

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Způsoby propojení elektronických prvků pro smart  
textilie**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr VLK**  
Osobní číslo: **E15B0140P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Způsoby propojení elektronických prvků pro smart textilie**  
Zadávající 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. Seznamte se s problematikou vodivého propojování elektronických prvků na textilních substrátech.
2. Popište a porovnejte možné způsoby vytváření propojovacích struktur na textilních substrátech.
3. Popište a porovnejte možné způsoby kontaktování elektronických prvků na textilních substrátech.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

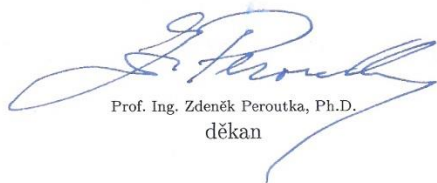
1. HOFFMANN, Karel. Planární mikrovlnné obvody. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02115-7
2. Intelligent textiles and clothing. Editor H. R. MATTLA. Cambridge: Woodhead, 2006. ISBN 978-1-84569-005-2
3. Smart textiles - Fundamentals, Design and Interaction. Editor S. Schneegass. ISBN 978-3-319-50124-6
4. elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Kalaš

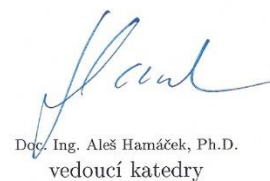
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení vzniku propojovacích struktur ve smart textiliích. V textu se nejdříve projednávají druhy smart textilií a jejich využití pro lidské potřeby. Dále je zkoumán vývoj a výroba vodivých přízí a vláken. Alternativou k funkcionalizaci vláken je využití tiskové metody za použití flexibilních vodivých tiskových past. Na závěr práce popisuje kontaktování z hlediska požadovaných vlastností a jednotlivé nerozebíratelné či rozebíratelné metody kontaktování.

## **Klíčová slova**

Smart textilie, inteligentní textilie, e-textilie, textilní substráty, funkcionalizace vláken, tištěná elektronika, kontaktování na textilní substráty

**Abstract**

This bachelor thesis is focused on solving problems of interconnection structures in smart textiles. The text deals with solutions that apply to smart textiles and their use for human needs. Furthermore, the development of conductive yarns and their manufacture is investigated, which is divided into fiber spinning and coating. Another topic deals with printed electronics in which conductive pastes are solved. At the end of the work it describes contacting in terms of required properties and individual unstable or demountable contact methods.

**Key words**

Smart textiles, Intelligent textiles, E-textiles, Textile substrates, Fibre functionalization, printed electronics, textile substrate contacting

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 13.6.2019

Jméno příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Kalašovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 SMART TEXTILIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ SMART TEXTILIÍ.....	11
1.1.1 <i>Pasivní smart textilie</i> .....	11
1.2 AKTIVNÍ SMART TEXTILIE.....	11
1.2.1 <i>Ultra smart textilie</i> .....	12
1.3 POUŽITÍ SMART TEXTILIÍ.....	12
1.3.1 <i>Zdravotnictví</i> .....	12
1.3.2 <i>Sport a fitness</i> .....	12
1.3.3 <i>Ochrana a bezpečnost člověka</i> .....	13
1.3.4 <i>Další využití</i> .....	15
1.4 REALIZACE SMART TEXTILIE.....	15
<b>2 VYTVÁŘENÍ PROPOJOVACÍCH STRUKTUR</b> .....	<b>18</b>
2.1 SLEDOVANÉ PARAMETRY.....	18
2.2 VODIVÁ VLÁKNA.....	19
2.2.1 <i>Výroba nosných textilních vláken</i> .....	20
2.2.2 <i>Funkcionalizace vláken</i> .....	22
2.2.3 <i>Materiály pro vodivá vlákna</i> .....	25
2.2.4 <i>Integrační technologie</i> .....	26
2.3 TIŠTĚNÉ MOTIVY.....	30
2.3.1 <i>Tiskové materiály</i> .....	32
2.3.2 <i>Metody realizace tištěných motivů</i> .....	33
2.4 SROVNÁNÍ.....	35
2.4.1 <i>Porovnání vodivých materiálů</i> .....	35
2.4.2 <i>Porovnání vodivých vláken vyrobené různými metodami</i> .....	36
2.4.3 <i>Porovnání integračních technologií</i> .....	36
2.4.4 <i>Porovnání tištěné elektroniky</i> .....	37
<b>3 KONTAKTOVÁNÍ</b> .....	<b>37</b>
3.1 POŽADAVKY NA ELEKTRICKÝ KONTAKT.....	38
3.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SPOLEHLIVOST.....	38
3.3 KONTAKTNÍ ODPOR.....	38
3.3.1 <i>Měření kontaktního odporu</i> .....	39
3.4 METODY KONTAKTOVÁNÍ.....	40
3.4.1 <i>Nerozebíratelné</i> .....	41
3.4.2 <i>Rozebíratelné</i> .....	44
3.5 SROVNÁNÍ.....	46
3.5.1 <i>Porovnání metod kontaktování</i> .....	46
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>48</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>50</b>



## Úvod

Téma smart textilií v posledních letech rezonuje napříč společnostmi a předpokládá se jeho výrazný vzestup. Vše začalo už v minulém století, kdy se zesílil zájem lidí o samotné oděvy, ať už z důvodu ochrany sebe sama nebo potřeby předat zprávu o sobě jako třeba umělecký styl nebo zda je člověk bohatý. Ale první smart textil sahá ještě do dřívější doby a to do roku 1883, kde byla použita osvětlená čelenka [1]. V roce 2015 bylo po celém světě na trhu kolem 97 milionů nositelných technologií. Podle prognóz by v příštím roce mělo být celosvětově 601 milionů výrobků v oblasti smart textilií a i Evropa by měla zvýšit svoji produktivitu [2].

Právě textilie, do kterých lze zabudovat elektroniku mění odvětví textilu a oděvů. Výrobní společnosti jsou již velmi aktivní v oblasti smart textilií. Podnikatelské možnosti s nositelnou technikou jsou velké, ale největší využití a přínos nachází ve zdravotnictví, fitness a wellness. V oblasti zdravotnictví mohou být do textilu integrovány senzory snímající životní funkce. Fitness a wellness nabízí sledování pohybu člověka a svalových funkcí na jejichž základě lze volit vhodné tréninkové i regenerační plány.

Tato práce je zaměřena na vodivé propojování elektronických prvků pro smart textilie. V část textu je zaměřena na smart textilie a popisuje jejich využití a vývoj. Dále je studována oblast vodivých přízí a jejich výroby, která spočívá např. ve zvlákňování nebo-li přímé výrobě nitě z vodivých materiálu, jako je polyanilin. Kromě zvlákňování se vodivé nitě vyrábějí pokovením nevodivých vláken za pomoci ponoření do roztoku nebo taveniny. Často využívaným způsobem výroby vodivých nití je integrace jemných kovových drátků přímo do nitě. Výhody a nevýhody jednotlivých technik výroby jsou dále diskutovány. Dalším možným způsobem jak vytvořit na textilií vodivé propojení je technikou tisku využívající vodivé tiskové pasty (TP). Práce se nadále zabývá problematikou kontaktování vodivých motivů na textilních substrátech. Vodivé spoje lze realizovat pájením, vodivým lepením či vodivými suchými zipy. Realizované kontakty však musí odpovídat základním požadavkům smart textilií, které spočívají v zachování flexibility a mechanické odolnosti.

## Seznam symbolů a zkratek

EMG .....	Elektromyografie
DPS.....	Deska plošných spojů
HDP .....	Hrubý domácí produkt
PP.....	Polypropylen
PA.....	Polyamid
PAN .....	Polyakrylonitril
DMSO.....	Dimethylsulfoxid
PET .....	Polyethylentereftalát
PANI.....	Polyanilin
PPY.....	Polypyrrol
CNT .....	Uhlíkové nanotrubičky
SWCNT .....	Jednostranné uhlíkové nanotrubičky
TE .....	Tištěná elektronika
R2R.....	Roll to roll
DOD .....	Drop on demand
CIJ.....	Continous InkJet
PEDOT .....	Polyethylendioxythiofen
EC.....	Etylcelulóza
TP .....	Tiskové pasty

# 1 Smart textilie

Smart textilie zahrnují textilie, které v sobě mají začleněny různé elektronické komponenty. Mezi ně může patřit nepřeberné množství ovládacích prvků a senzorů umožňující snímat vnější podmínky a podměty, ale i na ně reagovat. Mezi smart textilie však můžeme zařadit i neelektrické prvky jako jsou speciálně konstruované polymery nebo dokonce některé druhy barviv [3]. Integrace těchto prvků do textilních substrátů rozšiřuje funkci běžných tkanin. Lze je využít v několika odvětvích. V lékařství k měření vitálních funkcí jako je EKG nebo puls. Ve sportovním odvětví nalezneme materiály, které dokáží stimulovat svaly a v neposlední řadě se smart textilie využívají v armádě pro snadnou lokalizaci člověka nebo detekci nebezpečných plynů [4]. Všechny zmíněné funkcionality lze integrovat přímo do textilií a oděvů.

Smart textilie však podléhají velkým nárokům z hlediska snadného pravidelného používání. Tudíž je nezbytné, aby byly dobře omyvatelné a pratelné, a elektronika tím významně nedegradovala. Je třeba také myslet na pohodlí člověka. Textilie, která například pomáhá zlepšit zdravotní stav, by zároveň neměla být pro uživatele nekomfortní. Příkladem toho může být vojenská vesta, která obsahovala několik senzorů, jenž byly napájeny 60 AA bateriemi, což představovalo velkou váhu obleku a tudíž znesnadňovala pohyb vojáka v terénu [5].

## 1.1 Rozdělení smart textilií

### 1.1.1 Pasivní smart textilie

Pasivní smart textilie jsou označovány za první generaci smart textilu. Tato generace je schopna pouze detekovat vlastnosti a parametry okolního prostředí bez přímé reakce na ně. Informace o změně parametrů okolí je dále zpracována vyhodnocovací elektronikou, nebo může být přímo indikována např. změnou barvy v závislosti na pH, tvaru, teploty vlhkosti apod. [6]. Příkladem je vysoce izolační povlak, který si zachovává své izolační vlastnosti ve stejném rozsahu bez ohledu na to teplotu prostředí [7].

### 1.2 Aktivní smart textilie

Tzv. druhá generace smart textilií na rozdíl od pasivních textilií nesnímá pouze okolní podněty, ale dokáže na ně i reagovat [8] a automaticky se tak přizpůsobit na změnu prostředí [7]. Tato reakce je vyvolána akčním členem umístěným přímo v dané textilii. Společně se snímačem tvoří základní prvek aktivních smart textilií [8], mezi které patří např. obleky, které nepropouští vodu ale páru ano nebo elektricky vyhřívané obleky [7].

### 1.2.1 Ultra smart textilie

Poslední generací jsou textilie, které jsou schopny trojnásobné funkce a to vnímat, reagovat a adaptovat se na podmínky okolního prostředí. Tvoří je hlavní systém nazývaný mozkem, který je schopen poznat změny prostředí, vyhodnotit je a aktivovat potřebná další zařízení která působí proti vzniklým podnětům [6], [7].

## 1.3 Použití smart textilií

Velký rozvoj smart textilií je zapříčiněn především velkou poptávkou v oblasti monitorování různých životních funkcí. Monitoring pomáhá sportovcům zlepšit jejich výkony nebo zraněným lidem zkrátit dobu jejich rekonvalescence.

K výrobě smart textilií napomáhají také IT společnosti a rozvoj IoT sítí, které rozšiřují bezdrátové spojení i do oblasti smart textilií. Není tedy problém přistupovat k informacím přímo přes mobilní telefon a rychle a bezproblémově analyzovat měřená data [2].

### 1.3.1 Zdravotnictví

Chytré textilie používané ve zdravotnictví usnadňují například tvorbu osobních rekonvalescenčních a rehabilitačních plánů založených na individuálních genetických vlastnostech jednotlivce. Dále mohou pomáhat v predikci nemocí jako např. rakoviny v počáteční fázi a tím zvýšit pravděpodobnost úspěchu léčby. Kromě toho existuje na trhu již několik nositelných zařízení s funkcí předpovědi epileptických záchvatů, nebo monitorování hladiny glukózy v krvi. Tyto výrobky musí splňovat přísné požadavky na jejich přesnost snímaných veličin a také na pohodlí člověka. Smart textilie by měly být z materiálu, který je člověk schopen užívat bez problému po celý den [2].

### 1.3.2 Sport a fitness

Ve sportu jsou nabízené k prodeji tzv. smart socks, neboli chytré ponožky (*obr. 1.1*). Ty jsou spárovány s mobilním zařízením pomocí bluetooth a jsou vybaveny odnímatelným jádrem. Ponožky sportovci měří přesný počet kroků, rychlost běhu, spálené kalorie a samozřejmě překonanou vzdálenost. Umožňuje také měření frekvence a techniku dopadu chodidla. Díky tomu jsou schopny rozpoznat styl běhu a upozornit nositele na nesprávnou techniku, která by mohla vést ke svalovému zranění [9].



Obrázek 1.1 - Smart socks (převzato z [9])

Využívají se i speciální vložky do bot, které jsou vyhříváné a tak zabraňují podchlazení nohy a tím i dalším nemocem [2].

Na trhu jsou i chytré šortky (obr. 1.2), které obsahují v sobě 6 EMG elektrod a dokáží tak snímat po celém obvodu stehna. Uživatel získává zpětnou vazbu o svalové výkonnosti, správném nebo nesprávném držení těla a v neposlední řadě vyhodnocení různých technik chůze. Díky všem získaným datům mohou sportovci nebo jejich lékaři předejít svalovým zraněním [10].



Obrázek 1.2- Smart shorts Mbody (převzato z [10])

### 1.3.3 Ochrana a bezpečnost člověka

Oblečení je druhou kůží člověka, která je na jedné straně ve styku s naším tělem a na straně druhé je velkou částí v kontaktu s okolním prostředím. Proto je textil dobrým pomocníkem při osobní ochraně a bezpečnosti práce [11]. Smart textilie jsou využívány i při životu nebezpečných situacích. Jedním z těchto produktů je airbagová vesta pro motorkáře (obr. 1.3). Airbagový systém je vložen přímo do vesty, kterou je možné nosit pod jakýmkoliv typem bundy, ať jde o textil nebo pravou kůži. Navíc splňuje motorkářské

požadavky např. na prodyšnost a lehkost. Vesta je naprosto autonomní, a tudíž není žádnými kabely propojena s motorkou. Vyjímatelná jednotka, která je mozkiem celého systému a obsahuje senzory, neustále měří veškeré pohyby řidiče a díky prediktivnímu algoritmu dokáže rozpoznat havárii nebo ztrátu motorkářovi rovnováhy. K odhalení případné nehody a nafouknutí airbagu do požadované hustoty dochází za méně než 60 ms. Navíc je zařízení vybaveno wi-fi modulem, který je možné spárovat s chytrým zařízením a dodávat informace uživateli o stavu baterie, nových aktualizacích a zároveň posílá data výrobci k další analýze, a tím pomáhá v inovaci produktu[12].



Obrázek 1.3- Airbag vesta (převzato z [12])

Další z mnoha bezpečnostních smart textilií, jsou sedačky v kabinách kamionu. Ty jsou vybaveny měřiči EKG a jsou schopny rozpoznat, zda řidič neupadá do spánku. Chytré textilie mohou být využity i pro komfort člověka. Pro své pohodlí mohou řidiči kamionu využít speciálních sedaček, s integrovanými LED diodami. Ty emitují modré světlo, které v člověku vyvolává pocit pohodlí [2].

Život zachraňující textil využívají také hasiči nebo vojáci. Ti nosí speciální obleky, které jim umožňují vykovávat jejich práci v náročném nebo životu nebezpečném prostředí. Takový oblek je schopen měřit nejen fyziologické odezvy lidského těla, ale také je přenášet, monitorovat a zobrazovat v centrální zobrazovací jednotce. Záchranáře tak lze vzdáleně sledovat a kontrolovat jeho zdravotní stav a ze zásahu jej včas odvolat, nebo jej lokalizovat v případě selhání životních funkcí. [2].

### 1.3.4 Další využití

Podobný systém lze uplatnit i v oblasti pěstování rostlin. Zde se vyhřívaný materiál umístí kolem kořenů rostliny, a tím zajistí přísun tepla. Teplotu lze navíc efektivně řídit a dávkovat každé rostlině zvlášť, tím je snížena celková energetická náročnost pěstování, je zajištěna kontrola vegetačního cyklus a zvýšena kvalita a kvantita sklizně [2].

Využití se najde i v módě. Jako existují modely, kde je elektronika dokonale skryta, může elektronika naopak úplně změnit vzhled oblečení. Pro svoji schopnost upravit zevnějšek modelky, se toto oblečení používá na několika módních přehlídkách [7].



Obrázek 1.4 - osvětlené šaty (převzato z [7])

## 1.4 Realizace smart textilie

- **Výroba textilu**

Vše začíná výrobou textilu, do kterého se umístí elektrické komponenty. Nejdůležitější je promyšlení způsobu a postupu hromadné výroby. Mezi základní způsoby výroby textilie patří osnovní úplet, pletení s útkem, tkaní, háčkování. Každá z uvedených technik má vliv na vlastnosti finálního výrobku s ohledem např. na flexibilitu, prodyšnost, mechanickou odolnost atd. [13].

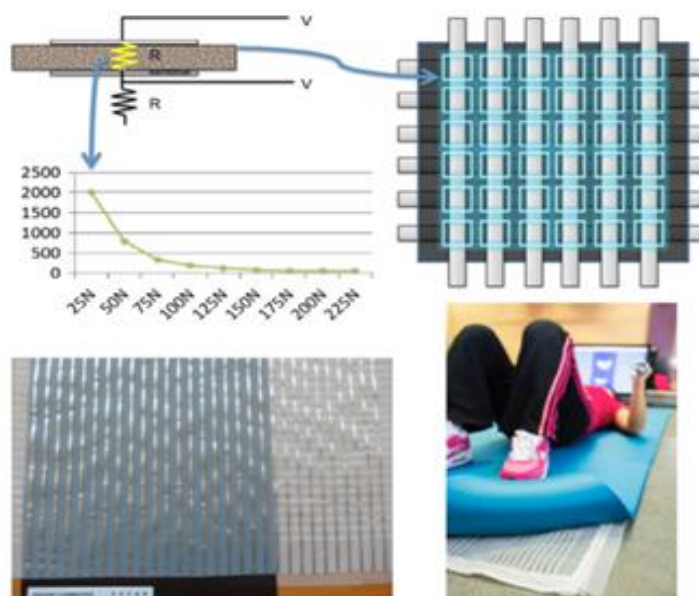
- **Sensory a akční členy**

Sensory nejsou produktem hromadné výroby jako textil a to zejména z důvodu velké variability senzorů, které jsou úzce specializované pro konkrétní typ aplikace, a tím se neshodují s podmínkami hromadné výroby. K výrobě senzoru výrobci nejčastěji využívají flexibilní desky plošných spojů (DPS), díky nim je možná integrace i složitějších struktur do textilu [13]. Při výrobě se také musí dát pozor na to, aby senzory splňovaly stejné vlastnosti z hlediska odolnosti, protože i na ně se během užívání uplatňují mechanické, chemické a teplotní vlivy [14].

Velká část senzorů je založena na vztahu mezi fyzikální nebo chemickou veličinou (teplota, tlak, vlhkost atd.) a elektrickými vlastnostmi (odpor, elektromagnetické vlastnosti apod.) [15]. Existuje několik druhů senzorů jako třeba senzory teploty a vlhkosti. Oba nejčastěji využívají kapacitní nebo odporový princip činnosti.

Textilní kondenzátory jsou obvykle tvořeny kompatibilními vodivými materiály, které fungují jako dvě vodivé elektrody oddělené dielektrikem. Vodivé elektrody se vyrábějí za pomoci tkaní nebo šití, a mohou být natřeny nebo potištěny vodivými barvami. Dielektrikum často bývá syntetická pěna, anebo nevodivý měkký polymer v případě tlakových snímačů [16], případně hydrokopická látka u senzorů vlhkosti. Ta v případě absorpce vlhkosti změní svojí permitivitu, což lze snadno detekovat změnou úrovně napětí [17]. Kapacita tlakového senzoru je závislá na vzdálenosti dvou vodivých elektrod a to nepřímo úměrně. To znamená, že pokud vzdálenost dvou vodivých elektrod mezi sebou zmenšíme, tak kapacita se zvětší a naopak.

Odporová tlaková čidla jsou založena na změně elektrického odporu působením tlaku na plochu senzoru [16]. Tyto snímače mohou být vyrobeny z několika materiálu různých struktur a vyrábí se metodami např. šití nebo lepení na textilní podklad. Tyto snímače se vkládají do bot k analýze chůze, anebo do matrací lůžek a pomáhají analyzovat chování člověka během spánku, tím odstranit např. problémy se zády [18].



Obrázek 1.5 - Matice tlakového snímače, realizace a využití ve sportu (převzato z [18])

Snímače namáhání využívají princip piezorezistivity [15] a takové snímače mohou být často i jediná vodivá příze v textilu. Senzor na bázi tkanin je pokryt tenkou vrstvou



polypyrrolu, díky kterému se z běžné tkaniny stane vodivá, vhodná pro snímání deformace materiálu, ale jsou závislé na topologii vpletení nebo vetkaní a při nevhodném použití se senzory mohou při přehýbání a mytí zhoršit. Proto se používá i metoda vpletení vodivé příze do nevodivé tkaniny [19]. Sensory se chovají jako flexibilní tenzometry schopny měřit mechanické napětí a pomáhat zlepšit držení těla [20].



Obrázek 1.6 - Snímač ohybu na dlani (převzato z [20])

Optické snímače oproti ostatním využívají jako nosiče informace fotony. Jejich výhody jsou velká citlivost, odolnost proti rušení a malá hmotnost a naopak mezi nevýhody patří vyšší cena a náročnější konstrukce [21].

Elektrochemické senzory jsou schopny konvenčního měření fyzických vlastností (srdeční frekvence, EKG apod.). Nedávné poznatky zjistili, že schopnost konvenčního měření se dá za pomoci takových senzorů ještě zvýšit, avšak jejich nevýhoda je nesnadná spojitelnost s tělem a zejména s kůží a to zejména pro použití flexibilních nebo sítotiskových elektrochemických snímačů [8].

Problematika akčního členu spočívá v jeho napájení. Proto je klíčovým aspektem vkládání baterií nebo podobných zařízení k dodání energie [13].

- **Propojení textilu s elektronikou**

Způsobů pro spojení existuje několik. Rozdělují se do dvou skupin, a to na nerozebíratelné (non-reversible) a rozebíratelné (reversible). Nerozebíratelné spojení je takové, že elektronika nemůže být snadno oddělitelná od textilu. K tomu se používá např. pájení. Naopak u rozebíratelných spojů lze elektrickou část snadno vyjmout např. pro její nabití [13].

- **Komunikační a operační systémy**

Aby bylo možné data ze senzorů dále zpracovat a poskytnout zpětnou vazbu, je nutné umístit do oděvu zařízení, které bude schopno získané informace předávat. K přenosu mohou být využity plně integrované vyšíváné textilní antény, nebo komunikační moduly, které jsou propojeny s mobilním telefonem nebo jinou centrální jednotkou [13]. Mezi nejvyužívanější komunikační způsoby pro interaktivní textilní výrobky patří Wi-Fi a bluetooth [16].

- **Design a interakce**

V neposlední řadě je samozřejmě důležitý design a atraktivita smart textilie. Tento aspekt často ustupuje funkčnímu hledisku. Neopomíjenou stránkou však bývá vlastnost materiálu z hlediska komfortu. Pohodlné a neomezující nošení chytrého oděvu je nezbytnou podmínkou v rozvoji smart textilií [13].

- **Testování**

Na závěr se provádí testování smart textilií při podmínkách simulujících běžné užívání. Prací test se široce používá jako test spolehlivosti pro smart textil a pro tento účel platí norma ISO 6330 [22]. Vodotěsnost materiálu proti dešti je obvykle testováno pomocí hydrostatického tlaku podle normy ISO 811. Díky své jednoduché aplikaci a snadné reprodukovatelnosti se těší velké oblíbenosti a princip spočívá ve zvyšujícím se hydrostatickým tlaku působícím na testovací vzorek a po prosáknutí tří kapek se test zastaví a odečte se hodnota dovršeného tlaku [23]. Je důležité testovat i mechanické vlastnosti integrovaných vodivých nití. Provádějí se např. zkoušky tahem, konkrétně ve studii [24] a [25] se prováděly testy, kdy se aplikovalo na nit mechanické napětí, a zkoumala se jeho velikost při přetržení. V jiné studii [26] byly testované elektrické vlastnosti po různém mechanickém namáhání. Zde se testovací vzorek natáhnul a byl změřen elektrický odpor. Poté se změřil elektrický odpor po cyklickém namáhání, tedy po opakovaném uvolnění a natáhnutí vzorku.

## 2 Vytváření propojovacích struktur

### 2.1 Sledované parametry

Po vytvoření propojovacích struktur ve smart textilií je důležité si všimnout vlastností, které jsou důležité pro jejich účel nebo pro jejich opakované používání. Pozorované vlastnosti mohou být:

**Elektrický odpor** – Nejdůležitější vlastnost pro vodivé textily, ze kterého lze vyvodit

elektrickou vodivost, jehož definice je patřičná z rovnice (1)

$$R = \rho * \frac{l}{S} \quad (1)$$

Kde  $\rho$  je měrný odpor [ $\Omega$ ],  $l$  délka vodiče [ $m$ ],  $S$  průřez vodiče [ $m^2$ ]

**Mechanické vlastnosti** – Vodivé propojení musí být ohebné a jeho mechanické a elektrické vlastnosti nesmí při opakovaném ohybu degradovat.

**Omyvatelnost** – Tato vlastnost se dá nazvat i jako přilnavost. Jedná se o kvalitní adhezi materiálu, což má za následek, že vodivé spoje i po vyprání v pračce nepřicházejí o elektrické vlastnosti.

**Tepelné vlastnosti** – Vodivé nitě mohou být použity jako topné těleso, kde je elektrická energie přeměněna na teplo prostřednictvím Jouleova teplem [27].

**Atmosférické vlivy** – Vliv okolního prostředí má za následek ztrátu vlastností, jako je třeba elektrická vodivost. Bylo prokázáno, že s narůstajícím počtem týdnů narůstá i odpor vlákna [28].

## 2.2 Vodivá vlákna

Vodivá vlákna jsou důležitou strukturou jakéhokoliv smart textilu, a to nejen z důvodu možného vodivého propojení, ale také proto, že mohou poskytnout základ pro budování elektronických zařízení přímo na textilních vláknech. Tato vlákna mohou potom tvořit hradlové elektrody pro tranzistory nebo elektrody pro fotovoltaická zařízení. Musí splňovat požadavky jak z hlediska nošení (mechanické vlastnosti), tak pro vedení elektrického proudu (elektrické vlastnosti) [29].

Vodivé příze mohou být vyrobeny čistě z kovu jako je stříbro nebo měď [30], které bývají nejčastěji vytvořeny metodou zvlákňování, avšak k tomuto procesu je třeba silných kyselin, které snižují další komercializaci. Další metodou je zvlákňování nevodivého materiálu, do něhož se přidá vodivá složka, která může být v podobě vodivého polymeru Polyethylendioxythiofen:Polystyrenulfonát (PEDOT:PSS) nebo uhlíkového nanovlákna, ale jejich nevýhodou může být ztráta ohebnosti nebo nákladnost v podobě spotřeby drahých materiálů.

Další způsob jak vyrobit vodivé vlákno je pokovení nevodivého vlákna po jeho výrobě impregnací vodivého materiálu. K tomuto účelu mohou posloužit vodivé polymery (polyanilin, polypyrrol atd.) [29], které vykazují své elektrické vlastnosti díky konjugovaným strukturám s dvojitou vazbou [28] a nebo je vlákno potaženo kovovým filmem, např. stříbrem [29], [31]. Obě možnosti mají svá úskalí. Kovové materiály mají

tendenci být tuhé a křehké, což způsobuje problémy jak při tkaní nebo pletení, tak při využití v konečných aplikacích, jako třeba nositelné antény. Jedním z hlavních problémů vodivých polymerů je jejich vysoký odpor na metr [27].

### 2.2.1 Výroba nosných textilních vláken

Základním stavebním kamenem je nevodivé textilní vlákno. V závislosti na jejich původu se vlákna dělí na přírodní (bavlna, len, hedvábí, vlna) a uměle vytvořené (ze syntetických vláken poly – PA, PP, PAN) a obě jsou pak ve formě filamentů nebo staplových vláken. Staplová vlákna musí být následně zkroucena do příze, aby se vytvořila souvislá struktura a jejich délka by měla být minimálně 15mm. A to z důvodu zajištění dostatečné soudržnosti pro tvorbu příze. Šíře takových vláken se pohybuje v rozmezí 10-50 $\mu$ m. Tenčí vlákna mohou být příliš jemná pro zvlákňování a širší vlákna mohou být hrubá a tudíž nepohodlná pro uživatele.

Důležitým parametrem vláken je mechanické zatížení v rovnoběžném směru s osou vlákna a je obvykle uváděno v jednotkách Newton na tex (N/tex), kde tex je lineární hustota nebo gram na kilometr. Pro praktické účely je nejčastěji využívána mez kluzu, což je zatížení, při kterém dochází k trvalé deformaci. Další sledovaná mechanická vlastnost je houževnatost vlákna neboli napětí při přetržení. Vlastnosti pro vybraná vlákna lze nalézt v tab. 1 [31].

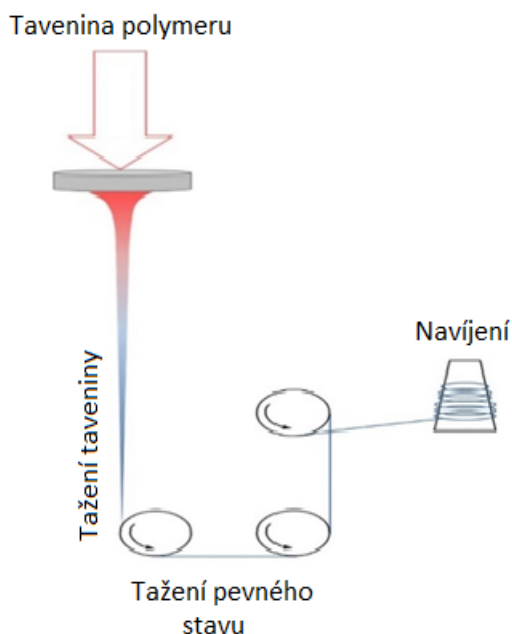
Tabulka 1 - Mechanické vlastnosti vláken [31]

Vlákno	Mez kluzu [cN/tex]	Houževnatost [cN/tex]
Bavlna	-	40
Vlna	6	11
Hedvábí	16	38
Polyester	30	47

K výrobě vláken se užívá **zvlákňování**. Je to biomimetická metoda, inspirovaná procesem, který používají pavouci k výrobě svých nití. Jedná se o přeměnu kapalného skupenství na pevné vlákno. Zahrnuje 3 kroky a to přípravu kapaliny k zvlákňování; vytlačování kapaliny za vzniku trysku a vytvrzování tryskem. Kapalina může být ve formě taveniny nebo roztoku. V případě roztoku se zvlákňování může dále dělit na suché zvlákňování (vytvrzování prováděno v horkém vzduchu), mokré zvlákňování (vytvrzování v koagulační lázni), gelové zvlákňování nebo zvlákňování vzduchovou mezerou (kombinace suchého a mokrého zvlákňování) [31].

- **Zvlákňování taveniny**

Zvlákňování taveniny je nejčastěji užívaným způsobem, jak vyrobit vlákno a princip metody je znázorněn na obr. 2.1. Tavenina polymeru je rychle pumpována přes zvlákňovací trysku (hubici) s jedním nebo více otvory a následně se extrudované vlákno ochladí a projde dále dvěma způsoby tažení. První tažení (tažení taveniny) nastává před tuhnutím a během toho dochází ke krystalizaci. Druhý krok tažení nastává po tuhnutí a je to tzv. tažení za studena a provádí se mezi teplotou skelného přechodu a teplotou [31].

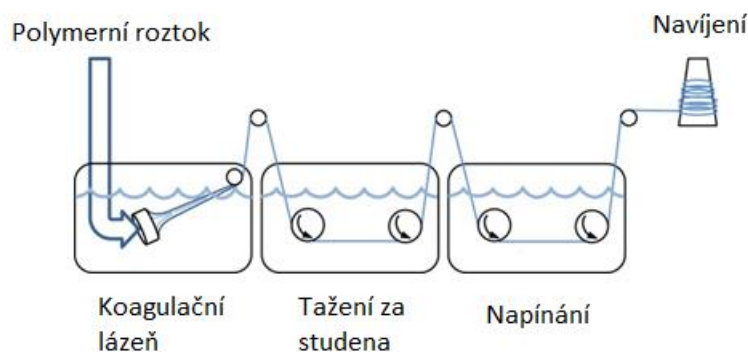


Obrázek 2.1 - Proces zvlákňování taveniny (převzato z [31])

- **Zvlákňování roztoku**

Lze využít zvlákňování roztoku na místo taveniny, který se připravuje rozpuštěním polymeru v kyselině s vysokou koncentrací (10-45%). Zvlákňování se provádí čerpáním roztoku tryskou s několika stovkami děr o velikosti desítek mikrometrů. Pro zvlákňování polymerních vláken jako je např. polyakrylonitril (PAN) se vlákna natáčí přes horký vzduch, aby bylo dosaženo rychlého odpaření těkavého rozpouštědla, a tento proces se nazývá suché zvlákňování [31].

V jiném případě může být tryska ponořena do koagulační lázně a tento proces je označován jako mokré zvlákňování (obr. 2.2). Koagulační lázeň je napuštěná kapalinou, která se mísí s rozpouštědlem zvlákňovacího roztoku, ale nerozpustí polymer. V důsledku toho během čerpání skrz trysku dochází u polymeru k tuhnutí. Tyto ztuhlá vlákna jsou v dalším kroku tažena za studena k dosažení vysokého stupně orientace [31].



Obrázek 2.2 Mokré zvlákňování (převzato z [31])

- **Tvorba příze**

Po procesu vytlačování jsou vlákna nejčastěji stáčená do přízí, což je sestava ze staplových vláken nebo filamentů obvykle zkroucená tak, aby držely pohromadě prostřednictvím tření. Konečná příze může mít odlišné velikosti a jako příklad lze uvést šicí nitě a provazy [31].

## 2.2.2 Funkcionalizace vláken

- **Pokovení vláken**

Jedná se o textilní vlákno, které slouží jako jádro a je potaženo elektricky vodivým materiálem. Stejně jako u jiných textilií určených pro každodenní nošení je nutné, aby povlak byl odolný vůči oděru a opakovanému ohýbání, jakož i chemickému ošetření [31].

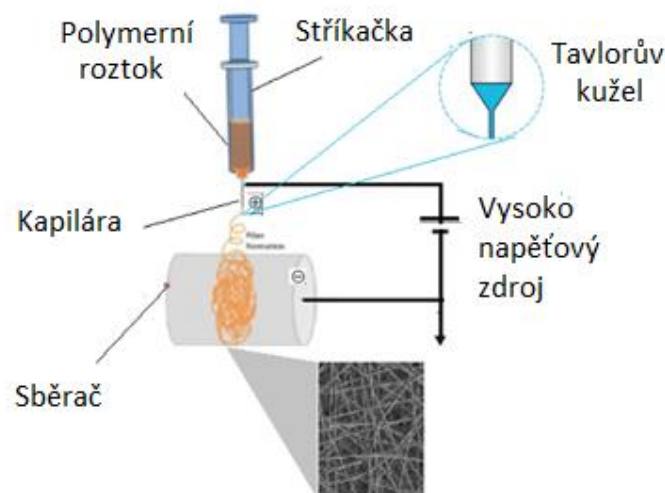
Nejběžnějším způsobem pokrytí textilního vlákna je ponoření jej do roztoku vodivého materiálu, který lze provádět prakticky v jakémkoliv měřítku a bez specializovaného vybavení [31]. V tomto procesu procházejí vlákna čtyřmi etapami. První je odvíjení přízí přímo z cívky, druhá je přechod přes nádobu s potahovaným roztokem. Ve třetí etapě procházejí ohřívací komorou pro sušení a odstraňování přebytečné vlhkosti a poslední etapou je větrání přízí na speciálních navržených cívkách [30].

- **Zvlákňování vodivých materiálů**

### **Elektrospinning**

Zvlákňování jako takové bylo popsáno v kapitole 2.2.1 a u vodivých materiálů probíhá tento proces stejným způsobem [32], [33], [24], [34]. Existuje i jiný způsob, který se nazývá elektrospinnig. To je proces, při kterém mohou být vyrobeny polymerní nanovlákna s průměrem menším než 100nm (na rozdíl od běžných způsobů zvlákňování, které jsou schopny produkovat vlákna s průměrem až do rozsahu mikrometrů) pomocí elektrostaticky poháněného toku polymerního roztoku nebo taveniny. Obvod

elektrospinningu (obr. 2.3) se skládá z vysokonapěťového zdroje ( $\leq 25\text{kV}$ ), stříkačky/kapiláry a sběrače [35]. Elektroda z napěťového zdroje je umístěna ve vodivé polymerní tekutině (např. PA [36]) nebo na špičku stříkačky, je-li užita s kovovou jehlou. Kovová elektroda v kontaktu s roztokem/taveninou polymerních molekul, vytváří v roztoku/tavenině přebytek kladných nebo záporných iontů. Elektrické odpudivé síly mezi ionty stejného náboje odpuzují přebytečné ionty co nejdále od sebe a koncentrují tak náboj na povrchu roztoku. Elektrické odpudivé síly mezi ionty odporují silám z povrchového napětí roztoku, jinými slovy vzájemné odpuzování náboje způsobuje sílu přímo opačnou k povrchovému napětí. V praxi je akumulováno dostatečné množství iontů k překonání povrchového napětí [37]. Když je na roztok polymeru aplikováno vysoké napětí a intenzita elektrického pole se zvyšuje, hemisférický povrch tekutiny na špičce kapilární trubice se prodlužuje a vytváří se kuželovitý tvar, známý jako Taylorův kužel [35]. Poté, co elektrostatische síly překonají povrchové napětí, z Taylorova kužele vytryskne tekutina pohybující se v elektrickém poli směrem k uzemněné desce. Tok se cestou ztenčuje a schne, což vede ke stavu pevného vlákna a na sběrač dopadá ve formě vlákna [38].

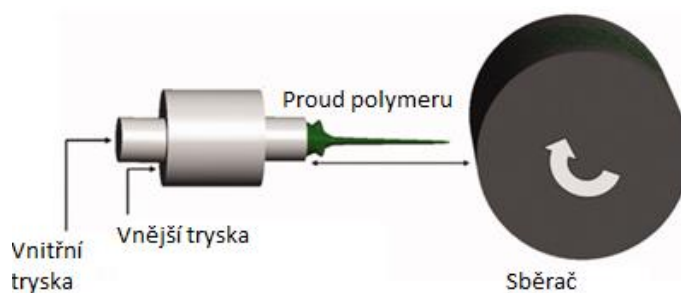


Obrázek 2.3 - Obvod electrospinningu (převzato z [39])

### Vyfukování taveniny

Vyfukování taveniny je další způsob výroby netkaných textilií, které se ukázaly být škálovatelné pro komerční výrobu. Teplý vzduch na povrchu polymerní taveniny způsobí, že se polymer za optimálních podmínek přemění na vlákno. Proces může být řízen tak, aby se vlákna vyráběla v rozmezí průměrů od  $1\mu\text{m}$  do  $50\mu\text{m}$ . I když je tradiční vyfukování taveniny ekonomickým procesem pro komerční výrobu materiálů z netkaných vláken, nemůže vyrábět vlákna s průměry ve stejném rozsahu velikostí jako vlákna

z elektrospinningu [40]. Tato metoda závisí na určitém uspořádání soustředných trysek. Ve vnitřní trysce je roztok polymeru, upravený přidáním vodivé složky (PA [41]) pro získání vodivého materiálu) vytlačován, zatímco z vnější trysky je uvolňován vysokotlaký plyn (vzduch, dusík, argon atd.). Roztok vodivého polymeru je protlačován vnitřní tryskou konstantní rychlostí posuvu, což má za následek vytvoření kapky na špičce vnitřní trysky a kapka je vytlačována vysokotlakým proudem stlačeného plynu vnější tryskou. Stlačený vzduch vystupující z trysky způsobuje, že se kapka na špičce trysky tvaruje do kužele podobného Taylorova kužele při elektrospinningu. Když je překročen kritický tlak vzduchu, tryska vyletí z vrcholu tohoto kužele a míří k sběrnému cíli. Po dobu cesty k sběrači, paprsek prochází okolním prostředím a rozpouštědlo polymeru se odpařuje a zanechává po sobě vlákna polymeru, která mohou být shromažďována prakticky na jakémkoli sběrači. To zahrnuje lidskou kůži nebo nekovové kolektory. Tím je zdůrazněna výhoda oproti elektrospinningu, který závisí na rozdílu napětí mezi výsledným polymerem a sběračem [42].



Obrázek 2.4 - Obvod metody vyfukování taveniny (převzato z [42])

- **Příze s integrovanými drátky**

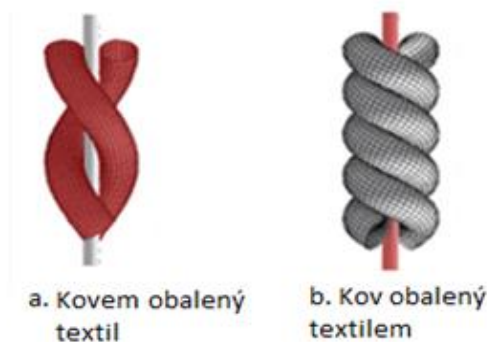
Přiřazení vodivých materiálu do příze jádro-plášť, kde jádro a plášť drží pohromadě na základě tření, se dostalo velké pozornosti mezi výzkumníky [43]. Kompozitní příze se běžně používají v základních a technických textilních aplikacích a jsou nejčastěji vyráběny dvousložkovou strukturou (jádro a plášť). Výroba jádrové příze je proces, při kterém jsou vlákna zkroucena kolem jádrových struktur, jimiž může být monofilament nebo příze ze staplových vláken. Nejčastěji používané vodivé dráty jsou měď, stříbro, nerezová ocel nebo hliník a jako nevodivá tkanina je nejvhodnější bavlna díky svým vynikajícím vlastnostem, které jsou vysoká míra absorpce, nealergenní povaha nebo lepší tepelná vodivost [44].

Struktura těchto přízí může být rozdělena do dvou tříd. První je příze obalena kovem, kde se vodivá příze skládá hlavně z pramene nevodivé příze zabalené jedním nebo více



kovovými dráty (obr. 2.10 a). Druhá struktura je kov obalený přízí. Zde jemný kovový drát slouží

jako jádro pokryté nevodivými vlákny. Textilní plášť může sloužit jako ochrana pomáhající odolávat fyzickému namáhání a poskytuje elektrickou izolaci (obr. 2.5 b) [45].



Obrázek 2.5 - struktura přízí jádro-plášť (převzato z [45])

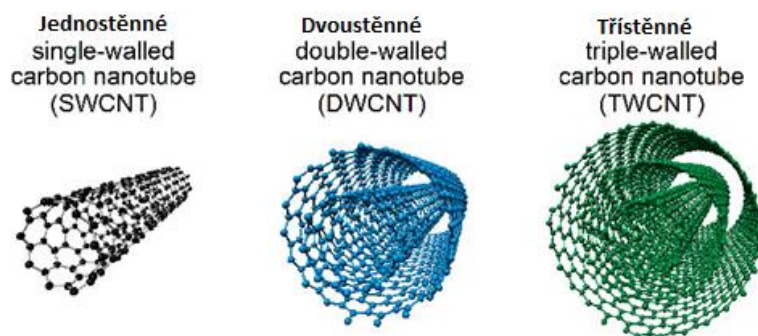
### 2.2.3 Materiály pro vodivá vlákna

- **Kovy**

Nejběžnější kovy k vytvoření vodivých vláken jsou stříbro, zlato, měď a hliník. Ze všech těchto materiálů se nejčastěji používá stříbro pro svojí elektrickou a tepelnou vodivost a jeho stabilitu ve vzduchu [27], [46], [47].

- **Formy uhlíku (uhlíkové nanorubice)**

Mezi vodivými plnivy získaly carbon nanotubes (CNT) zájem, protože mohou zlepšovat řadu vlastností, pokud jsou integrovány do polymerní matrice. Mají mimořádné mechanické vlastnosti, elektrickou vodivost a vysoký poměr stran a unikátní atomovou strukturu [34]. Jednotěnné uhlíkové nanorubice, single walled carbon nanotube (SWCNT), mohou přenášet elektrony po dlouhých délkách bez výrazného přerušování a to je činí vodivějšími než měď [48].



Obrázek 2.6 - Jednotěnné, dvoustěnné a třístěnné uhlíkové nanorubice (převzato z [49])

- **Vodivé polymery**

Vodivé polymery jako PEDOT:PSS jsou velmi atraktivní organické materiály pro aplikace elektronických a fotovoltaických zařízení, protože mají vysokou vodivost a optickou transparentnost a byly převážně používány v čistě organických elektronických zařízeních [50]. Mezi různými vodivými polymery je PEDOT:PSS jedním z nejúspěšnějších a nejzkoumanějších materiálů ve vývoji [51].

Polyanilin je vodivý polymer ze skupiny polo pružných vodivých polymerů. Ačkoliv je známý více jak 150 let, teprve v nedávné minulosti zachytil pozornost vědecké komunity díky svým dobrým vodivým vlastnostem. Mezi řadou vodivých polymerů je polyanilin jedinečný díky své snadné syntéze, stabilitě v prostředí a jednoduchému dopování. Díky své bohaté chemii patří za posledních 20 let k nejvíce studovaným vodivým polymerům [52].

Polypyrol (PPY) vykazuje dobré mechanické, chemické a elektrické vlastnosti a kromě toho lze snadno syntetizovat. Společně se zmíněnými vlastnostmi a jeho nízkou cenou je slibný pro komerční aplikace [48], [53], [54]. PPY lze snadno vyrobit buďto chemicky nebo elektrochemicky, ale nevýhodou je, že vyrobený PPY těmito konvenčními způsoby je nerozpustný v běžných organických rozpouštědlech [24], [55]. Nicméně studie [35] prokázala rozpustnost PPY, pokud je do něj začleněn dopant sulfosukcinátového aniontu (DEHS) a poté lze uplatnit rozpouštědlo dimethylsulfoxid (DMSO).

#### 2.2.4 Integrovní technologie

Klíčovým krokem směrem k maximálnímu využití smart textilií je integrace elektroniky přímo do textilie. Cílem je tedy integrovat elektronická zařízení a propojovat je přímo v textilii při zachování základních textilních vlastností [56]. Úspěšná integrace vytváří spolehlivé vodivé cesty na tkanině, a zároveň ji chrání proti opakovaným změnám rozměrů nebo abrazi [45]. Integrace elektronických součástí a funkcí do smart textilií je významným konceptem, který se objevil v posledních 15 letech a lze jej považovat za přímý důsledek miniaturizace silikonové technologie. Do e-textilií se začleňují nejen integrované obvody upevněné na textilním substrátu, ale z modernějšího hlediska i elektronické nebo snímací komponenty ve formě vláken, které mohou být přímo tkány do tkaniny [57].

V mnoha metodách výroby inteligentních textilií je elektronika integrována do textilií připojením desek plošných spojů s mikroprocesory, čidly a jednotkami pro ukládání dat. Nevýhoda tohoto způsobu spočívá v tuhosti v místě DPS, což snižuje

omyvatelnost a nositelnost hotové inteligentní textilie [57]. Spojení mezi jednotlivými DPS na textilních podkladech se dosahuje různými způsoby. Na textilní substrát jsou například nalepeny izolované měděné dráty, vodivé příze jsou tkané do textilie nebo vodivá pasta je nanášena sítotiskem na textilii [58].

Jiný přístup je založen na integraci přízí s určitými elektronickými zařízeními, jako jsou tenkovrstvé tranzistory [56], které jsou umístěny na tvarovaných částech (flexibilní plasty) a tyto části odpovídají specifickým částem na těle. Proto musí být senzory správně umístěny do oděvu, aby pasovaly na správný kontakt s tělem a nedošlo k možnému nesouladu mezi tělem a senzory [59]. Tímto způsobem zůstávají textilní vlastnosti nezměněny. Všechny elektrody musí být v těsném kontaktu s pokožkou a tak se taková látka nazývá „druhá kůže“ [60]. Integrace tenkovrstvých tranzistorů umožňuje, aby matrice senzorů a akčních členů byla přímo v textilii [58].



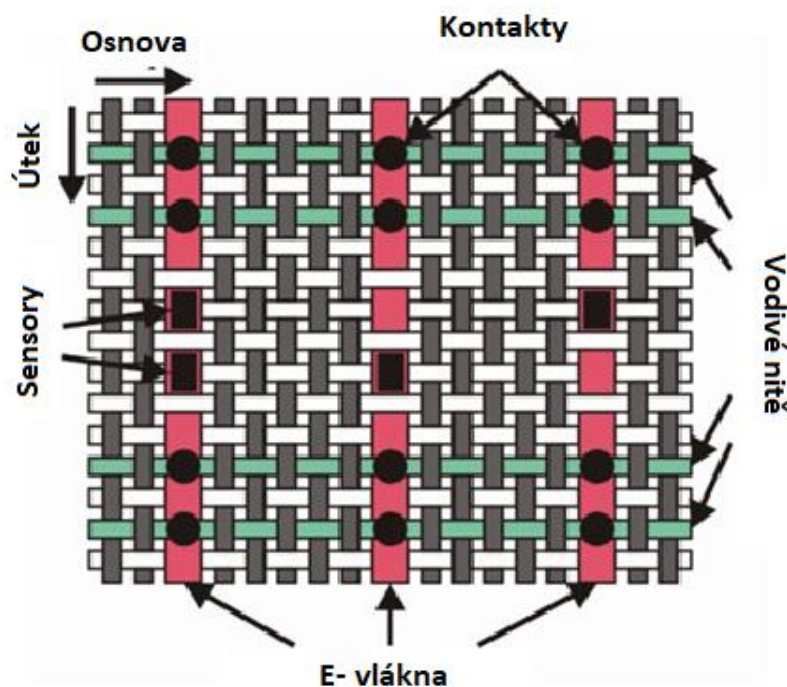
Obrázek 2.7 Textilie s integrovanými plastovými pružnými pruhy obsahující teplotní snímače (převzato z [58])

- **Tkaní**

Tkaní je proces výroby textilu ve velkém měřítku. Roční produkce bavlny pro oděvy v Americe by stačila na výrobu trička pro každého člověka na naší planetě. Tkaní prokládá dvě sady nití, zvané útky a osnovy, které jsou propleteny v pravém úhlu, aby vytvořily tkaninu. V tkacím stroji jsou osnovní příze upnuty a procházejí podélně strojem a útkové příze jsou tkané do osnovních přízí [58].

Vložením několika vodivých osnovních přízí a přízí v útku z pružného plastového vlákna potaženým vodivým materiálem (e-vlákna), vede k tkanině s elektronickou funkcí přidanou přímo během procesu tkaní. Příze ve směru osnovy a útku nepřispívají k elektronické funkci, zůstávají standardními textilními vlákny [59]. Na obr. 2.8

je znázorněno schéma výsledné elektronické textilie. Tři široké pruhy ve směru útku představují e-vlákna, zeleně zbarvené nitě v osnovním směru vodivé příze a černé tečky kontakty mezi vodivými osnovními vlákny a e-vlákny. Ostatní bílé a šedé nitě jsou standardní nevodivé příze. U vysoce výkonných textilií může být vzdálenost mezi sousedními osnovními vlákny až  $95\mu\text{m}$  s přesností  $\pm 10\mu\text{m}$  [58].



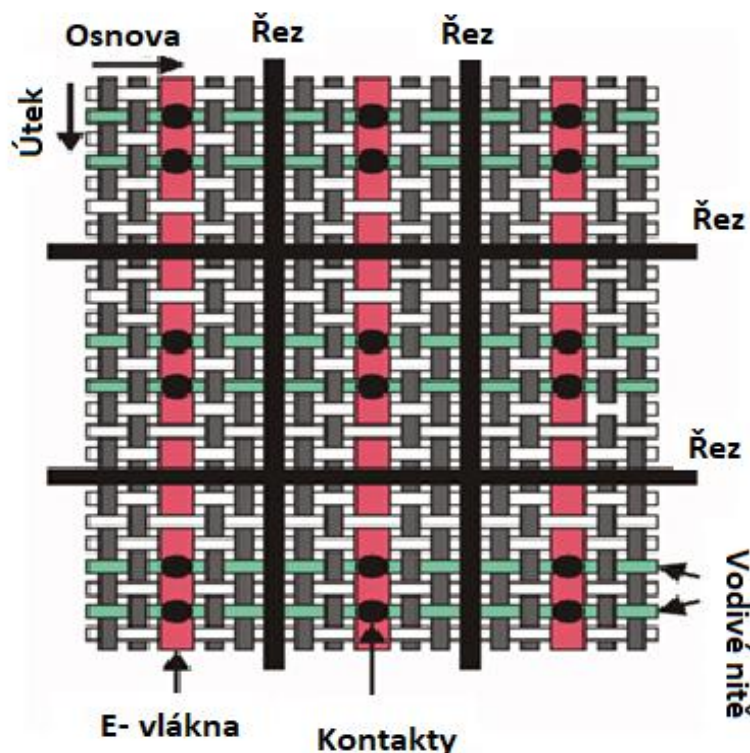
Obrázek 2.8 – Schéma tkané textilie (převzato z [58])

Použití plastových vláken ve směru útku v inteligentních textiliích nabízí několik výhod:

- Jsou vyrobeny z pružných podkladů, což zlepšuje schopnost textilie se ohýbat oproti připojení s DPS
- Plastové podklady jsou vhodné pro výrobu různých elektronických součástek. Jím mohou být tenkovrstvá zařízení (od jednoduchých tranzistorů až po složité obvody skládající se z více vrstev materiálu na plastovém substrátu), pasivní zařízení (senzory)
- Elektronické komponenty jsou na substrátu rozloženy po celé ploše
- Plastové substráty jsou kompatibilní s velkými průmyslovými procesy

Vzdálenost mezi dvěma sousedními vlákny může být volně volena během procesu tkaní. Pro konečnou úpravu je zapotřebí řezání vyrobené tkaniny na menší kousky, která je tkaná ve velkých strojích z ekonomických důvodů. Struktura XY elektronického textilního

materiálu umožňuje řezání na libovolné menší části, aniž by došlo k narušení elektronické funkce. Řezání tkaniny by mělo být prováděno pouze ve směru osnova a útku [58].



Obrázek 2.9 - Řezání tkaniny (převzato z [58])

- **Pletení**

Ploché a kruhové pletení umožňují omezit specifické příze v určitých oblastech tkaniny, přičemž práce s nití umožňuje zpracování různých přízí spolu s požadovanými vlastnostmi. Senzory, elektrody a spoje jsou plně integrovány do tkaniny a vyráběny v jediném kroku kombinováním vodivých a nevodivých přízí a vytváří se tak elastické, přilnavé a pohodlné oděvy [60].

- **Ploché pletení**

Plochý pletací stroj se skládá ze dvou plochých jehelních lůžek uspořádaných do obráceného tvaru „V“. Přes tyto jehlová lůžka se pohybuje dozadu a dopředu vozík, který pracuje tak, aby jehly selektivně pletly nebo přenášely stehy. Plochý pletací stroj je velmi flexibilní, což umožňuje složité tvary stehů. Obvykle jsou stroje vybaveny několika nezávisle poháněnými nosiči příze a umožňují tak výběr vodivé nebo nevodivé nitě na jednotlivé jehly. Technologie plochého pletení umožňuje postup „vanisé“, během kterého se dvě různé příze pletou dohromady stejnou jehlou, zatímco druhá příze běží paralelně na druhé jehle. Vodivý povrch je tedy vložen mezi dva izolované standardní textilní povrchy [60].

### Kruhové pletení (bezešvá technologie)

Technologie bezešvých úpletů poskytuje vysoce elastické oděvy, zejména pak pro sportovní oblečení v oblasti krku, pasu nebo hýždí, kde švy mohou být nepříjemné. Kromě toho mohou dobře pasovat a přizpůsobovat se tělu [61]. Kombinace těchto vlastností je důležitá pro snímače. Hlavní rozdíl mezi plochým a kruhovým pletením je v tom, že ploché pletení zvládne v jednom kroku kombinovat vkládání vodivé a izolační tkaniny, zatímco kruhové pletení musí nitě vplétat samostatně. Je však jedinečná pro svoji pružnost, pohodlí a nízké výrobní náklady [60].

- **Vyšívání**

Vyšívání je jedinou textilní technologií umožňující vlákna uspořádat (téměř) v libovolném směru [62]. V současné době se vyšívání nachází v různých funkčních aplikacích a je široce používáno při výrobě technických textilií. Pro technické vyšívání se nejčastěji využívá technika Tailored Fiber Placement (TFP). Tato technika zajišťuje orientaci vlákna ve všech směrech, vytvoření trojrozměrných struktur a nabízí velké možnosti pro design. Kromě vodivého propojení lze tuto metodu použít i pro stínění nebo vyztužení. Navíc vyšívací technika zajišťuje kontinuální dvoj/trojrozměrné uspořádání vláken [19].

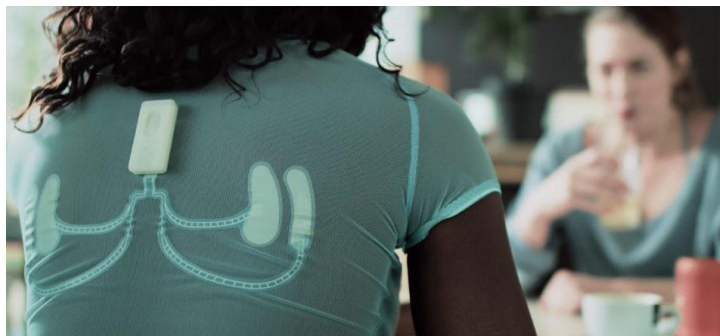


Obrázek 2.10 - Příklad vyšívaného vodivého motivu (převzato z [63])

### 2.3 Tištěné motivy

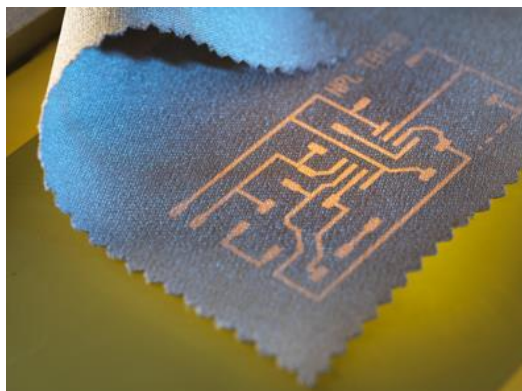
Tištěná elektronika (dále TE) je nový rychle se rozvíjející výrobní obor spojující dvě tradiční technologie – grafický tisk a výrobní elektroniku [64]. Tiskové procesy se ale vyvíjeli po celá desetiletí, zejména v oblastech vyžadující velkou plochu s obsahem informací za nízkou cenu [65]. A protože tisk byl efektivní způsob jak reprodukovat text a obrázky, lidé začali vyhledávat způsoby tisku na odlišné materiály. V dnešní době už tak můžeme tisknout na papír, kovy, sklo, textil, keramiku nebo dokonce i vejce [66].

Oblasti těžící z TE jsou radiofrekvenční identifikace, senzory, fotovoltaika, skladování energie atd. a umožňuje se tím zároveň vytvoření společnosti v IoT [67].



Obrázek 2.11 - Vytištěný senzor EKG na tričku (převzato z [68])

Technika tisku je cenově výhodná ve srovnání s jinými zavedenými způsoby propojení. Je závislý na proniknutí tiskové pasty (dále TP) do textilu a je žádoucí, aby TP zůstala převážně na povrchu a nebyl tedy rozptýlen do vnitřní struktury substrátu. Proto jsou pro tuto techniku žádoucí ploché a hladké povrchy v tkaninách s vysokou hustotou. Většina výzev v tomto případě souvisí s trvanlivostí tištěných vzorů v důsledku praskání nebo odlupování, ke kterému dochází ve vrstvě TP. Proto je na těchto površích nutná ochranná nevodivá dielektrická vrstva zaručující dlouhou životnost vodivých potisků a ochranu proti elektrickému zkratu [69].

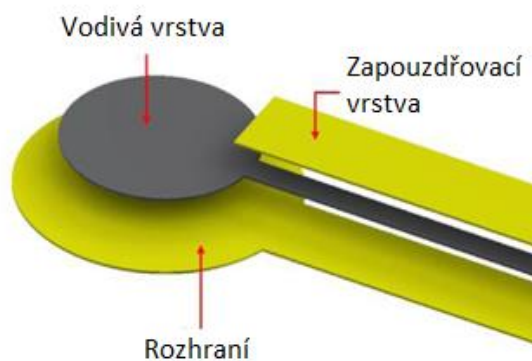


Obrázek 2.12 - Příklad tištěné elektroniky (převzato z [70])

Interaktivní elektronické textilie mohou být vyráběny pomocí vodivých TP. Všechny vodivé barvy obsahují vhodný vysoce vodivý prekurzor. Dále se v nich mohou nacházet přísady ovlivňující specifické vlastnosti TP. Většina TP je založena na vodě. Voda je hlavní složkou TP a musí být co nejčistší, aby se zabránilo kontaminaci. Tyto specializované TP mohou být tisknuty na různé materiály včetně textilu. Existuje několik technologií, které

mohou tisknout vodivý materiál na textilní podklad. Sítotisku a inkoustový tisk je nejvhodnější pro práci s vysokou přesností tisku.

Přímý tisk vodivých drah na tkanině je všestranná technika, avšak někdy vykazuje i své limity. Většina vodivých TP je založena na stříbrném plnivu a jsou tím pádem křehké a náchylné k praskání [8].



Obrázek 2.13 - Vytištěná vodivá cesta (převzato z [8])

### 2.3.1 Tiskové materiály

- **Nanočásticové tiskové pasty**

Pro získání vysoce vodivých stop se pro tištěné vodivé dráhy používají kovy s nízkým odporem jako je stříbro, měď a zlato [71]. Nanočásticové TP jsou kovovými suspenzemi nanočástic ve vodě nebo v organickém rozpouštědle jako je toulén, ethylenglykol nebo cyklohexanon. Zvolené rozpouštědlo se musí snadno odpařit po uložení TP na substrát, ale ne příliš rychle, aby nevysychalo již v trysce a tím jí ucpalo. Nanočástice jsou široce používané pro možnost výroby ve velkém množství a relativně dobré elektrické vodivosti. Tyto TP jsou však citlivé na aglomeraci suspendovaných částic, což vede ke zvýšení viskozity a to vede k ucpaní trysek tiskové hlavy [72].

V současné době jsou stříbrné nanočástice díky svým dobrým vlastnostem nejčastěji používanými TP pro výrobu vodivé dráhy [71]. Nízká stabilita nano-stříbrných TP s nízkou disperzí by však mohla způsobit agregaci částic, čímž by došlo k ucpaní trysek [73]. Zpočátku suspenze nanočástic stříbra a zlata přitahovala pozornost k výrobě vodivého TP z důvodu jejich vysoké elektrické vodivosti a tepelné stabilitě [74]. Avšak velmi vysoké náklady na stříbro a zlato omezují široké průmyslové využití. Vzhledem k tomu, že měď je mnohem levnější a má dobrou elektrickou vodivost (pouze o 6% nižší než u stříbra), lze měď považovat za kvalitní náhradu stříbrných nanočástic [75].



- **Organokovové tiskové pasty**

Organokovové TP jsou vysoko koncertované kovové soli rozpuštěné v organických rozpouštědlech nebo vodných roztocích [71]. Po vytištění na substrát se soli rozkládají na vodivý kov. Redukce na vodivé kovové se provádí tepelně nebo opticky. Tyto TP mají tu výhodu, že jsou ve formě roztoku a ne suspenze částic, čímž se odstraní riziko aglomerace a následného blokování trysek [72]. Stříbro, platina, měď, nikl a hliník jsou aktuální možné materiály pro organokovové TP [76].

- **Vodivé polymery**

Vodivé polymery jako PEDOT:PSS, polypyrrol a polyanilin bývají často použity pro vodivé TP z vodivých polymerů [72]. Vodivé polymery byly široce používány v mnoha elektronických zařízeních (např. baterie). Díky své organické povaze je mechanická stabilita a přilnavost vodivých polymerních tenkých vrstev na pružných podkladech velmi dobrá, dokonce i při ohýbání. Obecně ale mají tištěné stopy z vodivých polymerních TP nižší elektrickou vodivost než kovově vodivé TP. Namísto toho ale jsou lépe zpracovatelné [71].

- **Grafenové tiskové pasty**

Grafen představuje atraktivní materiál pro tištěnou elektroniku díky své vysoké vodivosti, stabilitě a pružnosti [77]. TP na bázi grafenu je z grafenového oxidu nebo je to exfoliovaný grafen. Příprava samotného grafenového oxidu je poměrně jednoduchá, ale vzhledem ke snížení vodivosti takového oxidu, jsou zapotřebí dodatečné úpravy, které ho činí méně důležitým pro průmyslové aplikace [78]. Jedná se o úpravu tepelnou nebo chemickou redukcí [72]. Exfoliovaný grafen je v praxi odlupován z grafitu v ethanolu se stabilizačním polymerem etylcelulózy (EC) vedoucí k výrobě vysoko disperzního materiálu s minimálním zpracováním [79].

## 2.3.2 Metody realizace tištěných motivů

### 2.3.2.1 Sítotisk

Sítotisk je nejzralejší tisková technologie a byl aplikován na výrobu DPS po desetiletí. Principem je protlačování TP za pomoci těrky sítem, které slouží jako šablonová předloha. Sítotisk je široce rozšířený v elektronice, poněvadž je tato metoda již „zvyklá“ na používání šablon pro vodivé cesty, rezistory nebo kondenzátory pro DPS [80]. Hlavní nevýhoda sítotisku je viskozita TP, je zapotřebí vysoké viskozity TP (500 – 5000 mPa\*s), aby se zabránilo rozlití TP mimo vytyčená místa. To je problematické u některých materiálů v elektronice. TP s vysokou viskozitou jsou typicky realizovány přidáním polymerních pojiv k TP. To není sice problém pro grafický vzhled, ale může to být problém pro tištěnou

elektroniku, protože taková pojiva mohou zničit funkčnost polovodičů nebo zavádět nadměrné prosakování. Například TP ze stříbra s pojivem jsou běžné pro sítotisk [81]. Velká výhoda sítotisku oproti jiným technikám je umožnění nanášení silných TP vrstev (5-25 $\mu\text{m}$ ) a tím tedy mohou vytvořit 3D objekty, ale také dávají možnost k vytvoření Braillova písma. Další výhoda je možnost tisknout motivy na širokou škálu podkladů zahrnující papír, dřevo, sklo, textil, kůži, keramiku, lepenky apod. [82].

Faktory ovlivňující tisk jsou viskozita TP, počet ok a tvrdost stěrky. Vyšší viskozita zabraňuje šíření TP po povrchu tkaniny a vytváří silnější vrstvu TP. Nižší počet ok uloží více TP, zatímco vyšší počet ok vytvoří obraz s vyšším rozlišením. Měkčí stěrka zanechává silnější vrstvu TP. Vrstva silné TP je prospěšná pro elektrický výkon, ale nevýhodná z mechanického hlediska. [69]

### 2.3.2.2 Inkoustový tisk

Inkoustový tisk je tisková technologie s nejnižšími náklady [80]. Je založený na procesu digitálního tisku a je schopen překonat omezení sítotisku s potřebou menších viskozit TP (1-25 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) [76]. Jedná se o bezkontaktní metodu schopnou ukládat požadované množství materiálů (kapek TP) přímo z počítačem vytvořeného obrazu na vybranou oblast substrátu generováním kapek ze zásobníku s minimálním zapojením člověka. Neexistuje žádné omezení pro typ substrátu, který může být buď pružný, nebo tuhý. Zásadní problém je ucívání trysek, protože TP obsahují nerozpustné mikro/nanočástice, které se mohou během tisku aglomerovat. V případě inkoustového tisku závisí kvalita vytištěné stránky do značné míry na správných vlastnostech TP, tiskových hlav a substrátu [83].

### 2.3.2.3 Hlubitisk

Po mnoho let byl hlubitisk považován za proces schopný produkovat tištěné výrobky nejvyšší kvality. Princip hlubitisku je založen na dvou válcích, kdy v jednom z nich (v tiskovém válci) je zapuštěna TP v rytých oblastech představující šablonu. Druhý válec přitlačuje substrát na tiskový válec a tak dochází k přenosu TP na substrát. Kromě dobře zavedených grafických aplikací získává hlubitisk velkou pozornost jako potenciální nízkonákladová výrobní metoda pro různou tištěnou elektroniku. Některé z výhod, které z něj činí atraktivní způsob pro strukturování vrstev pro elektroniku, jsou tisk s vysokým rozlišením, schopnost tisknout TP s nízkou viskozitou, odolnost nosiče šablony vůči rozpouštědlům a dlouhodobou stabilitu při vysokých rychlostech. Hlubitisk je mechanicky jednodušší ve srovnání např. s inkoustovým tiskem [64]. Tisk je zvláště vhodný pro pružné substráty a to je výhoda, pokud jde o vzorování nebo potahování

polymerních folií, které se stále více používají jako podklady, protože jsou ohebné, lehké a nerozbitné. [84].

## 2.4 Srovnání

### 2.4.1 Porovnání vodivých materiálů

Tabulka 3 – Porovnání vodivých materiálů [87]–[94]

Vodivá vlákna			
Materiál		Odpor na délku [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	Pevnost v tahu [MPa]
Kovy	Stříbro	0,8	69
Formy uhlíku	Uhlíkové nanotrubičky	40	600
Vodivé polymery	PEDOT: PSS	49000	100
Tiskové materiály			
Materiál		Odpor na délku [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	
Kovy	Stříbro	$3 \times 10^{-6}$	
Formy uhlíku	Grafen	$4 \times 10^{-3}$	
Vodivé polymery	PEDOT: PSS	1,3	

V tab. 3 lze vidět základní nejdůležitější vlastnosti vodivých vláken. Je patrné, že stříbro nejhorší pevnost v tahu, to ale vynahrazuje svými vodivými vlastnostmi a proto je nejvhodnější materiál pro vodivé propojení ve smart textiliích. Vodivé polymery získaly velké pozornosti vzhledem k jejich vynikající biokompatibilitě, průhlednosti a pružnosti [51]. Ale mají příliš vysoký odpor na jednotku délky a ve smart textiliích jsou zatím více používané jako senzory nebo elektrody transformátorů.

## 2.4.2 Porovnání vodivých vláken vyrobené různými metodami

Tabulka 2 – Porovnání vodivých vláken vyrobené různými metodami [8], [85], [86]

Příze s integrovanými drátky		Potažená vlákna	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
Pevnost	Flexibilita	Vhodné pro řadu vláken	Adheze
Složení	Vyšší hmotnost	Flexibilita	Koroze
Biologická inertnost			Křehké
Snadná dostupnost			
Nízké náklady			
Odolný vůči praní a pocení			

V tab. 2 jsou uvedeny výhody, popřípadě nevýhody pro vodivá vlákna vyrobená různými způsoby. Příze s integrovanými drátky mají snadnou dostupnost při nízkých nákladech a vzhledem ke svojí inertnosti nejsou citlivé na praní nebo pocení. Jsou ale těžké a málo pružné, což je nepohodlné pro nositele. Potažená vlákna jsou flexibilnější, a zároveň si udržují dobrou vodivost. Může ale docházet k problémům s přilnavostí kovu a textilu a tím ke ztrátě elektrických vlastností.

## 2.4.3 Porovnání integračních technologií

Tabulka 4 – Porovnání vlastností integračních technik [95], [96], [19]

Pletení	Tkaní	Vyšívání	Tištěná elektronika
Flexibilnější	Rozměrově stabilnější	Dobrá reprodukovatelnost výrobního procesu	Levné
Pohodlnější	Delší životnost	Rozměrově nejstabilnější	Náchylné k praskání vodivých cest
Nenáchylné k rýhám	Pevnější		

V tab. 4 jsou porovnané dvě metody integrace a pro jednu metodu jsou vypsány vlastnosti, které jsou lepší než druhá metoda. Pletení je flexibilnější a s tím souvisí i pohodlné nošení pro člověka. Zatímco tkaní je pevnější a stabilnější a nedochází tak k vytahání nebo smršťování materiálu, ale vyšívání má ještě lepší rozměrovou stabilitu.

Tištěná elektronika je sice levná, ale velká nevýhoda je jejich křehkost, tudíž vodivé cesty praskají a ztrácí svoje elektrické vlastnosti [95], [96].

#### 2.4.4 Porovnání tištěné elektroniky

Tabulka 5 – Porovnání metod tištěné elektroniky [82], [83], [97], [98]

Síťotisk (kontaktní)		Inkoustový tisk (bezkontaktní)		Hlubotisk (kontaktní)	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
Silné vrstvy tiskových past	Vysoká viskozita tiskových past	Nízké náklady	Ucpání trysek	Vysoké rozlišení tisku	Chemické úpravy tištěného podkladu
Spousta podkladů		Malá viskozita tiskových past		Velmi nízká viskozita tiskových past	

Tab. 5 uvádí výhody a nevýhody metod tištěné elektroniky. Nevýhoda síťotisku je potřeba vysokých viskozit TP ke kvalitnímu rozlišení [82]. Inkoustový bezkontaktní tisk naopak vyžaduje nižší viskozity TP. V opačném případě je náchylný k fluktuaci TP v trysece. [83]. Hlubotisk nabízí vysoké rozlišení tisku [97], ale substrát musí být napřed podroben chemickým úpravám [98].

### 3 Kontaktování

Křížování vodivých cest vyžaduje elektrický kontakt [56]. Elektrický kontakt byl vždy nezbytnou součástí elektrického obvodu [99], [100] a je definován jako dva vodiče elektrického proudu, které se dotýkají a prochází jimi elektrický proud místem jejich vzájemného styku. Jejich primární účel je umožnění nepřerušovaného průchodu elektrického proudu přes kontaktní rozhraní [101].

Změna tvaru a vzhledu oděvu ovlivňuje pohodlí nositele a proto by měla být velikost kontaktu (konektoru) co nejmenší. Zmenšení velikosti konektoru je však omezeno počtem připojených částí. Rozhraní mezi flexibilním textilem a kontaktem bývá často nejslabším článkem celého systému, a to hlavně díky mechanickému namáhání v místě spoje

Nové aplikace, jako monitorování celého těla, vyžadují velký počet senzorů v textilu a signály senzorů se mohou v dynamickém rozsahu lišit. Proto jsou nutné samostatné datové cesty. Aby bylo možné tyto požadavky zvládnout, musí rozhraní mezi textilem a elektronikou nabídnout mnoho spojení na malé ploše. Existují různé metody připojení textilií k elektronice jako druky nebo vodivé přilepení [102].

### 3.1 Požadavky na elektrický kontakt

Kontakty patří mezi silně namáhané části elektrických zařízení a jejich počet v jednom zařízení roste až na tisíce nebo desetitisíce. Například základní deska počítače může mít až 20 000 kontaktů. Různé typy kontaktů by měly splňovat různé požadavky v závislosti na jejich stabilitě a spolehlivosti. Protože hlavní funkce kontaktu je umožnit přenos elektrického proudu z jednoho kontaktního členu na další s minimálním dopadem na vysílaný signál, měl by splňovat následující požadavky:

- **Malý a stály kontaktní odpor** – Závisí na tvrdosti, pružnosti a plastičnosti použitých materiálů, na přitlačené síle dvou kontaktních materiálů. Jeho velikost by se neměla během používání měnit.
- **Co nejmenší migrace kovů**
- **Odolnost proti chemické korozi** – Chemická koroze ovlivňuje funkci kontaktu (přechodový odpor) a je zapříčiněna vznikem oxidických, sulfidických a jiných vrstev.
- **Odolnost proti mechanickému opotřebení kontaktních míst** – Např. otěr zkracuje životnost kontaktů, je ale do jisté míry žádoucí, jelikož na povrchu kontaktu ničí mechanicky korozní vrstvy.
- **Odolnost proti lepení a svařování kontaktů** – K lepení kontaktů dochází difúzí při zapnutém kontaktu i bez proudového zatížení. Projevuje se u ušlechtilých kovů.
- **Odolnost proti elektrickému oblouku** – Elektrický oblouk značně zkracuje životnost kontaktu. Lze jemu předejít vhodnou volbou materiálu nebo konstrukční úpravou.

### 3.2 Faktory ovlivňující spolehlivost

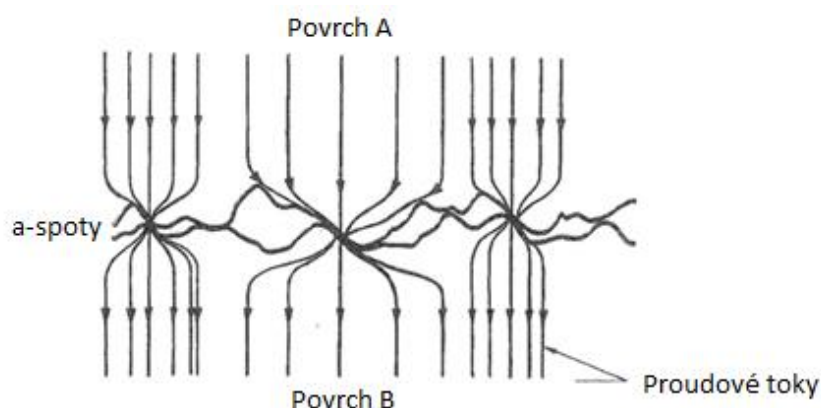
Spolehlivost kontaktů závisí na:

- **Elektrických podmínkách** – Napětí, proud, frekvence.
- **Mechanických podmínkách** – Tvar a velikost kontaktů, dotykový tlak atd.
- **Prostředí** – Prašnost, vlhkost, teplota, plyny.
- **Kontaktním materiálu** – Elektrické, mechanické a chemické vlastnosti.

### 3.3 Kontaktní odpor

Bylo zjištěno, že skutečné povrchy nejsou ploché, ale obsahují mnoho vrcholů a žlabů (asperit). V hromadném elektrickém rozhraní, kde jsou spojovacími prvky kovy, jsou

kontaktní povrchy často pokryty oxidy nebo jinými elektricky izolačními vrstvami. Rozhraní se stává elektricky vodivé pouze tehdy, pokud dochází ke kontaktu kov-kov, tedy v případě kdy nejsou povrchové izolační vrstvy celistvé. Tyto místa styku jsou označovány jako a-spoty a lze jich např. snáze docílit při větší přítlačné síle, čímž dochází k prasknutí těchto izolačních vrstev [99], [103]. Na *obr. 3.1* jsou znázorněny proudové toky skrz a-spoty, a jelikož dochází k zúžení proudových toku při průchodu z jednoho rozhraní do druhého, nastává zvýšení elektrického odporu. Tento odpor je definován jako úžinový odpor [101].



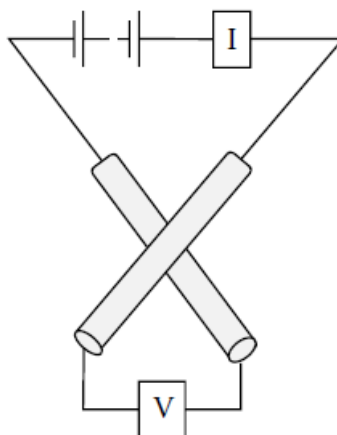
Obrázek 3.1 - Znázornění velikosti a-spotů (převzato z [99])

Další odpor ovlivňující kontaktní odpor jsou cizí vrstvy nacházející se na povrchu kontaktů a mají dva různé původy: Chemický (oxidy) nebo mechanický (nečistoty). Celkový kontaktní odpor je součet těchto dvou odporů [99].

### 3.3.1 Měření kontaktního odporu

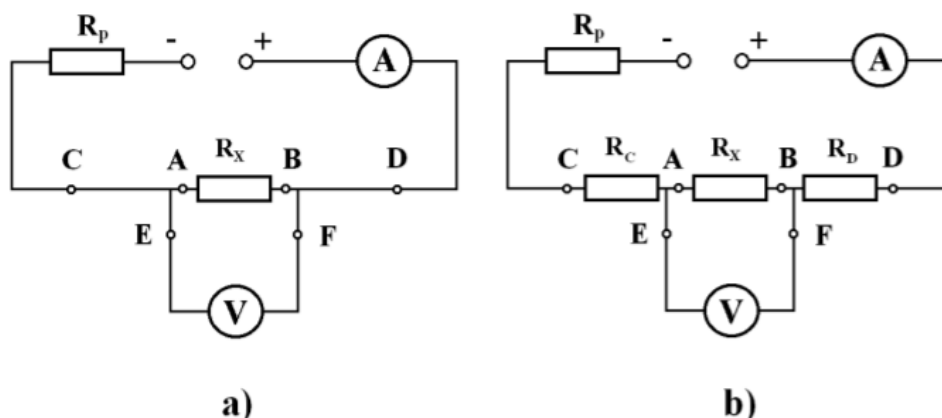
Obvykle se posuzuje průchod proudu změnou kontaktního odporu. Nejlepší způsob měření kontaktního odporu je známý jako „metoda zkřížených tyčí“ (crossed rod method) a jeho schéma je na *obr. 3.2*. Naměřené napětí v tomto příkladu je napětí na a-spotech ( $U_c$ ) a pokud proud procházející bodem spojení se označí jako  $I$  pak kontaktní odpor ( $R_c$ ) se vypočítá z rovnice: [99]

$$R_c = U_c / I \quad (2)$$



Obrázek 3.2 - Schéma metody zkřížených tyčí (převzato z [99])

Další běžně používaná metoda se nazývá čtyřvodičová metoda (obr. 3.3). Ta má výhodu ve vyloučení vlivu odporu přívodních vodičů, který může nastat při použití dvouvodičových metod. Schéma zapojení na obrázku 3.3a. Na obr. 3.3b jsou v zapojení navíc přechodové odpory  $R_C$  a  $R_D$  vznikající na svorkách C a D. Svorky A a B symbolizují vývody měřeného odporu  $R_X$ . Odpor  $R_P$  je předřadný ochranný rezistor. Svorky C a D se nazývají proudovými svorkami a E a F se nazývají napěťovými svorkami [104].



Obrázek 3.3 - Čtyřvodičová metoda (převzato z [104])

### 3.4 Metody kontaktování

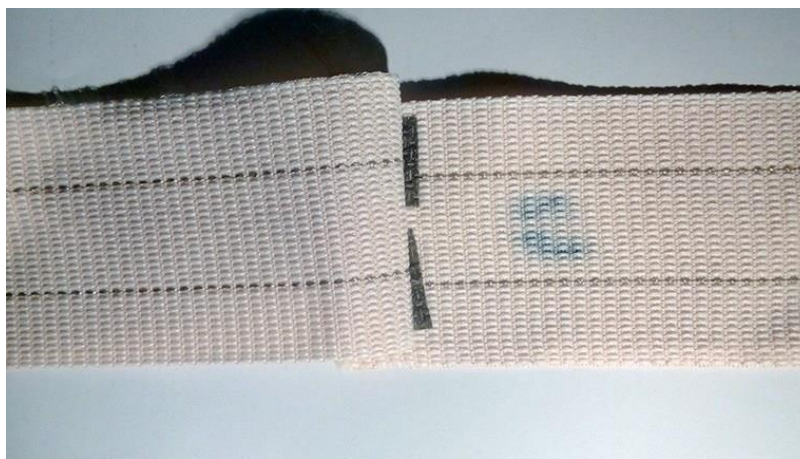
Obecně lze elektrické kontakty rozdělit do dvou základních kategorií: Stacionární a pohyblivé. Stacionární lze dále rozdělit na nerozebíratelné (pájené, svážené spoje) nebo rozebíratelné (šroubové spoje, konektory). Nerozebíratelné (trvalé) spoje mají vysokou mechanickou pevnost a poskytují stabilní elektrický kontakt s nízkým přechodovým odporem. Rozebíratelné spoje mohou být smontovány nebo rozebrány bez poškození integrity spoje [101].



### 3.4.1 Nerozebíratelné

- **Svařování**

Svařování lze použít v oděvním průmyslu během výroby netkaných textilií a jedná se o metodu tepelného spojení [105]. Je to proces, ve kterém jsou materiály spojeny tavením ve spoji. Po smíšení roztavených materiálů tuhnou při ochlazování a tvoří tak vazbu. Materiály jako zlato, měď nebo stříbro se taví při teplotě kolem 1000°C, ale tlakem působící na materiály lze teplotu tavení snížit až na cca 300°C. Kombinace tlaku a tepla se nazývá termokompresní spojování [13].



Obrázek 3.4 - Svařovaná textilie s integrovanými vodivými přízemi (převzato z [106])

- **Pájení**

Jelikož je pájení stejně jako svařování tepelné propojování, je třeba dbát na opatrnost, aby teplota taveného materiálu nepoškodila okolní tkaninu. Pájení je proces, při kterém jsou nerozebíratelně spojeny dva nebo více povrchů pájkou (roztaveným kovem), kdy se spojované kovy netaví. Tudíž pájka má nižší teplotu tavení než spojované části. Spojované části se propojí za pomoci difúze atomů pájky do materiálu. V elektrotechnice je známo pájení měkké nebo tvrdé a jejich rozdíl je v teplotě pájení. Hranice pro oddělení těchto druhů je 450°C. Využívá se spíše měkkého pájení, které je vhodné jak cenově nebo z hlediska elektrických vlastností, tak i hlavně díky mechanickým vlastnostem [107].

Po dlouhou dobu se využívaly olovnaté pájky, ale v posledních letech dochází k jejich ústupu a nahrazování bezolovnatých pájek, z důvodu jejich ekologičnosti. Olovo nemá dobré účinky na živé organismy. Pokud je člověk vystaven větší míře koncentrace olova, může dojít k otravě. Nižší množství olova může zapříčinit poškození nervového systému nebo vědomí [108].

Pro vytvoření kvalitního spoje s dlouhou životností se třeba dodržet následující podmínky:

**Smáčivost**– Schopnost vytvořit na povrchu povlak pájky zajišťující vytvoření mechanicky odolného spoje s nízkým elektrickým odporem.

**Pájitelnost** – Vývody ani připojovací plochy se nesmí v pájce rozpustit po dobu nutnou k zapájení a ani nesmí dojít k jejich teplotnímu poškození [109].



Obrázek 3.5 - Ukázka pájené vodivé tkaniny (převzato z [110])

- **Elektricky vodivá lepidla**

Elektricky vodivá lepidla se považují jako náhrada za olovnaté pájky. Nevodivá epoxidová pryskyřice tvoří základní materiál a vodivost se získává přidáním kovových částic tvořící 60-80% lepidla, u kterých je třeba, aby jich bylo co nejvíce a vzájemně se dotýkaly a vytvořily tak požadovanou velikost . Při použití stříbrných nanočástic lepidla vykazují odpor  $1,93 \cdot 10^{-4} \Omega$ . [111] Lepidla na bázi pryskyřic mají značně flexibilnější povahu oproti pájkám [112]. V textiliích se také využívají lepidla na bázi vody, která se po umístění na vazbu odpařuje [13].

Po nanesení lepidla nastává jeho vytvrzení. To se pohybuje v závislosti na zvoleném typu lepidla nebo vytvrzovacím zařízení od několika minut až po hodinu. Lepidla mající vysokou mechanickou pevnost se vytvrzují při teplotách 150°C a méně pevná lepidla se vytvrzují v teplotách kole 100°C [113].

Jednou z hlavních výhod vodivých lepidel oproti pájkám je možnost zaručit lepidla s izotropní elektrickou vodivostí (elektrická vodivost stejná ve všech směrech) nebo lepidla s anizotropní vodivostí (v jednom směru vysoká vodivost a v ostatních je lepidlo jako izolant) [114].

**Izotropní vodivost** – Hustota kovových částic v lepidle je natolik velká, že jsou navzájem ve styku a tím se zaručí potřebná elektrická vodivost. Tato lepidla se používají pro přilepení jednoduchých součástek (rezistor, kapacitor) na DPS. Lze je využít i pro vodivé spojení integrovaných obvodů, pokud je rozteč vývodů dostatečně vysoká [114].

**Anizotropní vodivost** – Anizotropní vodivosti se docílí malé koncentrace vodivých částic (obvykle 25%-35%), aby se kovové části dotýkaly pouze natolik, že nevytvoří

souvislou vodivou síť. K dosažení vodivosti v jednom směru se vývod přípojovací součástky přitlačí do anizotropního lepidla a tím se vodivé části dostanou na mechanický kontakt a tak se lepidlo chová pouze v tomto směru [114].

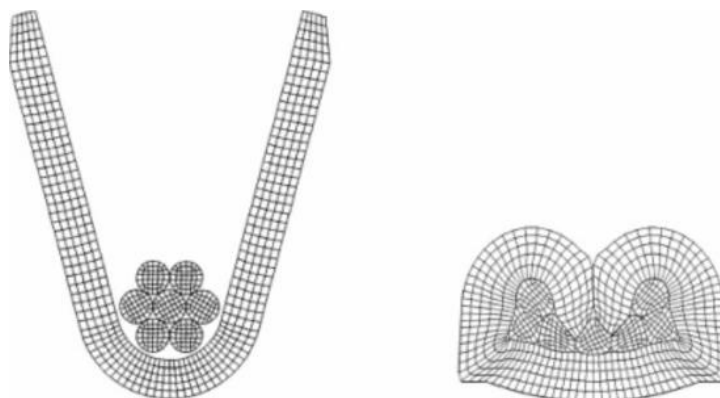
- **Krimpování**

Krimpování je dobře známá propojovací technologie, která pracuje při pokojové teplotě a má za následek robustní tvarové a silové spojení. Proto je to metoda velmi slibná pro textilie [115].



Obrázek 3.6 - Krimpování na textili (převzato z [115])

Jedná se o spojení dvou kovových částí deformací jednoho členu kolem druhého (princip na obr. 3.7). Elektrické a mechanické spojení je vytvořeno během krimpování v důsledku síly a tvaru. Typicky kovový válec, působící jako svorka, je obtočen kolem vodiče. Speciálně navržený nástroj zabalí hlaveň ve tvaru písmene U kolem kruhového vodiče. Těžká plastická deformace má za následek opracování válců za studena, které fixuje deformovaný stav válce [116].



Obrázek 3.7 - Princip krimpování - na levé straně před procesem, na pravé straně po krimpování (převzato z [116])

### 3.4.2 Rozebíratelné

- **Vodivé suché zipy**

Suché zipy jsou uzávěry obsahující háčky na jedné straně konektoru, které se zavěsí do smyček na druhé straně konektoru. Obvykle jsou vyrobeny z polyesteru a používají se v oděvním průmyslu jako náhrada za zipy, tkaničky či knoflíky. Vodivost se vytváření pokovením materiálu [117], např. stříbrem (*obr. 3.8*). Vodivé suché zipy jsou již komerčně dostupné a například adafruit.com nabízí vodivý suchý zip s použitím až 5000 cyklů připojení a odpojení s odporem  $2\Omega$ . Dají se také využít jako propojovací bloky e-textilií nebo propojující textilní antény [13], [118].



Obrázek 3.8 - Vodivý suchý zip pokovený stříbrem (převzato z [119])

- **Druky**

Druky se stávají vodivými využitím pokovení a pak mohou být použity jako konektory ve smart textiliích. Jsou připevněny na tkaninu nýtováním nebo šitím. Vodivé nitě jsou připevněny na druhy pomocí některé z neoddělitelných metod popsané v kapitole 3.4.1. Např. ve studii [56] byly vodivé nitě na druhy vodivě přilepeny. Jejich výhodou je, že se snadno odpojují a jsou malých rozměrů. Průměr je asi 1 mm. Nejmenší druhy mají v průměru 6-11 mm. Ve studii [120] se hodnota jejich odporu pohybovala kolem  $1,3\Omega$ .



Obrázek 3.9 - Vodivé druhy připojené na textil (převzato z [13])

- **Magnetické spojení**

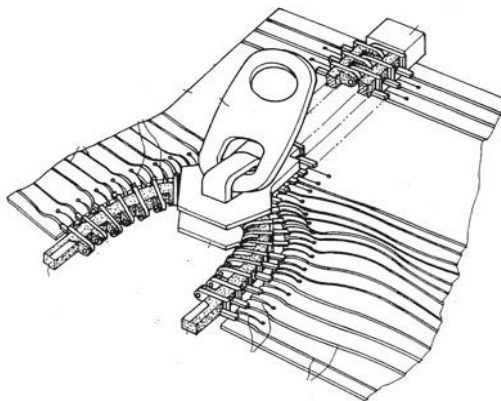
Jako další metoda pro rozebíratelné kontakty se dají použít magnety. Ty jsou na tkaninu nalepeny. Magnety mají schopnost se spojit bez vnější síly a zároveň umožňují snadné oddělení, správná funkce je však ovlivněna použitým materiálem magnetu. Volba magnetů je založena na požadavcích na sílu magnetického pole a povrchu magnetu. Magnetická síla musí být tak vysoká, aby mohla nést elektrické komponenty a vydržet každodenní tahové zatížení. Povrch má větší důležitost, protože elektrická odolnost nebo koroze jsou v podstatě faktory závislé na povrchu. Magnety ve studii získaly vodivost pokovením, kde byla použita vrstva 15 $\mu\text{m}$  slitinou nikl-měď. Bylo zjištěno, že elektrický kontakt mezi dvěma magnety je menší než 0,01 $\Omega$  [13], [121]. Možnost vodivého kontaktování na textilu pomocí magnetu na *obr. 3.10*.



Obrázek 3.10 - Vodivý magnet uložený na textili (převzato z [121])

- **Vodivé zipy**

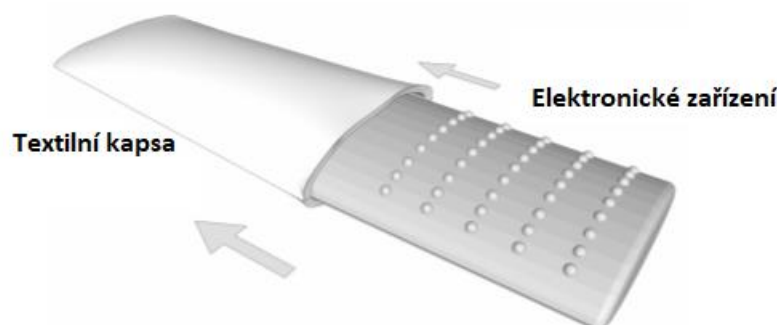
Ve vodivých zipech (*obr. 3.11*) se na každé straně střídají vodivé a izolační „zuby“ zipu, které zabraňují zkratům mezi sousedními vedeními. Každý prvek (zub) obsahuje vodivou oblast, která se dotýká vodivé oblasti protilehlého prvku, zatímco je obklopena nevodivým materiálem, aby byla zajištěna izolace mezi sousedními prvky [13].



Obrázek 3.11 - Vodivý zip (převzato z [13])

- **Propojení v kapse**

Toto spojení se skládá z textilní kapsy, která uvnitř sebe obsahuje vodivé podložky. Další částí je elektronické zařízení mající vodivé hrboly, které odpovídají uspořádání podložek v textilní kapse a vodivé části tak na sebe jednoduše navazují. Náhled na propojení v kapse je na *obr. 3.12*. Tato konstrukce umožňuje jednoduché připojení a odpojení zasunutím/vysunutím zařízení do/z kapsy [102].



Obrázek 3.12 - Princip propojení v kapse (převzato z [102])

### 3.5 Srovnání

#### 3.5.1 Porovnání metod kontaktování

Tabulka 7 – Porovnání vlastností kontaktních metod [116], [122]–[125]

Metoda							
Nerozebíratelné			Rozebíratelné				
Pájení/Sváření	Vodivá lepidla	Krimpování	Suchý zip	Druky	Magnetické spojení	Vodivý zip	Propojení v kapse
Nížejší přechodový odpor			Možné rozebrání bez poškození integrity spoje				
Vyšší mechanická pevnost							
Vysoká stabilita	Nízké teploty zpracování	Snadné a rychlé zpracování	Náchylné k ztrátě vodivosti	Malé rozměry	Hrozba odlepení od textilu	Náročné pro výrobu	Snadná aplikace

Tab. 7 popisuje vlastnosti jednotlivých kontaktních metod. Je patrné, že nerozebíratelné spoje mají lepší vodivost a mechanické vlastnosti. Oproti tomu lze ale rozebíratelné kontakty od sebe odpojit a posléze je zase vodivě připojit. Pájené a svařované kontakty mají vysokou stabilitu, ale jedná se o metody pracující s vysokými teplotami a je třeba brát zřetel na případné popálení textilu. Tento problém řeší vodivá lepidla, ale mají menší životnost než pájení nebo sváření. Krimpování je lehce použitelná metoda díky například krimpovacím kleštím. Suchý zip je velmi náchylný oproti ostatním rozebíratelným metodám k ztrátě svých vlastností, ale jeho přednost spočívá v jeho flexibilitě, díky které oděv neztrácí

své mechanické vlastnosti a je tak stále pohodlný pro nošení. Vodivý zip je náročný na výrobu, protože je třeba, aby jednotlivé „zuby“ zipu se střídaly ve vodivosti a izolaci. Druky jsou na tom lépe z hlediska životnosti, a ačkoli se jedná o pevné materiály, jejich malé rozměry nepřilíš omezují pohodlnost oděvu. Jelikož magnety jsou k textilu přilepeny, hrozí jejich odlepení. Propojení v kapse nabízí snadnou aplikaci zasunutí elektroniky do kapsy [116], [122]–[125].

## Závěr

Tato práce se zabývá problematiku vodivého propojování elektronických prvků a propojovacích struktur ve smart textiliích, které jsou následně mezi sebou porovnány. Dále se práce věnuje způsobům kontaktování na textilní substráty. V první části práce jsou obecně popsány smart textilie, kde je čtenář seznámen s možnostmi jejich využití a dále je popsána jejich výroba. Na smart textilie jsou kladeny mimo elektrických požadavků i nároky mechanické. Jelikož se jedná o elektroniku integrovanou přímo do oděvů, je zapotřebí dbát na komfort uživatele a docílit nejmenšího vlivu integrované elektroniky na pohodlí člověka.

Následující část pojednává o vytváření propojovacích struktur, které mohou být realizovány z vodivých nití nebo pomocí tiskových technik s využitím vodivých inkoustů a past. Vzhledem k náchylnosti tištěných motivů k praskání a následné degradaci elektrických vlastností, patří mezi více využívané vodivé nitě, které se dají vytvořit pokovením nevodivých přízí, integrací vodivých drátků do příze nebo přímým zvlákňováním vodivého materiálu. K pokovení se nejčastěji využívá stříbra, které lze použít i pro zvlákňovací úkon. Namísto kovového materiálu lze užít i vodivé polymery. Nejčastěji používaný materiál je PEDOT:PSS, nebo uhlíkové nanotrubičky. Z těchto používaných materiálů má nejlepší elektrické i mechanické vlastnosti stříbro. Uhlíkové nanotrubičky jsou do jisté míry omezeny flexibilitou výsledných vláken. PEDOT:PSS je co do flexibility mnohem přívětivější, ale za cenu zvýšené hodnoty odporu. Celkovým problémem ovrstvovacích technik je třepení vyrobených přízí a možnost vzniku zkratu mezi jednotlivými vodivými cestami. Ve prospěch zkratů dále hovoří i ochotná migrace stříbra v kombinaci s vlhkostí. Dále může nastat problém s adhezí mezi vodivým materiálem a textilním vláknem např. po vyprání. Elektricky vodivá nit' ztrácí svoji vodivost. Tato nevýhoda je potlačena při výrobě metodou zvlákňování. Zvlákňované materiály však vynikají nižší flexibilitou a vyšší hmotností, což působí nepříznivě na pohodlnost oděvu. Příze s integrovanými vodivými drátky patří mezi další způsoby funkcionalizace. Jedná se o dvousložkovou strukturu tvořenou jádrem a pláštěm, kde jádro může tvořit vodivá příze a pláštěm jí je textilní vlákno. Opačný případ je plášť zhotovený z vodivé příze obalující jádro z nevodivého materiálu. Taková vodivá příze je houževnatá a nedochází k ztrátám elektrických vlastností. Do textilu se zhotovené příze integrují pletením, tkaním nebo vyšíváním.



Poslední část je zaměřena na kontaktování elektronických prvků na textilních substrátech. V první řadě jsou vypsány požadavky na elektrický kontakt a jedním z nich je malý a stálý kontaktní odpor, který je dále podrobněji probrán. Dále jsou porovnávány metody rozebíratelného a nerozebíratelného kontaktování. Nerozebíratelné spoje mají všeobecně nižší přechodový odpor. Do této kategorie spadá pájení, svařování, kontaktování vodivými lepidly či krimpování. Pájení a svařování vyniká výbornými elektrickými vlastnostmi, ale je do značné míry omezeno teplotní odolností textilních substrátů. Vodivá lepidla lze aplikovat i za pokojové teploty, nicméně elektrický odpor kontaktu a mechanická odolnost je výrazně zhoršena. Rozebíratelné spoje lze od sebe bez poškození elektrického kontaktu oddělit. Mezi takové spoje řadíme vodivý suchý zip, druky nebo vodivý klasický zip. Rozebíratelné kontakty jako např. suchý zip je skvělý pro své mechanické vlastnosti a nositel textilie na oděvu nepozná nepohodlný pevný kontakt. Avšak po opakovaných cyklech rozepínání dochází k opotřebení kontaktu a ztrátě vodivosti. Druky jsou sice pevné, ale svými malými rozměry uživateli smart textilu nepříliš překážejí v komfortnosti. Klasický zip je v textiliích běžně využíván, ale výroba varianty vhodné pro kontaktování je poměrně náročná.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] T. Hughes-Riley, T. Dias, and C. Cork, "A Historical Review of the Development of Electronic Textiles," *Fibers*, vol. 6, no. 2, p. 34, 2018.
- [2] D. Zavec Pavlinić, "The potential of wearables related in smart textiles ," *Sigurnost*, vol. 59, no. 3, pp. 219–226, 2017.
- [3] Robert R Mather, "Intelligent textiles," *Color. Technol.*, pp. 36–41, 2001.
- [4] N. Grimmelsmann, Y. Martens, P. Schäl, H. Meissner, and A. Ehrmann, "Mechanical and Electrical Contacting of Electronic Components on Textiles by 3D Printing," *Procedia Technol.*, vol. 26, pp. 66–71, 2016.
- [5] J. P. Singh, "Intelligent textiles," *Asian Text. J.*, vol. 20, no. 8, pp. 67–71, 2011.
- [6] L. Affatato and C. Carfagna, "Smart Textiles: A Strategic Perspective of Textile Industry," *Adv. Sci. Technol.*, vol. 80, pp. 1–6, 2012.
- [7] M. S. Sarif Ullah Patwary, "Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview," *J. Text. Sci. Eng.*, vol. 05, no. 01, 2015.
- [8] M. Stoppa and A. Chiolerio, "Wearable electronics and smart textiles: A critical review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, pp. 11957–11992, 2014.
- [9] Heapsylon, "Sensoria Fitness: motion and activity tracking smart clothing for sports and fitness." [Online]. Dostupné na: <http://store.sensoriafitness.com/>. [16-02-2019].
- [10] myontec, "Know your muscles." [Online]. Dostupné na: <https://www.myontec.com/>. [16-02-2019].
- [11] M. M. Makandar and R. Zambaiti, "Intelligent textile for protection," pp. 1–5, 2011.
- [12] In&motion, "In&motion." [Online]. Dostupné na: <http://www.inemotion.com/#inemotion>. [06-02-2019].
- [13] S. Schneegass and O. Amft, *Smart Textiles fundamentals, design, and interaction*. 2017.
- [14] C. Husemann, T. Quadflieg, S. Jockenhövel, T. Gries, and P. Bosowski, "Classified Catalogue for Textile Based Sensors," *Adv. Sci. Technol.*, vol. 80, pp. 142–151, 2012.
- [15] C. C. Vu and J. Kim, "Human motion recognition using SWCNT textile sensor and fuzzy inference system based smart wearable," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 283, pp. 263–272, 2018.
- [16] C. Gonçalves, A. Ferreira da Silva, J. Gomes, and R. Simoes, "Wearable E-Textile Technologies: A Review on Sensors, Actuators and Control Elements," *Inventions*, vol. 3, no. 1, p. 14, 2018.

- [17] T. Grethe, S. Borczyk, K. Plenkmann, M. Normann, M. Rabe, and A. Schwarz-Pfeiffer, "Textile humidity sensors," *Symp. Des. Test, Integr. Packag. MEMS/MOEMS, DTIP 2018*, pp. 1–3, 2018.
- [18] J. Cheng, M. Sundholm, B. Zhou, M. Hirsch, and P. Lukowicz, "Smart-surface: Large scale textile pressure sensors arrays for activity recognition," *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 30, pp. 97–112, 2016.
- [19] M. Hoerr, I. Krievins, S. Jockenhoevel, V. Mecnika, and T. Gries, "Technical Embroidery for Smart Textiles: Review," *Mater. Sci. Text. Cloth. Technol.*, vol. 9, no. 40, p. 56, 2015.
- [20] J. Ouyang *et al.*, "Beyond energy harvesting - multi-functional triboelectric nanosensors on a textile," *Nano Energy*, vol. 57, no. December 2018, pp. 338–352, 2018.
- [21] K. Kadlece, "Snímače tlaku," pp. 20–23, 2011.
- [22] N. Baribina, A. Oks, I. Baltina, and P. Eizentals, "Comparative analysis of knitted pressure sensors," *Eng. Rural Dev.*, vol. 17, pp. 1599–1604, 2018.
- [23] Y. K. Kim, "Smart Textile Coatings and Laminates," *Smart Textile Coatings and Laminates*, 2010. [Online]. Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845693794500109>. [28-02-2019].
- [24] J. Foroughi, G. M. Spinks, G. G. Wallace, and P. G. Whitten, "Production of polypyrrole fibres by wet spinning," *Synth. Met.*, vol. 158, no. 3–4, pp. 104–107, 2008.
- [25] A. Ali *et al.*, "Electrical conductivity and physiological comfort of silver coated cotton fabrics," *J. Text. Inst.*, vol. 109, no. 5, pp. 620–628, 2018.
- [26] A. Schwarz *et al.*, "Electro-conductive and elastic hybrid yarns - The effects of stretching, cyclic straining and washing on their electro-conductive properties," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4247–4256, 2011.
- [27] Y. Atwa, N. Maheshwari, and I. A. Goldthorpe, "Silver nanowire coated threads for electrically conductive textiles," *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, no. 16, pp. 3908–3912, 2015.
- [28] B. Kim, V. Koncar, and C. Dufour, "Polyaniline-coated PET conductive yarns: Study of electrical, mechanical, and electro-mechanical properties," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 101, no. 3, pp. 1252–1256, 2006.
- [29] A. I. S. Neves *et al.*, "Towards conductive textiles: Coating polymeric fibres with

- graphene,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2017.
- [30] R. Alagirusamy, J. Eichhoff, T. Gries, and S. Jockenhoevel, “Coating of conductive yarns for electro-textile applications,” *J. Text. Inst.*, vol. 104, no. 3, pp. 270–277, 2013.
- [31] A. Lund, N. M. van der Velden, N. K. Persson, M. M. Hamed, and C. Müller, “Electrically conducting fibres for e-textiles: An open playground for conjugated polymers and carbon nanomaterials,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 126, no. March, pp. 1–29, 2018.
- [32] B. Kim, V. Koncar, E. Devaux, C. Dufour, and P. Viallier, “Electrical and morphological properties of PP and PET conductive polymer fibers,” *Synth. Met.*, vol. 146, no. 2, pp. 167–174, 2004.
- [33] S. J. Pomfret, P. N. Adams, N. P. Comfort, and A. P. Monkman, “Electrical and mechanical properties of polyaniline fibres produced by a one-step wet spinning process,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 41, no. 6, pp. 2265–2269, 2000.
- [34] A. Soroudi and M. Skrifvars, “Melt blending of carbon nanotubes/polyaniline/polypropylene compounds and their melt spinning to conductive fibres,” *Synth. Met.*, vol. 160, no. 11–12, pp. 1143–1147, 2010.
- [35] K. Holmberg, “Organic reactions in microemulsions,” *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 8, pp. 145–155, 2003.
- [36] N. Bhardwaj and S. C. Kundu, “Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 28, no. 3, pp. 325–347, 2010.
- [37] S. Liu, K. White, and D. H. Reneker, “Controlled electrospinning to produce polymer nanofibers with specified diameters,” *2017 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–5, 2017.
- [38] E. Ewaldz, R. Patel, M. Banerjee, and B. K. Brettmann, “Material selection in electrospinning microparticles,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 153, no. August, pp. 529–537, 2018.
- [39] O. Postolache, S. MacOvei, A. Trandabat, and I. Hogas, “Electrospinning Application on Fabrication of PMMA Nanofibers Membranes for Electrochemical Sensors,” *EPE 2018 - Proc. 2018 10th Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, pp. 1015–1018, 2018.
- [40] C. Sheng, B. Wenting, T. Shijian, and W. Yuechuan, “Electrochromic Behaviors of Poly ( 3-n-octyloxythiophene ),” *Polymer (Guildf.)*, 2008.
- [41] P. Examiner and P. Marcantoni, “United States Patent(ELECTROBLOWING

- FIBER SPINNING PROCESS) ,” vol. 2, no. 12, 2009.
- [42] E. S. M. Juliano E. Oliveira, Eduardo A. Moraes, Rodrigo G. F. Costa, Andre´ S. Afonso, Luiz H. C. Mattoso, William J. Orts, “Nano and Submicrometric Fibers of Poly(D,L-Lactide) Obtained by Solution Blow Spinning: Process and Solution Variables,” *Polymer (Guildf)*, 2011.
- [43] M. R. Ahmad, M. H. M. Yahya, M. R. Hassan, J. Salleh, W. Y. W. Ahmad, and N. Hassim, “Some studies on shape memory alloy friction spun yarn,” *BEIAC 2012 - 2012 IEEE Business, Eng. Ind. Appl. Colloq.*, pp. 216–219, 2012.
- [44] M. Uzun, E. Sancak, and I. Usta, “The use of conductive wires for smart and protective textiles,” *2015 E-Health Bioeng. Conf. EHB 2015*, pp. 1–4, 2016.
- [45] M. Suh, “E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies,” *Textile World*, 2010. [Online]. Dostupné na: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2010/04/e-textiles-for-wearability-review-of-integration-technologies/>. [17-04-2019].
- [46] M. Novotný, “VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky Katedra elektrických strojů a přístrojů,” 2011.
- [47] M. Grabovac, “Matea Grabovac Vodiči , poluvodiči i izolatori,” 2018.
- [48] J. Wu *et al.*, “High-performance polypyrrole nanoparticles counter electrode for dye-sensitized solar cells,” *J. Power Sources*, vol. 181, no. 1, pp. 172–176, 2008.
- [49] C. A. of Sciences, “Carbon Nanotubes - Price - Chinese Academy of Sciences, Chengdu Organic Chemistry Co., Ltd.,” *ACS Nano*. [Online]. Available: <http://www.timesnano.com/en/article.php?prt=4,31,107>. [Accessed: 16-Apr-2019].
- [50] A. Olivares, I. Cosme, S. Mansurova, A. Kosarev, and H. E. Martinez, “Study of electrical conductivity of PEDOT:PSS at temperatures >300 K for hybrid photovoltaic applications,” *2015 12th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Autom. Control. CCE 2015*, pp. 1–3, 2015.
- [51] M. Yang, Y. Zhang, H. Zhang, and Z. Li, “Characterization of PEDOT:PSS as a biocompatible conductive material,” *2015 IEEE 10th Int. Conf. Nano/Micro Eng. Mol. Syst. NEMS 2015*, pp. 149–151, 2015.
- [52] A. J. Uddin, “Coatings for technical textile yarns,” *Technical Textile Yarns*, 2010. [Online]. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polyaniline>. [10-04-2019].
- [53] S. Bose, T. Kuila, M. E. Uddin, N. H. Kim, A. K. T. Lau, and J. H. Lee, “In-situ synthesis and characterization of electrically conductive polypyrrole/graphene

- nanocomposites,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 51, no. 25, pp. 5921–5928, 2010.
- [54] J. Y. Lee, C. A. Bashur, A. S. Goldstein, and C. E. Schmidt, “Polypyrrole-coated electrospun PLGA nanofibers for neural tissue applications,” *Biomaterials*, vol. 30, no. 26, pp. 4325–4335, 2009.
- [55] M. A. Chougule, S. G. Pawar, P. R. Godse, R. N. Mulik, S. Sen, and V. B. Patil, “Synthesis and Characterization of Polypyrrole (PPy) Thin Films,” *Soft Nanosci. Lett.*, vol. 01, no. 01, pp. 6–10, 2011.
- [56] C. Zysset, K. Cherenack, T. Kinkeldei, and G. Tröster, “Weaving integrated circuits into textiles,” *Proc. - Int. Symp. Wearable Comput. ISWC*, 2010.
- [57] G. Mattana *et al.*, “Woven temperature and humidity sensors on flexible plastic substrates for e-textile applications,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 10, pp. 3901–3909, 2013.
- [58] C. Zysset, N. Münzenrieder, T. Kinkeldei, K. Cherenack, and G. Tröster, “Woven active-matrix display,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 59, no. 3, pp. 721–728, 2012.
- [59] M. Varga, N. Münzenrieder, C. Vogt, and G. Tröster, “Programmable e-textile composite Circuit,” *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, vol. 2015-July, pp. 678–684, 2015.
- [60] R. Paradiso and M. Pacelli, “Textile electrodes and integrated smart textile for reliable biomonitring,” *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, pp. 3274–3277, 2011.
- [61] D. A. West, “ITMA 2016 Technology: Knitting,” *Textile World*, 2016. [Online]. Dostupné na: <https://www.textileworld.com/textile-world/knitting-apparel/2016/02/itma-2016-technology-knitting/>. [18-04-2019].
- [62] X. Tao, *Smart fabrics and clothing*. 2001.
- [63] B. Ivsic, D. Bonafacic, and J. Bartolic, “Performance of Embroidered Conductive Yarn in Textile Antennas and Microstrip Lines,” *Eur. Conf. Antennas Propag.*, no. April, pp. 1–4, 2015.
- [64] E. Hrehorova *et al.*, “Gravure printing of conductive inks on glass substrates for applications in printed electronics,” *IEEE/OSA J. Disp. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 318–324, 2011.
- [65] T. Ge, J. Zhou, Y. Kang, and J. S. Chang, “Review: A fully-additive printed electronics process with very-low process variations (Bent and unbent substrates) and PDK,” *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, 2017.

- [66] A. Blayo and B. Pineaux, "Printing processes and their potential for RFID printing," no. October, p. 27, 2006.
- [67] H. Ushijima *et al.*, "Developments of high precision printing processes for fabricating the flexible electronics," *2017 Int. Conf. Electron. Packag. ICEP 2017*, pp. 439–440, 2017.
- [68] Materialdistrict.com, "SMART SHIRT WITH PRINTED ELECTRONICS," 2018. [Online]. Dostupné na: <https://materialdistrict.com/article/health-monitoring-smart-shirt-printed-electronics/>. [27-05-2019].
- [69] M. Ghahremani Honarvar and M. Latifi, "Overview of wearable electronics and smart textiles," *J. Text. Inst.*, vol. 108, no. 4, pp. 631–652, 2017.
- [70] "Graphene Textile new smart textiles manufacturing by 3D Print - Graphene Uses \_ Graphene Uses." .
- [71] S.-P. Chen, H.-L. Chiu, P.-H. Wang, and Y.-C. Liao, "Inkjet Printed Conductive Tracks for Printed Electronics," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. P3026–P3033, 2015.
- [72] G. Cummins and M. P. Y. Desmulliez, "Inkjet printing of conductive materials: A review," *Circuit World*, vol. 38, no. 4, pp. 193–213, 2012.
- [73] Y. Kim, B. Lee, S. Yang, I. Byun, I. Jeong, and S. M. Cho, "Use of copper ink for fabricating conductive electrodes and RFID antenna tags by screen printing," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 12, no. 2, pp. 473–478, 2012.
- [74] J. S. Kang, H. S. Kim, J. Ryu, H. Thomas Hahn, S. Jang, and J. W. Joung, "Inkjet printed electronics using copper nanoparticle ink," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 21, no. 11, pp. 1213–1220, 2010.
- [75] S. Magdassi, M. Grouchko, and A. Kamyshny, "Copper nanoparticles for printed electronics: Routes towards achieving oxidation stability," *Materials (Basel)*, vol. 3, no. 9, pp. 4626–4638, 2010.
- [76] I. Kim, H. Shahariar, W. F. Ingram, Y. Zhou, and J. S. Jur, "Inkjet Process for Conductive Patterning on Textiles: Maintaining Inherent Stretchability and Breathability in Knit Structures," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, no. 7, pp. 1–12, 2019.
- [77] W. J. Hyun, E. B. Secor, M. C. Hersam, C. D. Frisbie, and L. F. Francis, "High-resolution patterning of graphene by screen printing with a silicon stencil for highly flexible printed electronics," *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 109–115, 2015.
- [78] K. Arapov, E. Rubingh, R. Abbel, J. Laven, G. De With, and H. Friedrich, "Conductive Screen Printing Inks by Gelation of Graphene Dispersions," *Adv.*

- Funct. Mater.*, vol. 26, no. 4, pp. 586–593, 2016.
- [79] E. B. Secor, S. Lim, H. Zhang, C. D. Frisbie, L. F. Francis, and M. C. Hersam, “Gravure printing of graphene for large-area flexible electronics,” *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 26, pp. 4533–4538, 2014.
- [80] C. Fayomi, H. A. Facpong, J. Mueller, and G. W. Roberts, “Passive sensors for flexible hybrid-printed electronics’ systems: An IC designer view,” *Midwest Symp. Circuits Syst.*, vol. 2017-Augus, pp. 807–810, 2017.
- [81] V. Subramanian *et al.*, “Printed electronics for low-cost electronic systems: Technology status and application development,” *ESSCIRC 2008 - Proc. 34th Eur. Solid-State Circuits Conf.*, pp. 17–24, 2008.
- [82] D. Novaković, N. Kašiković, G. Vladić, and M. Pál, “Screen Printing,” *Print. Polym. Fundam. Appl.*, pp. 247–261, 2015.
- [83] A. Soleimani-Gorgani, *Inkjet Printing*. Elsevier Inc., 2015.
- [84] J. Puetz and M. A. Aegerter, “Direct gravure printing of indium tin oxide nanoparticle patterns on polymer foils,” *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 14, pp. 4495–4501, 2008.
- [85] O. Yuehui and C. William, J., “High Frequency Properties of Electro-Textiles for Wearable Antenna Applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 2, pp. 381–389, 2008.
- [86] B. F. Technologies, “Conductive theard for smart textiles - Bekaert.” [Online]. Dostupné na: <https://www.bekaert.com/en/products/basic-materials/textile/conductive-fibers-and-yarns-for-smart-textiles>. [03-05-2019].
- [87] H. Okuzaki, Y. Harashina, and H. Yan, “Highly conductive PEDOT/PSS microfibers fabricated by wet-spinning and dip-treatment in ethylene glycol,” *Eur. Polym. J.*, vol. 45, no. 1, pp. 256–261, 2009.
- [88] U. Lang, N. Naujoks, and J. Dual, “Mechanical characterization of PEDOT:PSS thin films,” *Synth. Met.*, vol. 159, no. 5–6, pp. 473–479, 2009.
- [89] R. Yoksan and S. Chirachanchai, “Silver nanoparticle-loaded chitosan-starch based films: Fabrication and evaluation of tensile, barrier and antimicrobial properties,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 30, no. 6, pp. 891–897, 2010.
- [90] C. D. Tran, W. Humphries, S. M. Smith, C. Huynh, and S. Lucas, “Improving the tensile strength of carbon nanotube spun yarns using a modified spinning process,” *Carbon N. Y.*, vol. 47, no. 11, pp. 2662–2670, 2009.
- [91] S. B. Fuller, E. J. Wilhelm, and J. M. Jacobson, “Ink-jet printed nanoparticle



- microelectromechanical systems,” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 54–60, 2012.
- [92] A. L. Dearden, P. J. Smith, D. Y. Shin, N. Reis, B. Derby, and P. O’Brien, “A low curing temperature silver ink for use in ink-jet printing and subsequent production of conductive tracks,” *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 26, no. 4, pp. 315–318, 2005.
- [93] L. Huang, Y. Huang, J. Liang, X. Wan, and Y. Chen, “Graphene-based conducting inks for direct inkjet printing of flexible conductive patterns and their applications in electric circuits and chemical sensors,” *Nano Res.*, vol. 4, no. 7, pp. 675–684, 2011.
- [94] S. Gamerith, A. Klug, H. Scheiber, U. Scherf, E. Moderegger, and E. J. W. List, “Direct ink-jet printing of Ag-Cu nanoparticle and Ag-precursor based electrodes for OFET applications,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 17, no. 16, pp. 3111–3118, 2007.
- [95] M. T. Jones, T. L. Martin, and B. Sawyer, “An Architecture for Electronic Textiles,” pp. 0–3, 2009.
- [96] N. Anbumani, “Knitting Fundamentals, Machines, Structures And Developments - N. Anbumani - Google Books,” *Knitting fundamentals, Machines, structures and Developments*, 2007. [Online]. Dostupné na: [https://books.google.com.pk/books?hl=en&lr=&id=PX6ZLw2hYRMC&oi=fnd&pg=PA3&dq=knitting+fundamentals+book&ots=QoAu\\_wsUww&sig=2tWmuVdsAA9djt3QBaBF4J2CvDQ#v=onepage&q=knitting+fundamentals+book&f=false](https://books.google.com.pk/books?hl=en&lr=&id=PX6ZLw2hYRMC&oi=fnd&pg=PA3&dq=knitting+fundamentals+book&ots=QoAu_wsUww&sig=2tWmuVdsAA9djt3QBaBF4J2CvDQ#v=onepage&q=knitting+fundamentals+book&f=false) [05-05-2019].
- [97] R. Szentgyörgyvölgyi, “Gravure Printing,” *Print. Polym. Fundam. Appl.*, pp. 199–215, 2015.
- [98] F. C. Krebs, “Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 4, pp. 394–412, 2009.
- [99] P. Slade, *Electrical Contacts Principles and Applications*. 2014.
- [100] Y. Fukuyama, J. Toyozumi, Y. Itou, T. Kondo, and N. H. Kaneko, “Evaluation of Deterioration Degree of Electrical Contacts with Precise Impedance Measurement,” *CPEM 2018 - Conf. Precis. Electromagn. Meas.*, pp. 1–2, 2018.
- [101] N. K. M. Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, *Electrical Contacts: Fundamentals, Application and Technology*. CRC Press, 2006.
- [102] A. Mehmman, M. Varga, K. Gönner, and G. Tröster, “A ball-grid-array-like electronics-to-textile pocket connector for wearable electronics,” pp. 57–60, 2015.
- [103] O. K. E. Okel, B. Schaar, “Simultaneous Measurement of Bulk and Contact

- Resistance of Conductive Materials for Fuel Cells,” *2008 IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, vol. 00, 2008.
- [104] D. Body, “Měření malých odporů čtyřvodičovou metodou,” vol. 3, pp. 1–2, 2013.
- [105] S. J. Russel, *Handbook od nonwovens*. CRC Press, 2007.
- [106] K. Rein, “ULTRASONIC WELDING OF NARROW FABRICS WITH CONDUCTIVE YARNS.” [Online]. Dostupné na: <https://www.texprocess-blog.com/en/ultrasonic-welding/>. [29-05-2019].
- [107] A. Yamaguchi, Y. Fukuhara, A. Behr, H. Hino, Y. Suzuki, and N. Ohashi, “The Influence of Resin Coverage on Reliability for Solder Joints Formed by One-Pass Reflow Using Resin Reinforced Low Temperature Solder Paste,” *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, pp. 1398–1404, 2017.
- [108] I. E. Anderson, S. Choquette, K. T. Reeve, and C. Handwerker, “Pb-free solders and other joining materials for potential replacement of high-Pb hierarchical solders,” *2018 Pan Pacific Microelectron. Symp. Pan Pacific 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 1–11, 2018.
- [109] C. C. Chiu and H. F. Li, “Solder void criteria of BTC component investigation,” *Proc. Tech. Pap. - Int. Microsystems, Packag. Assem. Circuits Technol. Conf. IMPACT*, vol. 2017-October, pp. 331–334, 2018.
- [110] W. A. Hyman, “How to get what you ‘want,’” *Journal of Clinical Engineering*, vol. 29, no. 1. pp. 1–2, 2004.
- [111] H. H. Lee, K. Sen Chou, and Z. W. Shih, “Effect of nano-sized silver particles on the resistivity of polymeric conductive adhesives,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 25, no. 5, pp. 437–441, 2005.
- [112] S. Yan, H. Ma, Z. Li, Y. Ma, and L. Ma, “Highly conductive, flexible PU/PANI based conductive adhesives for flexible electronics,” *Proc. - 2018 19th Int. Conf. Electron. Packag. Technol. ICEPT 2018*, pp. 1305–1308, 2018.
- [113] P. Mach and P. Zalska, “Influence of surface finish and additional curing on resistance of adhesive conductive joints,” *2018 Int. Conf. Diagnostics Electr. Eng. Diagnostika 2018*, 2018.
- [114] P. Mach and M. Placek, “Influence of filler concentration on frequency dependence of electrically conductive adhesive joints impedance,” *2013 IEEE 19th Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag. SIITME 2013 - Conf. Proc.*, pp. 79–82, 2013.
- [115] C. Kallmayer and E. Simon, “Large area sensor integration in textiles,” *Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices, SSD 2012 - Summ. Proc.*, vol. m, pp. 1–5, 2012.

- [116] E. P. Simon, C. Kallmayer, M. Schneider-Ramelow, and K. D. Lang, "Development of a multi-terminal crimp package for smart textile integration," *2012 4th Electron. Syst. Technol. Conf. ESTC 2012*, pp. 1–6, 2012.
- [117] S. Wattal, S. K. Spear, M. H. Imtiaz, and E. Sazonov, "A polypyrrole-coated textile electrode and connector for wearable ECG monitoring," *2018 IEEE 15th Int. Conf. Wearable Implant. Body Sens. Networks, BSN 2018*, vol. 2018-Janua, no. March, pp. 54–57, 2018.
- [118] R. D. Seager, W. Whittow, Y. Vardaxoglou, A. Chauraya, and S. Zhang, "Flexible radio frequency connectors for textile electronics," *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 22, pp. 1371–1373, 2013.
- [119] Adafruit, "Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits," 2015. [Online]. Dostupné na: <https://www.adafruit.com/product/751><https://www.adafruit.com/%5Cnhttps://www.adafruit.com/products/1141>. [22-05-2019].
- [120] J. Barabáš, L. Balogová, M. Gála, and B. Babušiak, "Conductive paths and influence of their interconnection on transmission of electric signal in smart clothing," *Vlakna a Text.*, vol. 24, no. 4, pp. 9–14, 2017.
- [121] K. Scheulen, A. Schwarz, and S. Jockenhoewel, "Reversible contacting of smart textiles with adhesive bonded magnets," p. 131, 2013.
- [122] X. Wei, H. Huang, L. Zhou, M. Zhang, and X. Liu, "On the advantages of using a hypoeutectic Sn-Zn as lead-free solder material," *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 3, pp. 655–658, 2007.
- [123] S. Nieland, M. Bähr, A. Böttger, A. Ostmann, and H. Reichl, "Advantages of Microelectronic Packaging for Low Temperature Lead Free Soldering of Thin Solar Cells," *22nd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, no. June 2014, p. 2467, 2007.
- [124] P. Liu and J. Huang, "The fatigue life analysis of conductive adhesive," *Proc. - 2013 14th Int. Conf. Electron. Packag. Technol. ICEPT 2013*, pp. 804–808, 2013.
- [125] H. Kristiansen, S. Helland, E. Kalland, M. A. Ras, and C. Grosse, "Electrical and Thermal Conduction of Isotropic Conductive Adhesive based on Novel Conductive Particles," *Proc. - 2018 IMAPS Nord. Conf. Microelectron. Packag. Nord. 2018*, pp. 40–44, 2018.