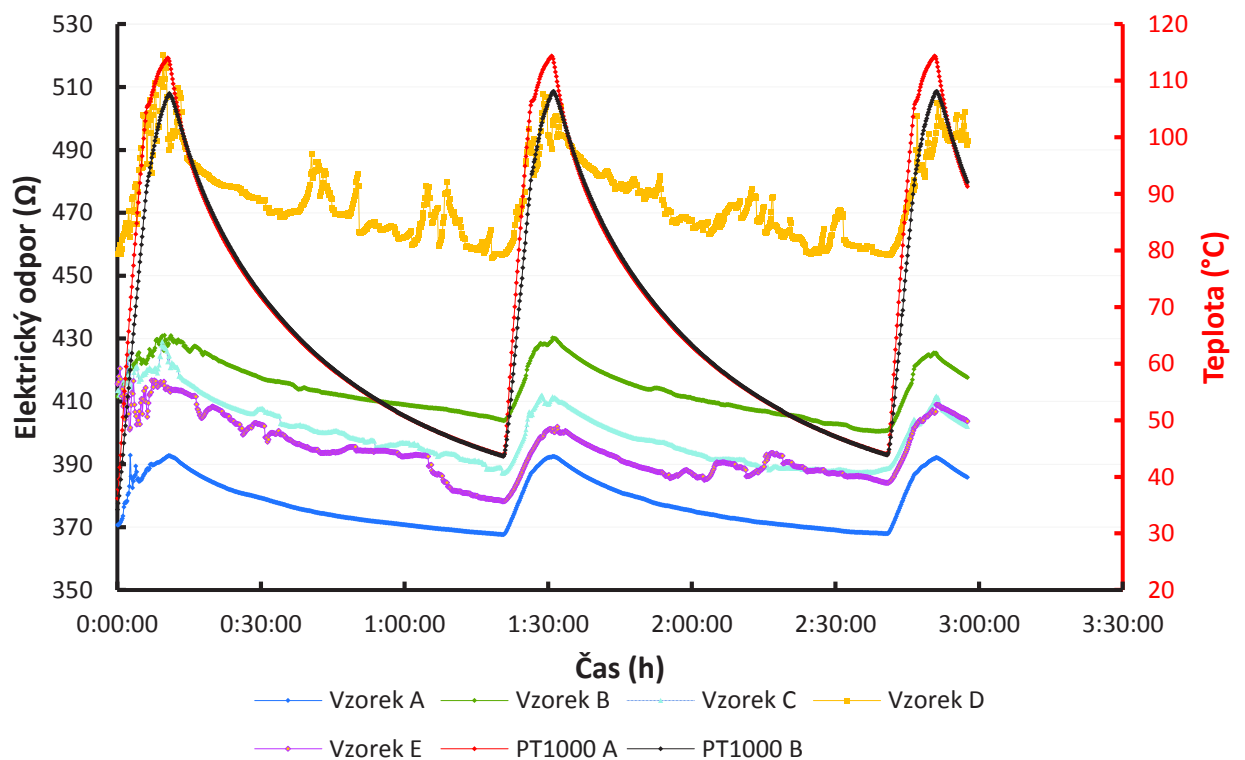
Obr. P13 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P02, 61S-Pzar01V1-Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES (přípevněna zespod)



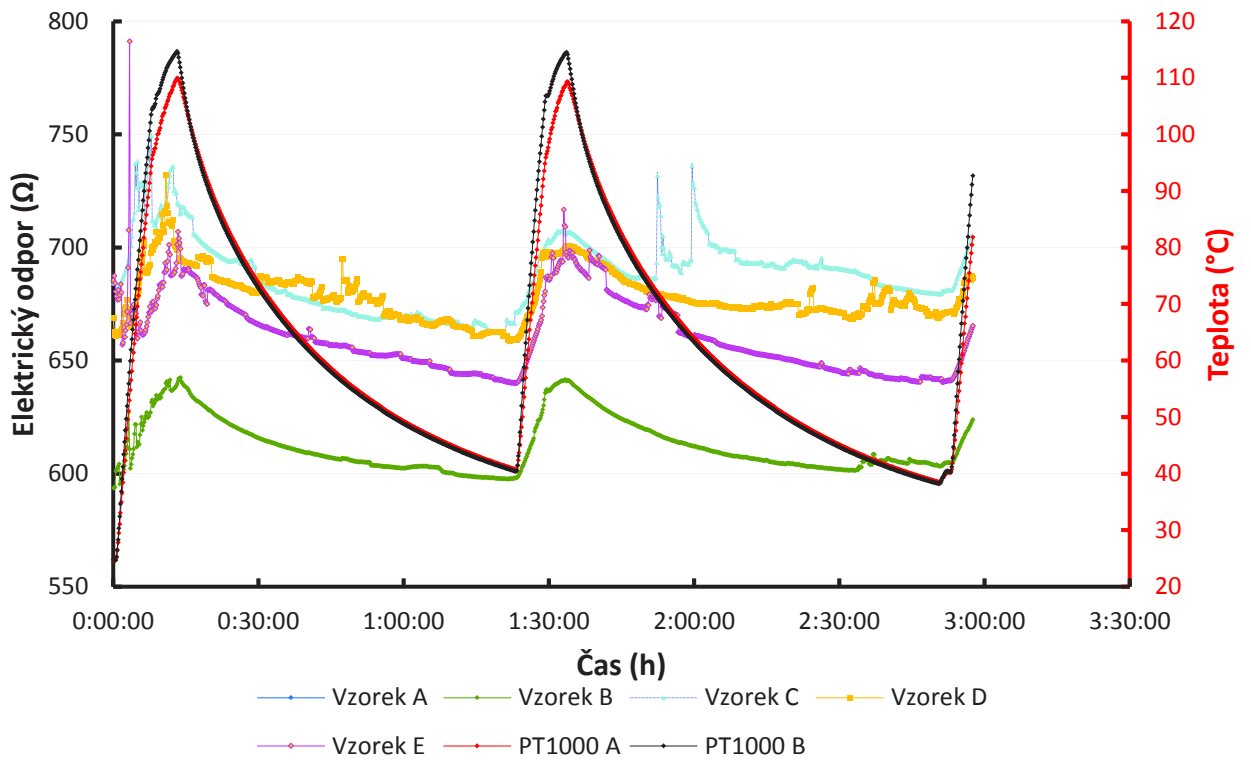
Obr. P14 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 50S-Pzk01V1-Druky+netkaná Au textilie (přípevněna shora)



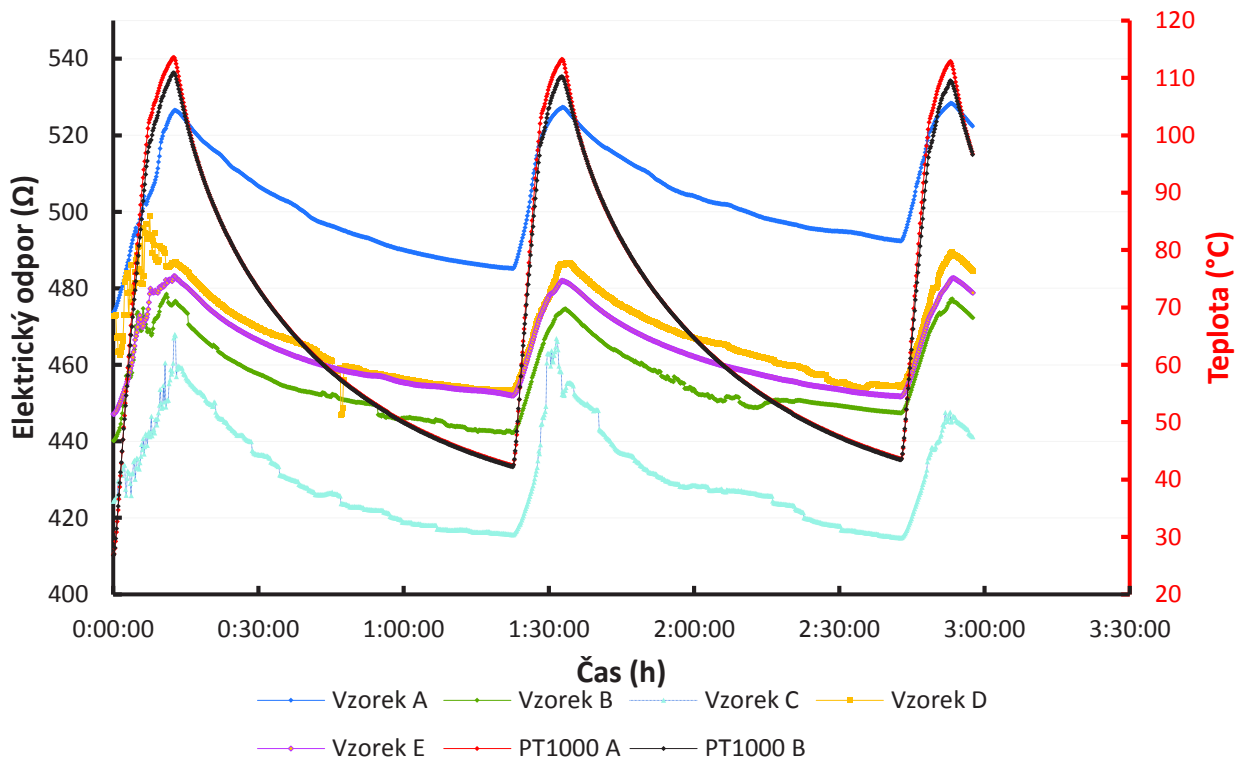
Obr. P15 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 50S-Pzar01V1-Krimp+netkaná Au textilie



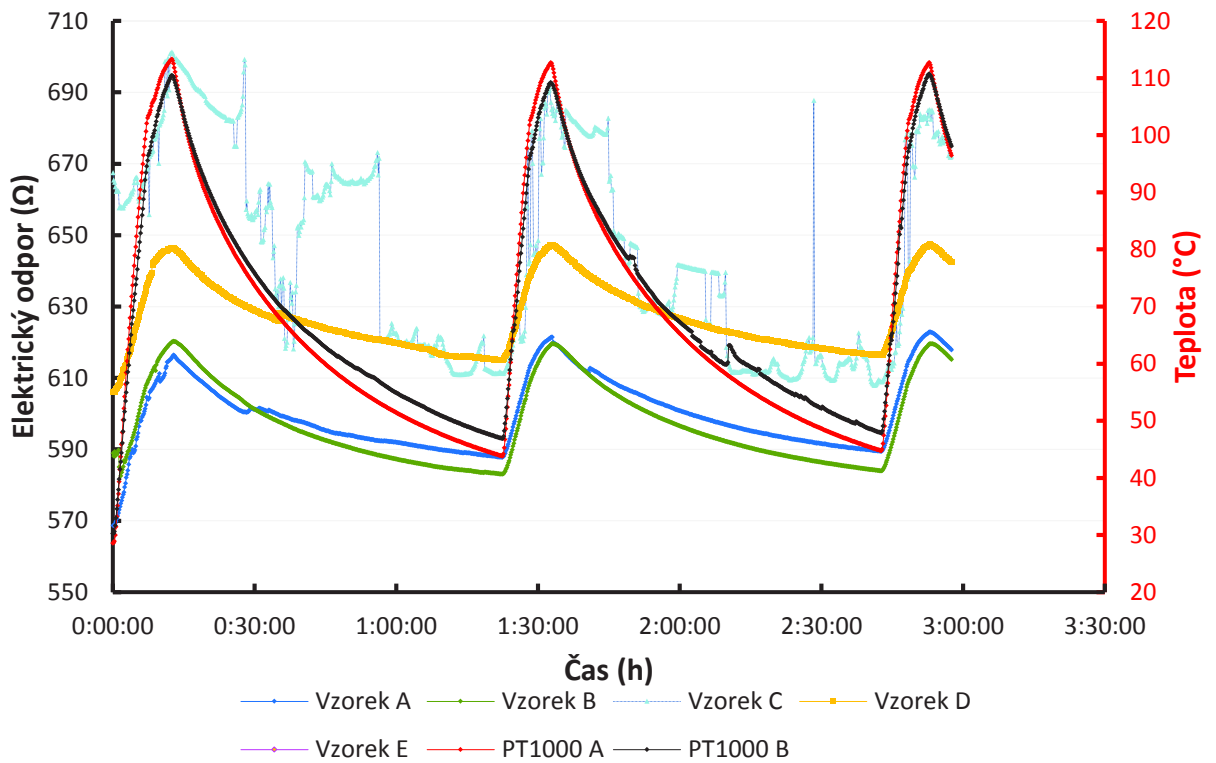
Obr. P16 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 51S-Pzar01V1-Druky+textilie 60% Shieldex 40% PES (přípevněna shora)



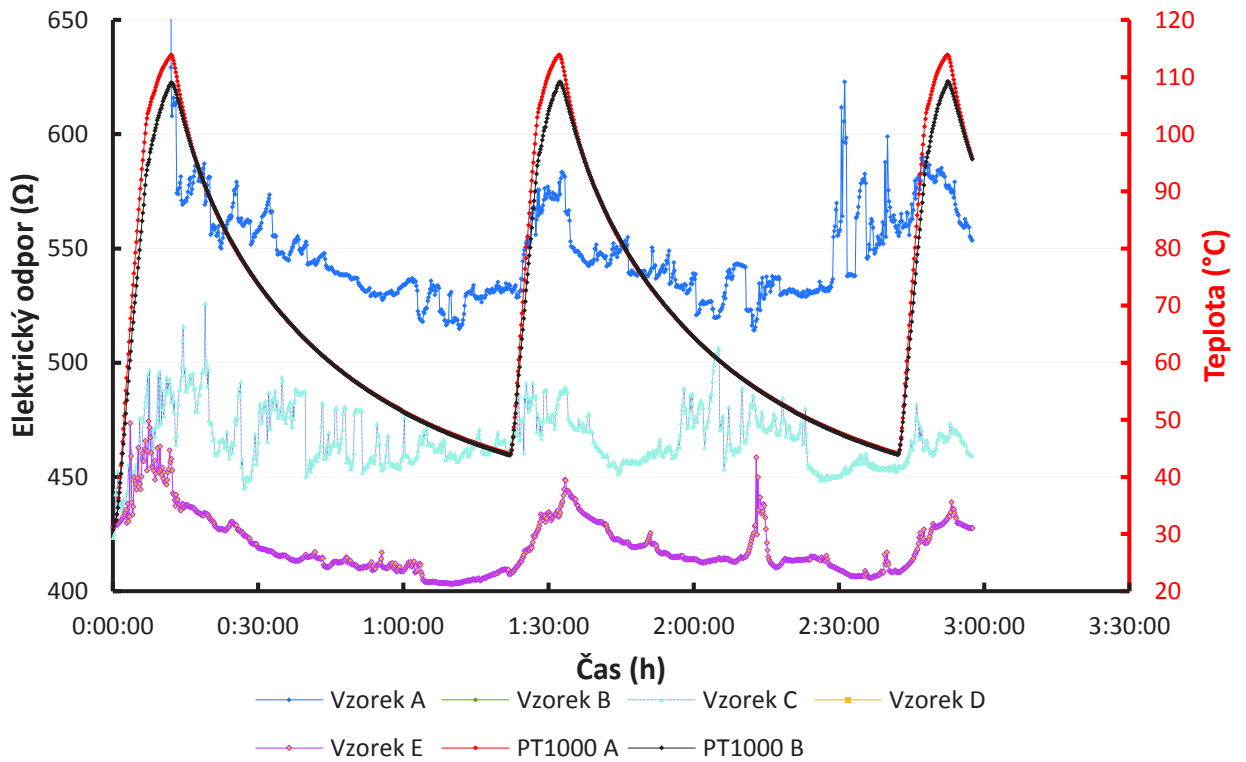
Obr. P17 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 52S-Pzar01V1-Krimp + Cu tafetta pro kontakt B, 53S-Pzar01V1 - Krimp + vodivý silikon (nanesen vertikálně) pro kontakty C, D, E



Obr. P18 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 55S-Pzar01V1-Druk+vodivý inkoust



Obr. P19 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 59S-Pzar01V1-Krimp+vodivý inkoust



Obr. P20 – Průběh závislosti změny odporu na změně teploty, program P01 po 10 pracích cyklech, 60S-Pzar01V1-Druky+netkaná Au textilie (přípevněna zespod)

Tabulka. 1 – Přehled vypočtených hodnot měřených čtyřbodovou metodou odporu

Označení vzorku	Označení kontaktů (A-J)									
56S-PW04V2-Druk 3/2 + (A-E) inkoust nanesen oboustranně, (F-J) vodivý silikon nanesen zespod	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Průměr naměřených hodnot	4,7	1,3	2,2	1,8	2,5	3,0	5,0	2,2	15,7	2,3
Směrodatná odchylka od průměru	4,0	2,0	1,7	1,5	0,5	0,9	5,1	1,0	18,4	1,2
Průměr naměřených hodnot po pracích testech	8,6	8,4	5,4	6,5	6,9	13,6	x	8,4	x	5,8
Směrodatná odchylka od průměru	6,4	4,8	2,3	2,5	2,4	3,9	x	2,3	x	2,9
57S-PW06V1-Druk 3/2 +(A-E) Vodivý inkoust nanesen oboustranně,(F-J) vodivý silikon nanesen shora	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Průměr naměřených hodnot	2,9	0,9	1,1	2,1	1,4	4,6	4,4	3,3	2,9	5,7
Směrodatná odchylka od průměru	2,3	0,4	0,6	0,6	1,0	3,8	2,6	1,5	1,2	4,8
Průměr naměřených hodnot po pracích testech	x	3,2	2,5	x	4,8	x	4,4	x	x	5,8
Směrodatná odchylka od průměru	x	1,1	1,3	x	1,8	x	2,2	x	x	1,7
45S-PW04V2-Druk vel.4 + (A-E) vodivý silikon nanesen shora, (F-J) vodivý inkoust oboustranně	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Průměr naměřených hodnot	2,4	188,8	1,6	1,5	1,8	1,7	3,9	5,4	3,1	5,8
Směrodatná odchylka od průměru	0,7	307,4	0,9	0,8	2,1	1,4	4,2	3,6	2,7	3,3
Průměr naměřených hodnot po pracích testech	4,7	218,4	x	5,0	3,4	3,3	x	5,8	3,6	6,2
Směrodatná odchylka od průměru	2,1	253,5	x	1,1	0,8	1,4	x	2,4	1,2	1,3
47S-PW06V1-Druk vel.4 + (A-E) vodivý inkoust oboustranně, (F-J) vodivý silikon nanesen shora	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Průměr naměřených hodnot	2,1	1,0	6,9	0,6	0,7	2,2	1,9	1,6	4,3	7,3
Směrodatná odchylka od průměru	0,8	0,3	11,6	0,2	0,5	2,0	1,6	0,8	1,8	8,8
Průměr naměřených hodnot po pracích testech	1,8	x	2,3	2,1	2,6	1,7	3,1	3,1	3,4	x
Směrodatná odchylka od průměru	0,5	x	1,0	0,9	1,0	0,9	2,2	1,8	0,8	x
65S-PW06V1-Druk vel.3/2 + (A-E) vodivý silikon nanesen zespod	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Průměr naměřených hodnot	2,3	0,5	x	0,5	0,8	-	-	-	-	-
Směrodatná odchylka od průměru	0,5	0,2	x	0,4	0,2					
Průměr naměřených hodnot po pracích testech	4,3	5,0	x	4,2	5,2					
Směrodatná odchylka od průměru	1,2	0,4	x	0,9	1,4					

