

# **Maticový prvek pro senzorku tištěný na ohebný substrát**

Bc. Petr Měrka

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav inženýrství polymerů  
akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Měrka**  
Osobní číslo: **T13973**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Maticový prvek pro senzorku tištěný na ohebný substrát**

Zásady pro vypracování:

**Anotace:** Cílem práce je vytisknout maticový prvek pro senzorku na ohebný substrát. Tento prvek potom aplikovat v demonstračním zařízení.

**Literární rešerše:**

1. Co jsou senzory? Jejich základní parametry, jejich vyjádření a měření.
2. Senzory na plyny a páry těkavých látek.
3. Senzory založené na změně vodivosti
4. Plošné senzory, tenké vrstvy
5. Možnosti tisku při jejich přípravě
6. Flexibilní substráty

**Praktická část**

1. Na základě rešerše výběr materiálového systému a technologie z dostupných možností na UTB, formulace zpřesněných cílů práce.
2. Návrh motivů pro tisk
3. Tisk částí obvodů
4. Nanášení citlivé vrstvy (preferováno tiskem, ale možno i jinými metodami)
5. Finální operace a dokončení laboratorních vzorků maticových senzorů
6. Testování senzorů
7. shrnutí a diskuse výsledků
8. Formulace závěrů

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. KALANTAR-ZADEH, Kourosh. *Sensors: an introductory course*. New York: Springer, c2013, xii, 196 s. ISBN 978-1-4614-5051-1.
2. HRUŠKA, František. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití (e-book)*. 2. rozš. vyd. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, [202] s. ISBN 978-80-7454-096-7.
3. LIM, Teik-Cheng. *Nanosensors: theory and applications in industry, healthcare and defense*. Boca Raton: CRC Press, c2011, xii, 321 s. ISBN 978-1-4398-0736-1.
4. WANG, Binghe a Eric V ANSLYN. *Chemosensors: principles, strategies, and applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2011, 1 online zdroj (x, 498 s., [7] s. příl.). ISBN 978-1-118-01958-0.
5. FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, c2010, xv, 663 s. ISBN 978-1-4419-6465-6.
6. MUKHOPADHYAY, Subhas Chandra a Ray Y HUANG. *Sensors: advancements in modeling, design issues, fabrication and practical applications*. Berlin: Springer, 2008, xx, 424 s. ISBN 978-3-540-69030-6.

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. et Ing. Ivo Kuřitka, Ph.D. et Ph.D.**

Centrum polymerních materiálů

Datum zadání diplomové práce:

**16. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**15. května 2015**

Ve Zlíně dne 2. března 2015

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

*děkan*



Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.

*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ..... Měrka Petr .....

Obor: ..... CHTM - IP .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně ..... 21.5.2015 .....

..... Měrka .....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení. Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## ABSTRAKT

V této diplomové práci byla vyvinuta metoda přípravy ohebného maticového prvku 3x3 senzorů par alkoholů a prvotně prozkoumány možnosti jeho využití při detekci alkoholových par. Maticový prvek byl vyroben na materiálové tiskárně za použití inkjetového tisku. Sensory jsou tvořeny stříbrnými (Ag) elektricky vodivými vrstvami a citlivými vrstvami oxidu měďnatého (CuO) na ohebném substrátu (PET folie), které byly natištěny inkousty tvořenými disperzemi nanočástic Ag a CuO. Sensory mají za normálních podmínek velký elektrický odpor, ale při styku s alkoholovými párami dojde k poklesu elektrického odporu senzorů. Když senzory přestanou být ve styku s alkoholovými parami, tak elektrický odpor znovu vzroste. Zkoumány byly odezvy senzorů na metanol, etanol a isopropanol při teplotách 25, 30, 35°C a bylo zjištěno, že tyto procesy jsou ve všech případech reverzibilní.

**Klíčová slova:** maticový prvek, senzor, ohebný substrát, PET folie, inkjetový tisk, inkoust, disperze, nanočástice, stříbro, CuO, alkoholové páry, odezva, elektrický odpor.

## ABSTRACT

In this diploma thesis, a method of flexible 3x3 sensor matrix element preparation has been developed and possibilities of its use for alcohol vapours detection studied. The matrix element was manufactured on material printer using ink jet printing. The sensors consist of silver (Ag) electrical conductive layers and sensitive copper(II) oxide (CuO) layers on flexible substrate (PET foil), which were printed by inks constituted by dispersions of Ag and CuO nanoparticles. Sensors have high electrical resistance in normal conditions, but their resistance decreases in contact with alcohol vapours. When the sensors are no longer in contact with alcohol vapours their electric resistance increases. The responses of sensors for methanol, ethanol and isopropanol were examined at temperatures of 25, 30, 35 ° C and it was found that the processes are reversible in all cases.

**Keywords:** matrix element, sensor, flexible substrate, PET foil, inkjet printing, ink, dispersion, nanoparticle, silver, CuO, alcohol vapours, response, electric resistance.

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce:

doc. Ing. et Ing. Ivu Kuřítkovi, Ph.D. et Ph.D.

za odborné rady, vedení a čas, které mi v průběhu vypracování této diplomové práce poskytoval.

Dále bych chtěl poděkovat za odbornou pomoc Ing. Petru Krčmářovi při tisku maticového prvku a Ing. Robertu Olejníkovi, Ph.D. za poskytnutí měřícího zařízení a za instruktáž pro práci na něm.

Chtěl bych také poděkovat mé rodině a přítelkyni za jejich podporu při mém studiu.

*Motto:*

*„Věda je pouhou samoúčelnou perverzí, pokud jejím konečným cílem není zlepšení situace člověka.“*

*Nikola Tesla*

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 SENZORY</b> .....	<b>12</b>
1.1 KLASIFIKACE SENZORŮ .....	12
1.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SENZORŮ .....	13
1.3 CHEMICKÉ SENZORY .....	14
1.3.1 Třídy chemických senzorů .....	15
1.3.1.1 Elektrické a elektrochemické senzory .....	15
1.3.1.2 Fyzikální senzory .....	15
1.4 SENZORY NA PLYNY A PÁRY TĚKAVÝCH LÁTEK .....	16
1.5 SENZORY ZALOŽENÉ NA ZMĚNĚ VODIVOSTI .....	16
1.5.1 Měření elektrického odporu .....	17
1.5.2 Základní části elektronických obvodů .....	18
1.5.2.1 Elektrický obvod .....	18
1.5.2.2 Elektrické jednobrany .....	18
1.5.2.3 Elektrické mnohobrany .....	19
1.5.2.4 Části složených elektrických obvodů .....	20
1.6 PLOŠNÉ SENZORY .....	20
1.6.1 Tenké vrstvy .....	21
1.7 MOŽNOSTI TISKU PŘI PŘÍPRAVĚ PLOŠNÝCH SENZORŮ .....	22
1.7.1 Síťový tisk .....	22
1.7.2 Ink Jet tisk .....	22
1.7.2.1 Kontinuální inkjetový tisk (CIJ) .....	22
1.7.2.2 Drop on demand (DOD) inkjetový tisk .....	23
1.7.3 Inkousty pro Inkjetový tisk .....	24
1.7.3.1 inkousty na vodní bázi .....	24
1.7.3.2 inkousty založené na změně fáze .....	24
1.7.3.3 inkousty na bázi rozpouštědel .....	24
1.7.3.4 inkousty vytvrzované UV zářením .....	25
1.7.4 Flexibilní substráty pro tisk .....	25
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>26</b>
<b>2 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>27</b>
<b>3 VÝROBA MATICOVÉHO PRVKU</b> .....	<b>28</b>
3.1 NÁVRH A VÝROBA PROPOJOVACÍHO PŘÍPRAVKU .....	28
3.2 NÁVRH MOTIVŮ PRO VÝROBU MATICOVÉHO PRVKU .....	29
3.2.1 Návrh motivu vodivých cest .....	30
3.2.2 Návrh motivu citlivé vrstvy .....	31
3.3 TISK MATICOVÉHO PRVKU .....	31
3.3.1 Materiálová cartridge .....	33
3.3.2 Příprava inkoustů pro tisk .....	33
3.3.3 Volba substrátu pro tisk .....	34
3.3.4 Tisk vodivých cest .....	35
3.3.5 Tisk citlivé vrstvy .....	36



3.4	ANALÝZA POVRCHU VYTIŠTĚNÉHO MATICOVÉHO PRVKU.....	37
3.4.1	Analýza povrchu vodivých cest optickým profilometrem .....	37
3.4.2	Analýza povrchu skenovacím elektronovým mikroskopem .....	40
<b>4</b>	<b>MĚŘENÍ NA MATICOVÉM PRVKU .....</b>	<b>42</b>
4.1	POUŽITÉ PŘÍSLUŠENSTVÍ A APARATURA .....	42
4.2	PRINCIP MĚŘENÍ .....	43
4.3	DETEKCE ALKOHOLOVÝCH PAR NA MATICOVÉM PRVKU .....	44
4.3.1	Detekce metanolových par .....	45
4.3.2	Detekce etanolových par .....	47
4.3.3	Detekce isopropanolových par .....	49
4.3.4	Shrnutí výsledků a diskuse testů par .....	50
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>57</b>

## ÚVOD

Díky technologickým pokrokům ve všech oblastech vědy se nám nabízí stále nové možnosti zkoumání světa kolem nás. Příkladem dokládajícím toto tvrzení jsou senzory. Senzory jsou zařízení, umožňují člověku za pomoci měřících přístrojů a zařízení vnímat a měřit takové vlastnosti světa kolem nás, které by jinak vnímat nemohl, nebo jen v omezené míře, protože pro jejich vnímání nemá vyvinuté smyslové orgány, nebo o tyto schopnosti v průběhu evoluce přišel či o možnostech jejich použití zkrátka neví.

Existuje celá řada senzorů pracujících na různých principech, určených pro nejrozličnější aplikace. Tyto aplikace zahrnují vše od měření teploty, pomocí jednoduchých termočlánků, až po velmi sofistikované zařízení v podobě elektronických nosů a jazyků.

Hlavním cílem této práce je navrhnout a vyrobit ohebný maticový prvek pro sensoriku, umožňující detekci alkoholových par.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 SENZORY

Slovo senzor je převzato z latinského slova „sensus“, což v překladu znamená: smysl, vjem, vnímání, cítit a bylo převedeno do mnoha světových jazyků.

Senzory jsou základním elementem snímačů technických přístrojů používaných ve vědeckých i praktických oblastech pro získávání informací o měřeném systému. Senzor je ovlivňován z vnějšího prostředí působící měřenou veličinou (stimulem), která vyvolá v senzoru měřitelnou fyzikální, chemickou nebo mechanickou změnu. [1,2]

### 1.1 Klasifikace senzorů

Všechny senzory mohou být dvojího druhu a to **pasivní** nebo **aktivní**.

**Pasivní sensory** nepotřebují vnější napájení (externí zdroj energie) a přímo mohou generovat elektrický signál v reakci na vnější podněty (stimuly), což znamená, že vstupní stimul energie je přímo přeměněn senzorem na výstupní signál. Takové senzory se nazývají „přímé senzory“. Většina z pasivních senzorů jsou senzory přímé. Příkladem mohou být například termočlánek, fotodioda či piezoelektrický senzor.

Na rozdíl od pasivních senzorů **aktivní senzory** vyžadují pro jejich funkci externí zdroj energie. Tato energie dodávaná senzoru se většinou nazývá budící signál (excitační signál). Budící signál je senzorem modifikován a následně převeden na výstup senzoru v podobě výstupního signálu. Aktivní senzory se někdy nazývají parametrické, protože jejich vlastnosti se mění jako odezva na vnější působení. Tyto vlastnosti mohou být následně převedeny na elektrické signály. Lze konstatovat, že parametr senzoru moduluje budící signál, a také to, že modulace nese informaci o naměřené hodnotě.

Příkladem může být termistor (teplotně citlivý rezistor). Negeneruje elektrický signál, ale průchodem elektrického proudu (budící signál) přes něj je možné měřit jeho elektrický odpor detekcí změn elektrického proudu anebo napětí (modulací budícího signálu). Tyto změny (uvedené v ohmech), přímo souvisí s teplotou přes známé přenosové funkce.

Dalším příkladem aktivního senzoru je odporový tenzometr, u kterého je elektrický odpor závislý na napětí (namáhání). Aby bylo možné měření elektrického odporu tohoto senzoru, musí být použit elektrický proud z vnějšího zdroje energie.

Dále mohou být senzory rozděleny na **absolutní** nebo **relativní**.

**Absolutní senzor** detekuje podnět (stimul) ve vztahu k absolutnímu fyzikálnímu měřítku, které je nezávislé na podmínkách měření. Naproti tomu **relativní senzor** vytváří signál, který se vztahuje k nějakému konkrétnímu případu.

Jako příklad absolutního senzoru si opět uvedeme termistor (teplotně citlivý rezistor). Jeho elektrický odpor přímo souvisí s absolutní Kelvinovou teplotní stupnicí.

Dalším velmi populárním teplotním senzorem je termočlánek. Je to relativní senzor. Ten vytváří elektrické napětí, které je funkcí teplotního gradientu přes termočlánekové dráty. Výstupní signál termočláneku nemůže být závislý na konkrétní teplotě bez toho, aby byl odkazován na známou výchozí hodnotu.

Dalším příkladem absolutního a relativního senzoru je senzor tlaku. Absolutní tlakový senzor vytváří signál, s odkazem na vakuum – absolutní nulu na stupnici tlaku. Relativní senzor tlaku vytváří signál s ohledem na zvolené výchozí hodnoty, které nejsou nulový tlak, ale například tlak atmosférický. [1,2]

## 1.2 Základní parametry senzorů

Stejně tak jako u každého jiného zařízení i u senzorů je potřeba, aby byly popsány nějakými základními parametry. Základní parametry senzorů můžeme rozdělit na dvě kategorie a to parametry **statické** a **dynamické**.

Mezi **statické** parametry senzorů patří:

- Statická přenosová charakteristika nebo také kalibrační křivka – touto charakteristikou je vyjádřen vztah mezi výstupní veličinou (signálem na výstupu senzoru) a veličinou měřenou senzorem (vstupní veličina). Příkladem přenosové charakteristiky může být přenosová charakteristika termočláneku, kdy měřená vstupní veličina (teplota), odpovídá určité výstupní veličině (elektrickému odporu) termočláneku.
- Citlivost - tento parametr je definován jako sklon statické přenosové charakteristiky (kalibrační křivky)
- Limity detekce nebo také rozsah detekce – udává nejvyšší a nejnižší hodnotu intervalu měřené veličiny, která může být senzorem měřena.

- Linearita – parametr linearity udává maximální odchylku jakéhokoliv bodu křivky (kalibračního) od odpovídajícího bodu na statické přenosové charakteristice.
- Hystereze – parametr vyjadřující neshodu charakteristik pro sestupné a vzestupné změny
- Rozlišení – je parametr někdy označovaný jako citlivost, udává nejmenší senzorem měřitelnou veličinu na jeho vstupu, která vyvolá změnu (odezvu) na jeho výstupu
- Selektivita – je parametr vyjadřující schopnost senzoru měřit pouze jednu konkrétní vlastnost nebo veličinu zkoumaného vzorku.

Mezi **dynamické** parametry senzorů patří:

- Přechodová charakteristika – tento parametr vyjadřuje závislost průběhu výstupní veličiny na čase při skokové změně vstupní veličiny (měřeného signálu).
- Frekvenční charakteristika – je parametrem udávajícím frekvenční závislost přenosu a fázového úhlu.

[1, 3, 37]

### 1.3 Chemické senzory

Většina chemických senzorů může být popsána pomocí kritérií a vlastností obecných pro všechny senzory jako je stabilita, reverzibilita (opakovatelnost), linearita, hystereze, saturace (nasyčení), reakční čas, rozsah měření, selektivita a citlivost. Především poslední dvě jmenované charakteristiky je však smysluplné a aplikovat u chemických detekcí. Protože chemické senzory jsou používány pro identifikaci a kvantifikaci je potřeba, aby byly selektivní a citlivé, aby mohly identifikovat požadovanou látku ve směsi látek. Selektivita popisuje stupeň nebo míru, kterou senzor reaguje pouze na požadované cílové chemické látky s žádným nebo minimálním rušivým vlivem necílových látek. Proto je kvalifikace selektivity jednou z nejdůležitějších funkcí v hodnocení výkonnosti chemického senzoru. Citlivost chemického senzoru popisuje minimální koncentrace nebo změny koncentrace, někdy také označovány jako rozlišení, které mohou být úspěšně a opakovatelně snímány senzorem. U chemických senzorů je velmi důležité spojení chemicky citlivé vrstvy s fyzickou částí senzoru, jelikož to může mít zásadní vliv na celkový výkon snímače. Někdy může být vysoce citlivá primární interakce znehodnocena použitím nesprávného mechanismu převodu signálu. Získaný signál může být zpracován mnoha různými způsoby a s různou úrovní sofistikovanosti. Od získaného signálu v analogové podobě může být odečtena referenční

hodnota signálu a tím získán rozdíl signálů, který se bude dále zpracovávat. Jiným způsobem může být digitalizace získaného analogového signálu nebo jeho statistické zpracování. Signál může být zpracován buď přímo ve fyzikální části senzoru a jde o takzvaný „chytrý“ nebo „smart“ senzor, nebo je signál poslán do vnějšího zařízení na zpracování. [1,2,3,36]

### 1.3.1 Třídy chemických senzorů

Rozdělení chemických senzorů do tříd není jednoduchá záležitost a ani pro to neexistuje žádná všeobecně uznávaná metoda. Proto budou pro účely této práce chemické senzory rozděleny podle principu funkce na následující třídy:

- Elektrické a elektrochemické senzory
- Fyzikální senzory
- Fotoionizační senzory
- Optické senzory

Dále se budeme jen okrajově věnovat prvním dvěma ze čtyř zmíněných tříd chemických senzorů a to elektrickým a elektrochemickým senzorům a fyzikálním senzorům.

#### 1.3.1.1 Elektrické a elektrochemické senzory

Senzory, které buď přímo měří elektrické vlastnosti stanovované látky, nebo účinky stanovované látky na elektrické vlastnosti jiného materiálu, bývají většinou velmi levné a dobře dostupné. S takovými senzory může být měření buď reverzibilním procesem, nebo destruktivním nevratným procesem. Tato zařízení a doprovodná elektronika bývají obvykle velmi malá a jednoduchého designu, což je umožňuje použít ve velké míře a množství i v náročnějších aplikacích. Mezi senzory v této třídě patří polovodiče z oxidů kovů (MOS), elektrochemické senzory, potenciometrické senzory (senzory měřící elektrické napětí), senzory elektrické vodivosti, ampérometrické senzory (senzory měřící elektrický proud), elastomerní chemorezistory, chemokapacitory (chemokondenzátory) a senzory chemFET. [1]

#### 1.3.1.2 Fyzikální senzory

Několik typů chemických senzorů funguje na principu měření fyzikálních vlastností stanovované látky a obvykle nedochází k chemické reakci na snímacím prvku. Procesy měření jsou opět buď reverzibilní, nebo nereverzibilní a tudíž destruktivní. Reverzibilní procesy měření zahrnují ty, které ke své činnosti potřebují absorbovat stanovovanou látku do sub-

strátu umístěného na citlivých mikrováhách, které pak mohou reagovat na změny v hmotnosti. Mezi reverzibilní senzory v této třídě patří senzory povrchové akustické vlny (SAW), mikrováhy z křemenného krystalu (QCMs) a mikrokonzolové senzory. Destruktivní senzory mohou přímo měřit molekulové hmotnosti analyzované látky, příkladem je spektrometrie mobility iontů (IMS), nebo množství tepla uvolněného při kompletní oxidaci, jak je to u tepelných nebo kalorimetrických senzorů. [1]

#### 1.4 Senzory na plyny a páry těkavých látek

Detekce různých plynů a par těkavých látek a následné vyhodnocení jejich koncentrace je velmi důležitým úkolem při sledování nejrůznějších výrobních procesů. Velmi důležité je detekce takových látek v prostředí, ve kterém se vyskytují lidé. Pro takové aplikace jsou velmi oblíbené levné odporové senzory. Již byly zavedeny mnohé postupy jejich výroby a způsobů měření, které by zlepšily jejich selektivitu a citlivost, při různých podmínkách měření. Stále ale neexistují metody, kterými by bylo možné získat přímo, jednoduše a rychle směrodatné údaje o detekovaném plynu. Některé metody jsou založeny na získávání informací z řady nebo pole senzorů, které jsou následně zpracovány pomocí různých detekčních algoritmů. Příkladem mohou být neuronové sítě se samoučícími schopnostmi.

V současné se vývoj zaměřuje na nové metody, které by zajistily nízkou energetickou náročnost senzorů při zachování jejich vysoké citlivosti a selektivity. Dalším směrem vývoje by měla být účinná detekce plynů, aniž by bylo nutné signály velmi sofistikovaně zpracovávat. [33, 34]

#### 1.5 Senzory založené na změně vodivosti

Senzory založené na změně elektrické vodivosti, můžeme chápat jako senzory založené na změně elektrického odporu, protože elektrická vodivost se dá vyjádřit jako převrácená (reciproká) hodnota elektrického odporu viz Rovnice 2. Elektrický odpor lze vypočítat z Ohmova zákona viz Rovnice 1, ale tento zákon platí pouze pro stejnosměrný proud.

Takové senzory fungují tak, že vlivem změny vnějších měřených fyzikálních, chemických nebo mechanických vlastností se změní elektrická vodivost (elektrický odpor) senzoru.



Senzor by měl být chápán jako součást elektrického obvodu, konkrétně jako rezistor, jehož elektrická vodivost (elektrický odpor) se mění vlivem již zmíněných měřených vlastností.

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

$$G = \frac{1}{R} \quad (2)$$

Kde je: R - elektrický odpor [ $\Omega$ ]

G - elektrická vodivost [ $S = \Omega^{-1}$ ]

U - elektrické napětí [V]

I - elektrický proud [A]

Senzory založené na změně elektrické vodivosti nebo elektrického odporu jsou jedněmi z nejrozšířenějších senzorů vůbec, jejichž principy funkce jsou využívány u většiny kategorií senzorů. Tyto senzory jsou velmi často používány například při měření teploty, detekci chemických látek či plynů a par těkavých látek, měření vlhkosti, deformace atd.

### 1.5.1 Měření elektrického odporu

Pro účely měření jsou elektrické odpory děleny podle své velikosti na tři kategorie:

- Malé odpory  $R \leq 1\Omega$
- Střední odpory  $1\Omega \leq R \leq 1\text{ M}\Omega$
- Velké odpory  $1\text{ M}\Omega \leq R$

Měření elektrického odporu by mělo být prováděno pomocí stejnosměrného proudu, protože použitím střídavého proudu by mohlo dojít k projevům indukčnosti a kapacity na výsledek měření. Měření elektrického odporu je možné rozdělit do dvou kategorií metod. První kategorií jsou **metody přímé**, kdy měřením přímo získáme hodnotu měřeného elektrického odporu. K měření těmito metodami se používají měřicí můstky, multimetry, poměrové magneto-elektrické měřicí přístroje a jiné. Druhou kategorií jsou **metody nepřímé**, kdy měřením jsou získávány číselné hodnoty veličin (elektrické napětí a proud), jejichž následujícím výpočtním zpracováním podle daných rovnic získáme hodnotu měřeného elektrického odporu. Do kategorie nepřímých metod patří **Ohmovy metody** měření elektrických odporů zahrnující měření malých, středních a velkých odporů. Dále zde spadají **me-**

**tody srovnávací.** Jsou to sériová a paralelní srovnávací metoda. Posledními metodami této kategorie jsou metoda měření pomocí **Wheatstoneova můstku** a měření pomocí **převodníků elektrického odporu na napětí**. [4, 5, 35]

### 1.5.2 Základní části elektronických obvodů

Tahle podkapitola zde byla začleněna z důvodu potřeby vysvětlení některých pojmů, které se v této diplomové práci vyskytují v teoretické, ale především v praktické části.

#### 1.5.2.1 Elektrický obvod

Je to sestava elektrických zařízení, jako je zdroj elektrického proudu a spotřebiče, které jsou propojeny pomocí elektrických vodičů. Podle zdroje elektrického proudu rozlišujeme elektrické obvody na stejnosměrné a střídavé. [5]

#### 1.5.2.2 Elektrické jednobrany

Pro elektrické jednobrany, které jinak také můžeme nazývat elektrické dvoupóly platí:

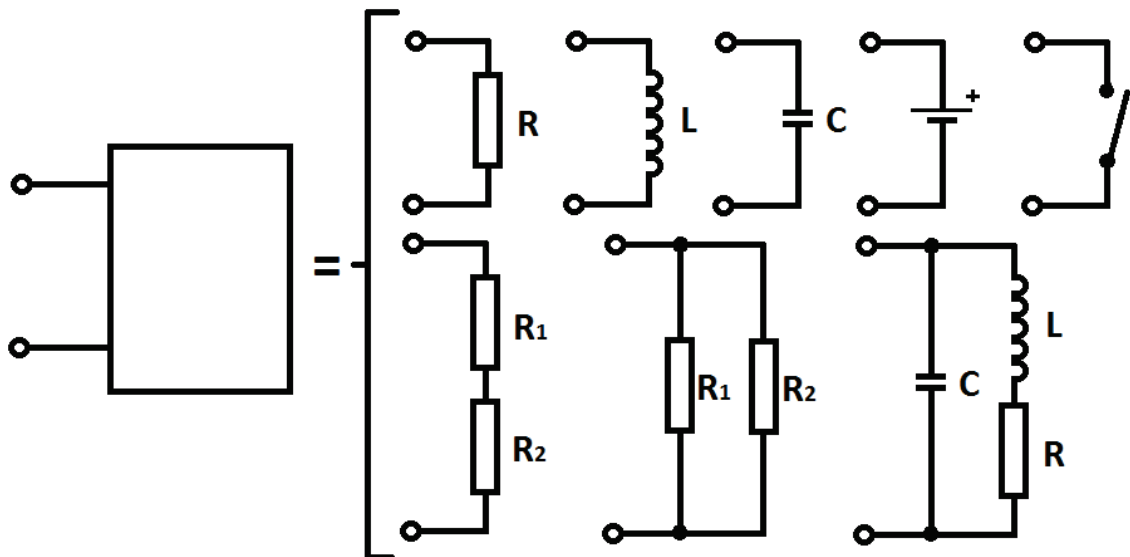
2 póly = 1 dvojice svorek = 1 brána

Jsou to elektrické obvody složené z různých elektronických prvků zakončené dvěma svorkami. Elektrické jednobrany můžeme dále rozdělit podle různých kritérií na jednobrany:

- **jednoduché** - Nejde je dále rozdělit na jednodušší jednobrany. Příkladem může být rezistor.
- **složené** - Skládají se z několika vzájemně propojených jednoduchých jednobranů a to sériově, paralelně či kombinovaně (sériově-paralelní zapojení)
- **pasivní** - Jsou spotřebičem elektrické energie, kterou přeměňují na jiné druhy energie. Například na tepelnou, mechanickou či chemickou energii.
- **aktivní** - Jsou zdrojem elektrické energie. Přeměňují jinou formu energie na energii elektrickou. Příkladem takových jednobranů mohou být galvanické články, fotoelektrické články či generátory jako je dynamo nebo alternátor.
- **lineární** - Vztah mezi příčinou a důsledkem je lineární, protože se tento jednobran skládá z lineárních součástí. Lineární součástky mají lineární Volt-Ampérovou (V-A) charakteristiku, tedy vztah mezi napětím a proudem lze vyjádřit lineární rovnicí (Ohmovým zákonem) viz **Rovnice 1**. Základní vlastnosti těchto součástí (např. kapacita, indukčnost) se nemění v závislosti na procházejícím proudu či napětí.

- **nelineární** - Vztah mezi příčinou a důsledkem je nelineární, protože se tento jednobran neskládá z lineárních součástí. Stačí jedna nelineární součástka a celý jednobran je nelineární. Základní vlastnosti jednobranu se zde mění.
- **ideální** - Takové jednobrany mají jen jednu elektrickou vlastnost jako třeba jen indukčnost, či jen odpor.
- **skutečné** - Mají více elektrických vlastností indukčnost a odpor současně

Příklad obecného a různých konkrétních jednobranů jsou na Obrázek 1. Jsou zde k vidění příklady jednoduchých jednobranů jako rezistor (R), cívka (L), kondenzátor (C), zdroj stejnosměrného napětí, spínač, nebo složených jednobranů jako sériově zapojené rezistory ( $R_1 - R_2$ ), paralelně zapojené rezistory ( $R_1 \parallel R_2$ ) a sériovo-paralelně zapojený R-L||C obvod. [4, 5, 35]

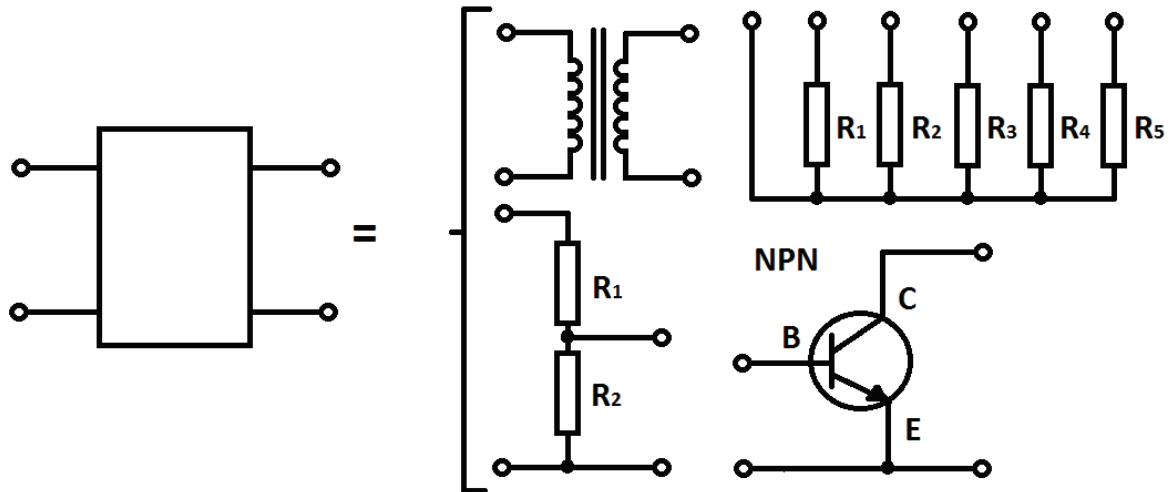


Obrázek 1 : Příklady elektrických jednobranů

### 1.5.2.3 Elektrické mnohobrany

V elektrických obvodech se obvykle také vyskytují vícepólové členy, jako jsou dvoubrany (čtyřpóly), tříbrany (šestipóly) a podobně, tyto se obecně nazývají mnohobrany. Typickým příkladem dvojbranu (čtyřpólu) může být tranzistor (například NPN), jehož jednu bránu (dvojpol) tvoří svorky (póly) mezi bází a emitorem a druhou bránu tvoří svorky mezi kolektorem a emitorem. Příklad obecného a různých konkrétních mnohobranů jsou na Obrázek 2. Zde jsou k vidění mnohobrany jako třeba transformátor se dvěma vinutími (primárním a sekundárním), rezistorové pole tvořené pěti rezistory (jde o pětibrán tvořený šesti

svorkami), napět'ovou děličku nakonec tranzistor NPN v tzv. „zapojení se společným emitemorem.“ [4, 5, 35]



Obrázek 2 : Příklady elektrických mnohobranů

#### 1.5.2.4 Části složených elektrických obvodů

Ve složených elektrických obvodech rozlišujeme tyto části:

- Uzel – Je to vodivé spojení nejméně tří vodičů.
- Větev – Je to část obvodu mezi dvěma uzly.
- Smyčka - Je to uzavřený obvod, sestávající nejméně ze dvou větví. Při sledování smyčky vycházíme z určitého uzlu a opět se do něj vracíme, přitom žádnou větev neprocházíme dvakrát.
- Svorka – Je to vodivé ukončení vodiče. Ve schématech plný kroužek znamená pevný spoj a prázdný kroužek rozebíratelný spoj.

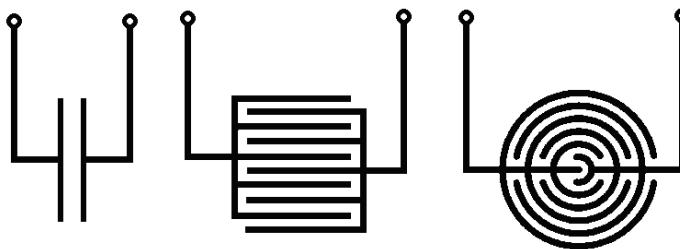
[4, 5, 35]

## 1.6 Plošné senzory

V současné době se začínají ve velkém měřítku vyrábět a aplikovat plošné senzory. Děje se tak především z důvodu minimalizace rozměrů senzorů i měřících přístrojů. Plošný senzor je díky jeho malé tloušťce jednodušší použít v aplikacích a zařízeních, kde by „tlusté“ senzory díky jejich rozměrům nebylo možno použít. Plošné senzory jsou většinou realizovány pomocí vhodné tiskové nebo litografické metody na vhodném plošném substrátu.

Typickým příkladem běžně používaného plošného senzoru je senzor teploty, vlhkosti, tlaku, deformace dále pak chemické senzory, akustické senzory, senzory elektrického, magnetického a elektromagnetického pole, nejrůznější plošné antény a podobně.

Ve spojitosti s plošnými senzory se v odborné anglicky psané literatuře velmi často vyskytuje termín „interdigit“. Tento termín odkazuje na palcům podobný či prstovitý vzor, který je tvořen, v rovině paralelními, periodicky se opakujícími elektrodami. Tyto elektrody se dotýkají nebo pronikají do vzorku materiálu či citlivé vrstvy. Toto uskupení pak tvoří senzor mající nejméně dvě elektrody (dva póly). V nejjednodušším případě by se v podstatě jednalo o jednobran (dvojpól), který by šel svou konstrukcí přirovnat ke kondenzátoru (dvě elektrody a mezi nimi dielektrikum). Na následujícím Obrázek 3 jsou příklady motivů některých typů interdigitů.



Obrázek 3 : Příklady motivů interdigitů

### 1.6.1 Tenké vrstvy

Jedním z nejdůležitějších a nejčastěji měřených parametrů tenkých vrstev je jejich tloušťka, ta většinou určuje vlastnosti vrstvy. Za tenkou vrstvu lze považovat takovou, jejíž dva rozměry jsou mnohem větší než rozměr třetí. Některými metodami měření tloušťky můžeme měřit jen hotové vrstvy, jinými metodami můžeme měřit tloušťku již během samotného procesu (online měření), kdy se vrstva vytváří. Online měření můžeme aplikovat pro měření rychlosti růstu nebo vytváření vrstvy a to jako měření přírůstku tloušťky vrstvy v čase. Tenké vrstvy nejsou zpravidla ideálně hladké, protože mají v různých místech plochy různou tloušťku (různý profil). [6 ,7]

Měření tloušťky tenkých vrstev lze provádět těmito skupinami metod.:

- Mechanická měření (mechanický profilometr, mikrometr)
- Elektrická měření (AFM, STM)
- Optická měření (Optický profilometr, Elipsometr)

## 1.7 Možnosti tisku při přípravě plošných senzorů

Jak již bylo zmíněno výše, plošné senzory mohou být realizovány pomocí vhodné tiskové metody. V následujících podkapitolách se budeme zabývat nejběžnějšími tiskovými metodami jako je síťový tisk a inkjetový tisk, dále pak inkousty pro inkjetový tisk a vhodnými flexibilními substráty.

### 1.7.1 Síťový tisk

Pro tisk síťotiskem jsou potřeba tři základní komponenty, a jsou to tyto: síto, stěrka a inkoust. Síto je nosič tištěného obrazce a je obvykle vyrobeno z porézního plátna nebo z pletiva z nerezové oceli, které je napnuto na kovový nebo dřevěný rám. Vzor pro tisk se vytváří na síti a to buď ručně, nebo fotochemickou cestou. Vzor na sítu určí podobu výsledného obrázku tím, že zabrání proniknutí inkoustu na substrát, tam, kde nemá být substrát potištěný. Inkoust tedy bude jen v místech, kde je žádoucí. Síto s vytvořeným vzorem se položí na substrát. Síťotiskový inkoust mající spíše konzistenci barvy nebo pasty je aplikován na síto a třerkou je roztírán po sítu. Průměr otvorů v sítu, tloušťka vláken a počet opakování procesu určí, kolik bude na substrát inkoustu nanášeno. Až je inkoust nanášen, tak se síto od substrátu oddálí a substrát s natištěným vzorem se dá sušit (vytvdřit) do sušárny nebo se inkoust nechá vytvdřit UV zářením. [8, 9, 10]

### 1.7.2 Ink Jet tisk

Inkoustový tisk lze rozdělit podle mechanismu procesu tisku na dvě hlavní a pár vedlejších kategorií. V následujícím textu se však budu věnovat pouze dvěma hlavním kategoriím rozdělení tisku. Jsou to kontinuální inkjetový tisk (CIJ) a na drop-on-demand inkjetový tisk (DOD). Kontinuální i drop-on-demand inkjetový tisk mají společné to, že generují mikroskopické kapičky inkoustu s průměrem kapky v rozmezí od 10 do 150 $\mu\text{m}$ , které jsou nanášeny na povrch substrátu. CIJ tisk se nejčastěji využívá především pro značení a kódování, kde se používají průměry kapek okolo 100 $\mu\text{m}$ . DOD tisk je zase více používán v grafických aplikacích a pro tisk textu s průměrem kapek inkoustu většinou od 20 do 50 $\mu\text{m}$ . Tyto kategorie jsou detailněji popsány níže. [8, 11]

#### 1.7.2.1 Kontinuální inkjetový tisk (CIJ)

Jak už z názvu vyplývá, kontinuální inkjetový tisk začíná formováním kapek inkoustu z kontinuálního toku inkoustu, který je pod tlakem vytlačován z trysky. Kapky inkoustu se

formují z toho důvodu, že dlouhý válec kapaliny tekoucí z trysky, je v nestabilním stavu. Stačí již malá porucha povrchu k tomu, aby se proud inkoustu rozdělil na kapky, které mají mnohem více energeticky výhodný tvar. Aby byly velikosti kapek shodné, jsou u kontinuálních inkjetových tiskáren použity prvky zajišťující periodické narušování proudu inkoustu. Obvykle jsou použity piezoelektrické vibrační prvky umístěné na trysce. Důležitou podmínkou pro tisk tímto způsobem je používat elektricky vodivé inkousty. Vytvořená kapka inkoustu je, po svém vzniku, indukčně nabitá v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami. Pro tisk jsou použity jen individuálně vybrané (nabité) kapky, které jsou vychýleny vychylovacím systémem (magnetickou čočkou) a dopadají na určené místo povrchu potiskovaného substrátu. Nevyhovující (nenabité) kapky vychýleny nejsou a dopadají kolmo dolů do zachycovacího kanálku a jsou recyklovány (znovu použity). Funkce vychylovacího systému spočívá v tom, že každá od proudu odtržená kapka může být nabitá na jinou velikost náboje. Rozdílný náboj způsobí, že jsou pak tyto kapky rozdílně vychylovány v permanentním magnetickém poli vychylovacího systému. Jediný proud z jedné trysky je schopen tímto způsobem vytisknout řadu znaků jen změnou velikosti náboje, na který jsou inkoustové kapky nabíjeny. [12, 13, 14]

### **1.7.2.2 Drop on demand (DOD) inkjetový tisk**

Druhou hlavní inkoustovou technologií je Drop on demand inkjetový tisk. Tiskový systém tohoto druhu většinou sestává z řady trysek, z nichž každá vylučuje kapky inkoustu pouze tehdy, jestli je to potřebné k vytištění požadovaného symbolu nebo obrazu, na rozdíl od předchozí metody tisku, kdy jsou produkovány kapičky i když zrovna není potřeba nic tisknout. Kapky inkoustu jsou generovány rychlou změnou objemu dutiny v trysce. Změny objemu v trysce může být dosaženo dvěma způsoby. Prvním je vytvoření bubliny z par inkoustu pomocí topného tělíska v dutině trysky. Bublina zvětšováním svého objemu vytlačí inkoust ven z trysky, jde o takzvaný „bubble jet“. Druhým způsobem je vytlačení inkoustu z trysky pomocí změny objemu piezoelektrického keramického prvku. Vlivem přiloženého elektrického napětí na elektrody piezoelektrika dojde vlivem polarizace ke změně jeho objemu, přičemž objemová změna je závislá na polaritě přiloženého napětí (kladné nebo záporné). Přiložením záporného napětí dochází k naplnění trysky inkoustem ze zásobníku vlivem zmenšení objemu piezoelektrika a změnou na kladné napětí dojde k vytlačení inkoustu ven vlivem zvětšení objemu piezoelektrika. Přiložením nulového napětí dojde k zotavení piezoelektrika, tj. návratu do původního nepolarizovaného stavu a původního objemu. Ovládací napětí je v řádu jednotek až desítek voltů. [15, 16, 17, 18]

### 1.7.3 Inkousty pro Inkjetový tisk

V současné době existují čtyři hlavní typy inkoustů pro inkjetový tisk. Jsou to inkousty na vodní bázi, inkousty založené na změně fáze, inkousty na bázi rozpouštědel a inkousty vytvrzované UV zářením. Existují také jiné typy inkoustů, ty však nejsou tak často používány. Inkousty obvykle sestávají z disperzí nerozpustných barviv nebo roztoků barviv, které budou následně roz distribuovány a přeneseny na povrch potiskovaného substrátu. Důležitými vlastnostmi inkoustů jsou viskozita, povrchové napětí a molekulární struktura barviv v nich použitých. [19, 20, 21, 22]

#### 1.7.3.1 inkousty na vodní bázi

Inkousty na vodní bázi se používají především u domácích tiskáren. Tyto inkousty jsou ředitelné vodou a obvykle mají velmi nízkou viskozitu a nízké povrchové napětí a iontový charakter. Tyto vlastnosti neumožňují aplikaci tohoto inkoustu na standardní lesklý offsetový neporézní papír. Tyto inkousty vyžadují porézní substráty nebo substráty se speciálně upraveným povrchem. Jejich výhodou je možnost použití pro potravinářské nebo biologické aplikace. Vhodnými substráty pro tento druh inkoustů jsou kromě již zmíněného porézního papíru PVC, PC, PS, PES. [20, 23]

#### 1.7.3.2 inkousty založené na změně fáze

Pro tyto inkousty obecně platí to, že jsou při pokojové teplotě v pevné fázi, ale při zvýšené provozní teplotě tiskařských zařízení jsou ve fázi kapalné. Kapky inkoustu jsou při zvýšené teplotě tisknuty na substrát v kapalné fázi, kde se následně vlivem nižší teploty fáze rychle změni na pevnou. Výhodou těchto inkoustů je rychlost jejich tuhnutí při tisku, šetrnost k životnímu prostředí a dobrá opacita. Jejich nevýhodou je krátká trvanlivost a špatná odolnost proti oděru. Vhodnými substráty pro tento druh inkoustů jsou obecně porézní materiály a papír. [20, 24, 25]

#### 1.7.3.3 inkousty na bázi rozpouštědel

Inkousty na bázi rozpouštědel (organických těkavých sloučenin) mají zvýšené nároky na design trysek. Je to dáno tím, že rychle se odpařující rozpouštědla některých inkoustů mohou způsobit zanesení trysek částicemi látek v nich rozpouštěných. Přednosti tohoto inkoustu jsou rychlé sušení vlivem rychlého odpaření rozpouštědla a možnost jeho natištění i na málo porézní nebo i neporézní substráty. Tisk tímto druhem inkoustu je považován za levný, a je velmi často používán v průmyslu při potiskování např. obalů nebo samotných



výrobků čárovými kódy, umožňující jejich pozdější identifikaci. Vhodnými substráty pro tento druh inkoustů jsou plasty, kovy a sklo. [20, 26, 27, 28]

#### **1.7.3.4 inkousty vytvrzované UV zářením**

Inkousty vytvrzované UV (ultrafialovým) zářením jsou tvořeny pouze pevnou fází, neobsahují žádná rozpouštědla, která by se musela odpařovat, aby došlo k vytvrzení fáze. Vytvrzování probíhá interakcí mezi inkoustovými přísadami a silným UV zářením ze světelného zdroje v reaktoru. V polygrafii jsou inkousty a barvy vytvrzované UV zářením velmi oblíbené, protože emise těkavých organických látek jsou buď nulové, nebo velmi malé. Vytvrzovací zařízení je u tiskáren tisknoucí tímto inkoustem mnohem menší než u jiných zařízení, které musí používat klasické tepelné sušicí pásy. Je to proto, že inkousty vytvrzované UV zářením jsou suché téměř hned po vytvrzení. Vhodnými substráty pro tento druh inkoustů jsou papír, PVC, PC, PE, PP, textil a keramika. [20, 29, 30, 31]

#### **1.7.4 Flexibilní substráty pro tisk**

Při výběru substrátu pro tisk je velmi důležité vědět, jakou metodu tisku budeme používat a při jakých podmínkách bude probíhat tisk i následné používání výrobku. Volba substrátu je závislá také na použitém inkoustu. Aby bylo dosaženo dobré adheze inkoustu na substrát, je důležité, aby se shodovalo povrchové napětí inkoustu s povrchovou energií substrátu. Proto různé substráty budou vyžadovat použití různých inkoustů.

Existuje celá řada materiálů, které se dají použít jako flexibilní substráty pro tisk. Jsou to třeba papír, polymery, textilie, tenké kovové destičky nebo velmi tenké skleněné destičky. Typickým a nejpoužívanějším flexibilním substrátem pro tisk je papír mající velmi rozličné využití od běžných tiskovin až po RFID (radiofrekvenční identifikaci) pro označování zboží. Polymerní substráty jsou používány pro velmi podobné aplikace jako papír, navíc se však používají pro tištěné ohebné elektronické obvody, ohebné solární panely, RFID a mnoho dalších aplikací. V elektronice se používají zejména PET, PTFE a PI substráty. Jejich hlavní výhodou oproti papírovým substrátům jsou lepší mechanické vlastnosti a odolnost proti vlhkosti a vodě. Textilní substráty se používají především v oděvním průmyslu (oblečení s potiskem). Tenké kovové destičky mají široké uplatnění především v elektronice třeba jako elektrody, stínění apod. Velmi tenké skleněné destičky se používají pro výrobu displejů. [20, 32]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 2 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části této diplomové práce bylo navrhnout a vytvořit ohebný prvek obsahující maticově uspořádané interdigity se senzoricou funkcí. Tento maticový prvek by měl v rámci technických možností obsahovat devět vhodně uspořádaných (3x3) interdigitů stejných rozměrů na ploše přiměřené stádiu výzkumu a vývoje na kterém se naše pracoviště nachází v této oblasti v současné době. Zároveň by připravený prvek měl být už od samého počátku vývoje jednoduchý svou konstrukcí, aby mohl být v budoucnu vyráběn ve velkém množství s co nejmenšími možnými náklady na výrobu. K měření požadovaných veličin každým jedním interdigitem by mělo docházet nezávisle.

Technikou výroby maticového prvku by měl být inkjetový tisk na materiálové tiskárně, konkrétně DOD inkjetový tisk inkoustů disperzí nanočástic kovů a senzorickeho materiálu na vhodný ohebný substrát.

Maticový prvek má být určen především pro senzorku alkoholových par. Toho se dosáhne tím, že citlivá vrstva interdigitů bude tvořena nanočásticemi oxidu měďnatého (CuO), což nevyklučuje případné budoucí použití různých jiných citlivých vrstev umožňujících senzorku jiných par a plynů.

Dalším úkolem v rámci této práce bylo navrhnout přípravek (sběrnici), který by zajišťoval vodivé spojení mezi maticovým prvkem a měřicím zařízením. Spojení mezi maticovým prvkem a přípravkem by mělo být jednoduché a rychlé, a zároveň by měl spoj vykazovat minimální přechodový odpor. Přípravek by měl být opakovaně použitelný a univerzální, protože se počítá s tím, že v systému (maticový prvek - přípravek - měřicí přístroj) se bude případně měnit jen maticový prvek, který je z tohoto systému nejlevnější ale především nejjednodušší na výrobu. Jeho univerzálnost by měla spočívat v tom, že by jej bylo možno připojit k více druhům měřicích přístrojů, použitím jednoduchých k tomu účelu navržených redukcí.

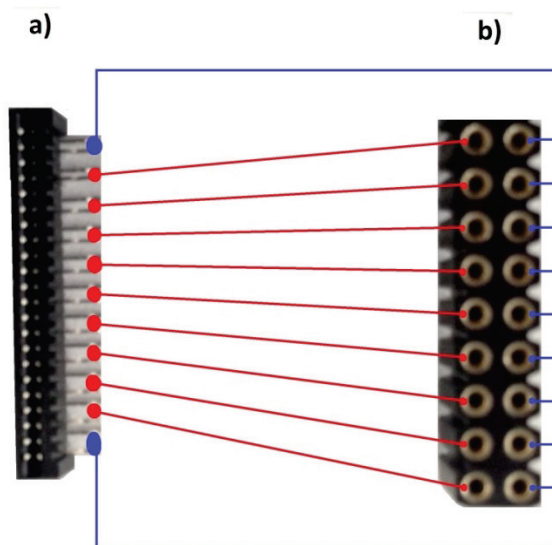
Pro prvotní odzkoušení funkce maticového prvku by měla být zjištěna odezva senzorku na skokovou změnu tenze par (z nulového parciálního tlaku na tlak nasycených par při dané teplotě) a reverzibilita procesu měření alespoň pro několik cyklů.

### 3 VÝROBA MATICOVÉHO PRVKU

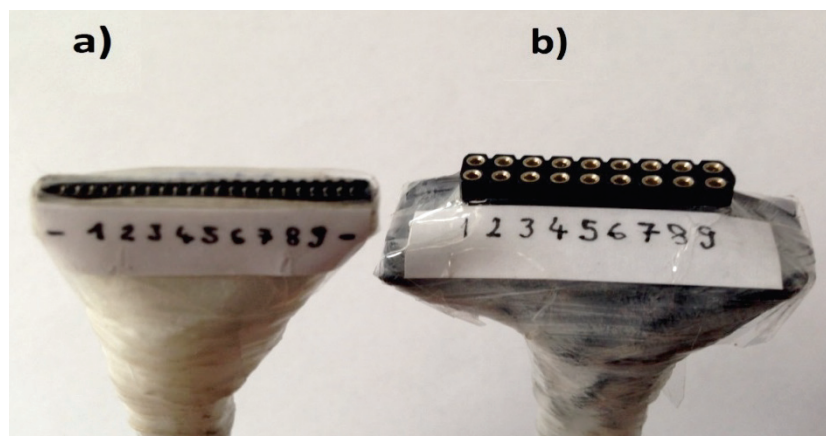
Než byly započaty jakékoliv práce na maticovém prvku, bylo potřeba si ujasnit, jak bude maticový prvek vypadat, jaké bude mít rozměry, kolik bude mít senzorů a z toho vyplývající počet elektrod. Dále, jak bude zajištěno spojení mezi maticovým prvkem a měřícím zařízením. Zásadním počátečním problémem bylo zvolení velikosti výstupních elektrod maticového prvku, protože ta se odvíjela od velikosti dostupných komerčně vyráběných konektorů, které by splňovaly kritéria, jako odpovídající počet kontaktů, možnost zasunutí a fixace tenkého substrátu (folie) a rozumná cena. Vybráním nejlepšího typu konektoru z desítek zakoupených kandidátů mohly začít práce na návrhu samotného maticového prvku a propojovacího přípravku (kabelu).

#### 3.1 Návrh a výroba propojovacího přípravku

Propojovací přípravek je vlastně na míru vyrobený kabel s konektory, který by zajišťoval pohodlné a jednoduché propojení maticového prvku s měřícími zařízeními schopnými měřit veličiny na více kanálech najednou. Jak již bylo popsáno výše, velmi důležité bylo nejprve si vybrat vhodný konektor, zajišťující vodivé spojení mezi maticovým prvkem a propojovacím přípravkem. Výběr tohoto konektoru se odvíjel na základě informací o počtu kontaktů (pólů) maticového prvku a tloušťky substrátu. Podle prvotních schémat návrhů maticového prvku měl být počet kontaktů (pólů) 11 a tloušťka dostupného substrátu byla 150 $\mu$ m. Průnikem těchto dvou podmínek byl zvolen a zakoupen FFC/FPC konektor **(a)** viz Obrázek 4, jehož obchodní označení je DS1020-04-22BRT1 od firmy CONNFLY. Jak je zřejmé z obrázku, konektor má kontaktů 22 a to z horní i spodní strany, kdy každé dva protilehlé jsou vodivě spojené už od výrobce, a každá dvojice sousedních kontaktů byla spojena při výrobě přípravku. Bylo tak učiněno proto, že kontakty mají velmi malé rozteče a tímto řešením se velmi usnadnilo pájení. Konektor zajišťující vodivé spojení mezi přípravkem a měřícím zařízením, byl zvolen jako protikus ke vstupu měřícího zařízení a také pro svou univerzálnost. Díky jeho univerzálnosti bylo možné vyrobit a jednoduše zapojit redukce, díky kterým by bylo možné zajistit spojení i s jinými přístroji. Tímto konektorem byl zvolen konektor BL 6 72 od firmy FISCHER ELEKTRONIK, viz Obrázek 5 **(b)**. Vodičem zajišťujícím spojení mezi oběma konektory byl zvolen datový kabel FTP, který má 8 vodičů (4x2páry). Pro propojení konektorů byl použit vybraný kabel dvakrát při zvolené délce 0,5m, protože bylo potřeba 11 vodičů.



Obrázek 4 : Schéma zapojení propojovacího přípravku



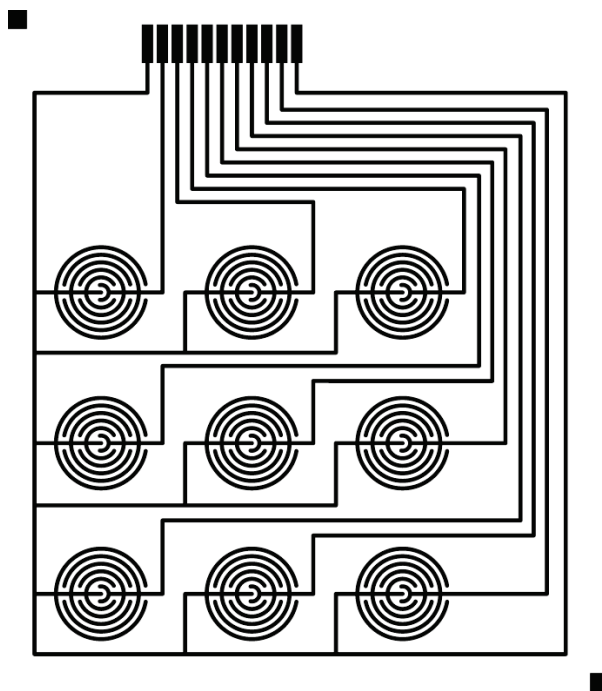
Obrázek 5 : Fotografie hotového propojovacího přípravku s očíslovanými kanály na konektorech.

### 3.2 Návrh motivů pro výrobu maticového prvku

Motivy pro tisk byly vytvořeny v programu CorelDRAW X7, který podporuje vektorovou grafiku. Podmínkou pro následný inkjetový tisk (DOD) na materiálové tiskárně bylo, aby z programu vyexportovaná bitmapa měla rozlišení alespoň 1000dpi. Zkratka dpi (dots per inch) nám udává, kolik bodů (teček) se vejde do délky jednoho palce, tedy 2,54 cm. Maticový prvek s interdigity má být tvořen natištěnými vodivými cestami a maticovým polem senzorů tvořených vodivými cestami (elektrodami) a navíc citlivou vrstvou, která tyto elektrody bude překrývat.

### 3.2.1 Návrh motivu vodivých cest

Při návrhu motivu vodivých cest maticového prvku bylo pro začátek potřeba si zvolit přibližnou velikost výsledného maticového prvku. Na základě znalosti rozměrů konektoru pro vodivé spojení mezi maticovým prvkem a propojovacím přípravkem navrhnut výstupní kontakty prvku. Šířka kontaktů byla zvolena 1,4mm a délka 5mm. Vzdálenost mezi kontakty byla spočítána na 0,58mm. Šířka řady kontaktů je 21,2mm. Dodržení všech těchto rozměrů je nutné proto, aby výstupní kontakty maticového prvku přesně doléhaly na kontakty konektoru. Dalším krokem bylo vytvoření motivu devíti interdigitů, uspořádaných do maticového pole (3x3). Rozteče středů interdigitů jsou v horizontálním i vertikálním směru 20mm. Průměr interdigitu je 13mm. Vodivé cesty musely být navrženy tak, aby se nekřížily, byly pokud možno co nejkratší a zároveň od sebe v dostatečných odstupech. Bylo zde použito zapojení s tzv. společnou katodou (-). Společná katoda obepíná celý obvod maticového prvku, je spojena vždy s jedním ze dvou pólů každého interdigitu a vyúsťuje na obou krajních kontaktech maticového prvku. Společná katoda nám také značně minimalizuje počet výstupních kontaktů, vodivých cest a tím i velikost celého maticového prvku. Místo devítibranu tvořeného 18 póly máme devítibran tvořený pouze 11 póly. Tloušťky čar tvořících interdigity i vodivé cesty jsou 0,75mm. Motiv vodivých cest je na následujícím Obrázek 6.

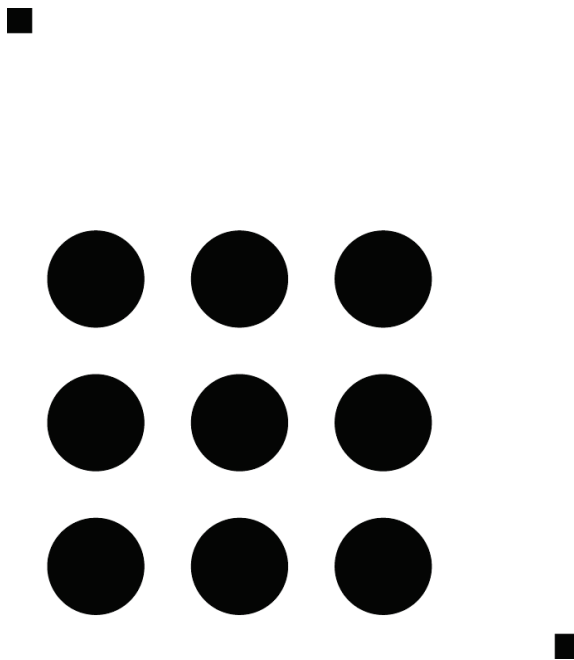


Obrázek 6 : Návrh motivu vodivých cest

Motiv vodivých cest je navržen tak, aby bylo možno jednoduše změnit geometrii interdigitů při zachování všeho ostatního. Motiv je také opatřen čtverečky v levém horním a pravém dolním rohu, které zajistí jednoduché určení počátečního bodu pro následný tisk citlivé vrstvy a zároveň zabráňují automatickému oříznutí prázdných ploch motivu při exportování bitmapy.

### 3.2.2 Návrh motivu citlivé vrstvy

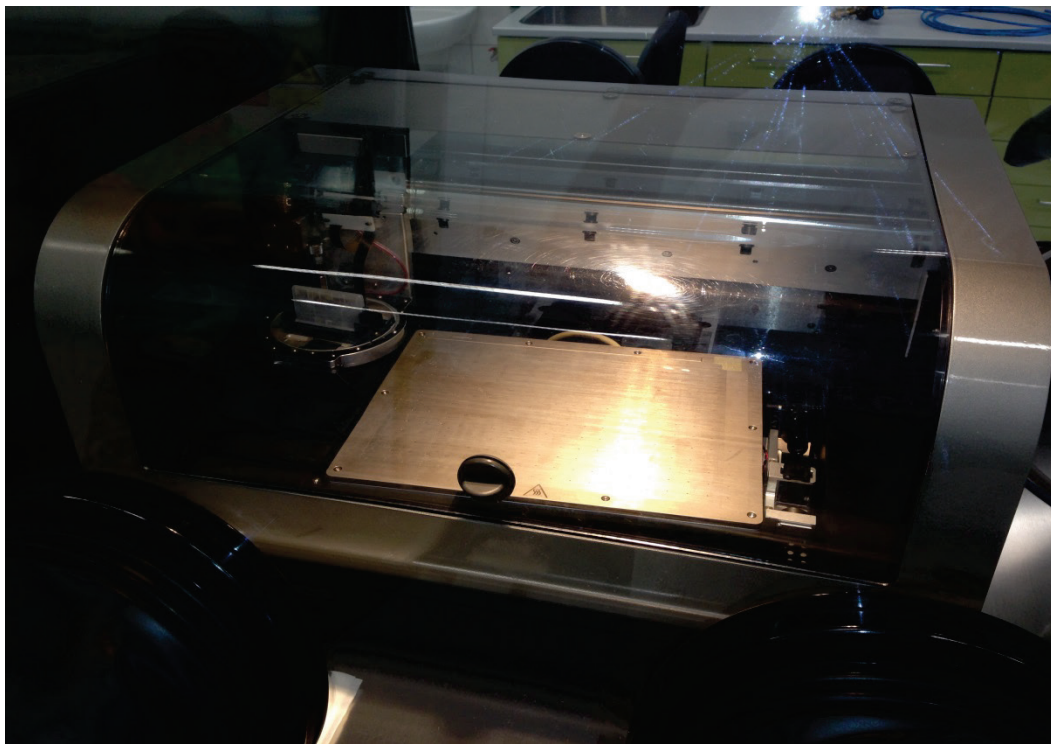
Motiv citlivé vrstvy byl navrhnut tak, aby jednotlivé kolečka citlivých vrstev přesně pasovala na motivy vodivých cest (elektrod) interdigitů. Opět byl motiv opatřen čtverečky v levém horním a pravém dolním rohu, které zajistí jednoduché určení počátečního bodu tisku a zároveň zabráňují automatickému oříznutí prázdných ploch motivu při exportování bitmapy.



Obrázek 7 : Návrh motivu citlivé vrstvy

### 3.3 Tisk maticového prvku

Tisk maticového prvku byl prováděn na materiálové tiskárně FUJIFILM Dimatix model DMP-2831 viz Obrázek 8, umístěné v Gloveboxu s vlastní inertní dusíkovou atmosférou a zvýšeným tlakem viz Obrázek 9. Toto zařízení se vyskytuje ve fyzikálních laboratořích Centra polymerních systémů.



Obrázek 8 : Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix model DMP-2831

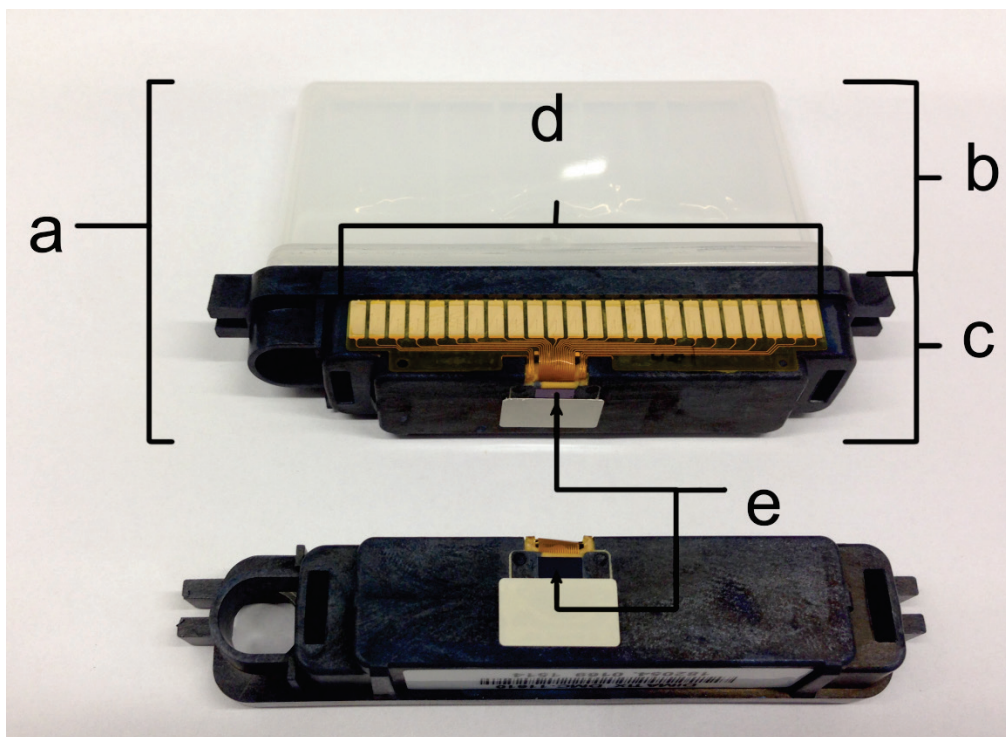


Obrázek 9 : Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix model DMP-2831 umístěná v Gloveboxu v laboratořích CPS.



### 3.3.1 Materiálová cartridge

Nedílnou součástí materiálové tiskárny Dimatix je materiálová cartridge (a) zobrazená na Obrázek 10. Cartridge sestává ze dvou od sebe oddělitelných modulů a to zásobníku inkoustu (b) a tiskové části (c). Součástí zásobníku inkoustu je uvnitř uložený vak určený k naplnění inkoustem, který má objem cca 1,5ml a vyústující hrdlem na které je napojena tisková část cartridge. Zmíněné hrdlo je používáno jak pro plnění, tak i pro vyprazdňování (při tisku). Součástí tiskové části cartridge je řada kontaktů (d) zajišťující ovládání jednotlivých piezoelektrických prvků (trysek), snímání teploty termistory, zajištění provozní teploty integrovanými topnými tělesy. Další důležitou součástí cartridge je řada 16 trysek (e) dlouhá 254 $\mu$ m. Každá tryska sestává z piezoelektrické dávkovacího systému schopného dávkovat kapičky inkoustu o objemu 1 až 10 pl (pl = picolitr)



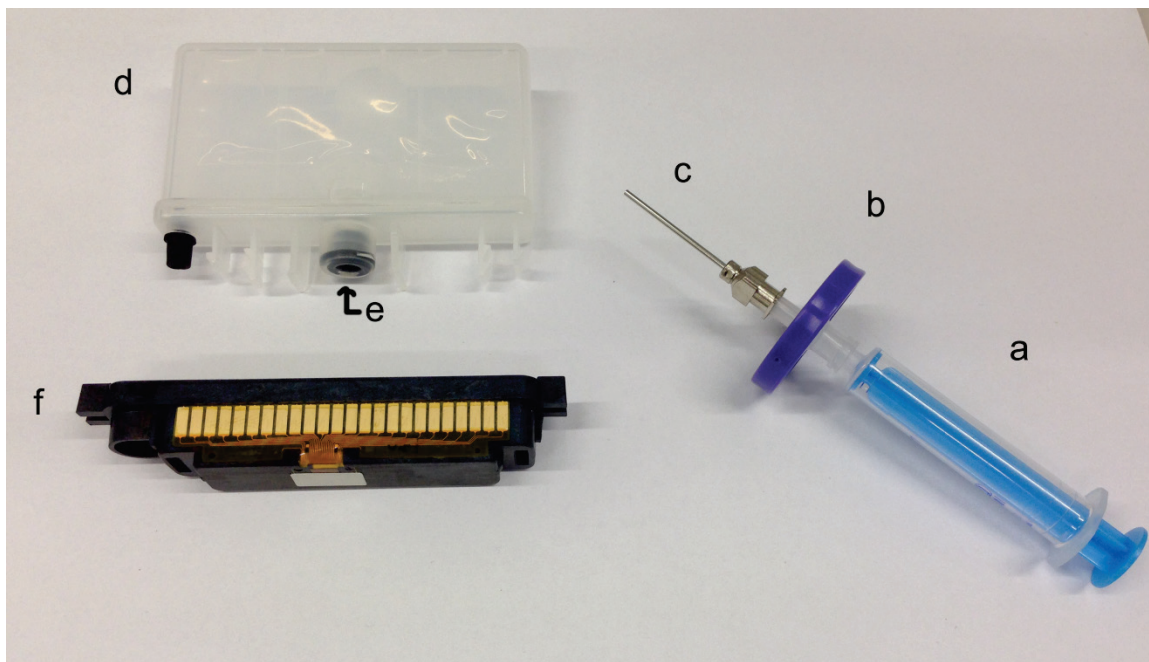
Obrázek 10 : Fotografie s popisem jednotlivých částí Cartridge

### 3.3.2 Příprava inkoustů pro tisk

Postup přípravy inkoustů pro tisk se skládá z následujících níže uvedených úkonů, přičemž pomůcky a komponenty jsou popsány indexy a zobrazeny na Obrázek 11.

1. Sterilní injekční stříkačkou (a) s jehlou se nabere požadované množství inkoustu (obvykle 3ml) ze zásobníku, který je uchováván v chladničce.

2. Poté se jehla odstraní a nasadí se na její místo PTFE filtr (b), který odfiltruje částice a agregáty s průměrem větším než  $0,22\mu\text{m}$ , které by mohly způsobit ucpaní trysek tiskové hlavy, jejichž průměr je  $22\mu\text{m}$ . Inkoust se přefiltruje do čisté kádinky.
3. Kádinka s přefiltrovaným inkoustem se vloží do ultrazvukové lázně na 10-15 minut, aby došlo k odvzdušnění a rozbití a agregátů částic disperze inkoustu.
4. Následně se na jinou injekční stříkačku (a) nasadí speciální jehla (c), která je dodávána v balení s cartridge. Touto injekční stříkačkou se nasaje inkoust z kádinky a zásobník (d) cartridge se opatrně naplní tomu určeným otvorem (e). Musíme dbát na to, aby byl zásobník (d) plněn shora, aby nedošlo k vytečení inkoustu již při samotném plnění.
5. Po naplnění se na zásobník nacvakne modul s tryskami, přičemž je opět potřeba, aby při tomto úkonu byl zásobník otočen plnicím otvorem vzhůru.
6. Naplněná cartridge se umístí do tiskové hlavy tiskárny.



Obrázek 11 : Pomůcky a komponenty pro plnění cartridge

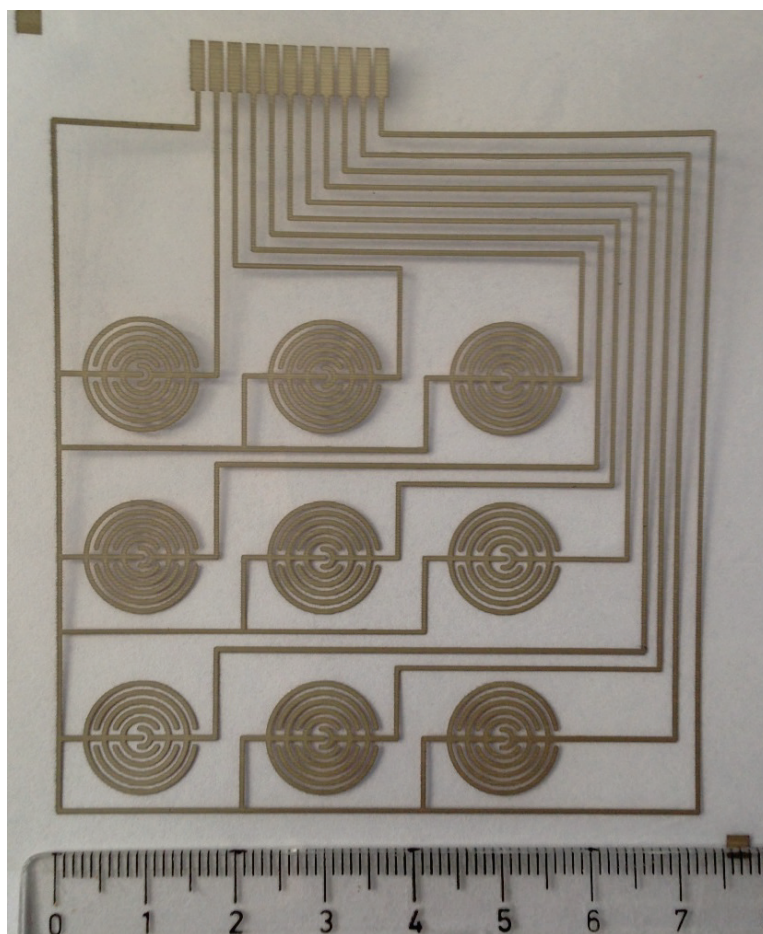
### 3.3.3 Volba substrátu pro tisk

Zvoleným substrátem by měl být materiál, který by splňoval kritéria jako ohebnost, odpovídající povrchovou energii k povrchovému napětí použitých inkoustů a nízká cena. Jako substrát pro tisk maticového prvku proto byla zvolena komerčně vyráběná povrchově upravená PET folie. Tyto povrchově upravené PET folie byly zakoupeny, proto není známa přesná metoda použité povrchové úpravy této folie, zajišťující dobrou adhezi nanáše-

ných kapiček inkoustu na její povrch. Pravděpodobně ale půjde o povrchovou úpravu pomocí plazmatu. Především však byla PET folie zvolena jako substrát díky své flexibilitě.

### 3.3.4 Tisk vodivých cest

K tisku vodivých cest maticového prvku byl použit inkoust tvořen disperzí nanočástic stříbra ve vodě. Vodivé cesty byly vytištěny podle navrženého motivu. Celkem bylo natištěno 5 vrstev vodivých cest, které se následně nechaly vyžít, aby bylo dosaženo co největší kompaktnosti povrchu vodivých cest k zajištění elektrické vodivosti a odolnosti proti popraskání při ohybu. Žihání (vyhřátí) bylo provedeno v sušárně vytemperované na 100°C, která byla po vložení potištěné folie vypnuta a ponechána do druhého dne k pozvolnému vychladnutí. Na Obrázek 12 jsou k vidění natištěné a slinuté vodivé cesty maticového prvku.



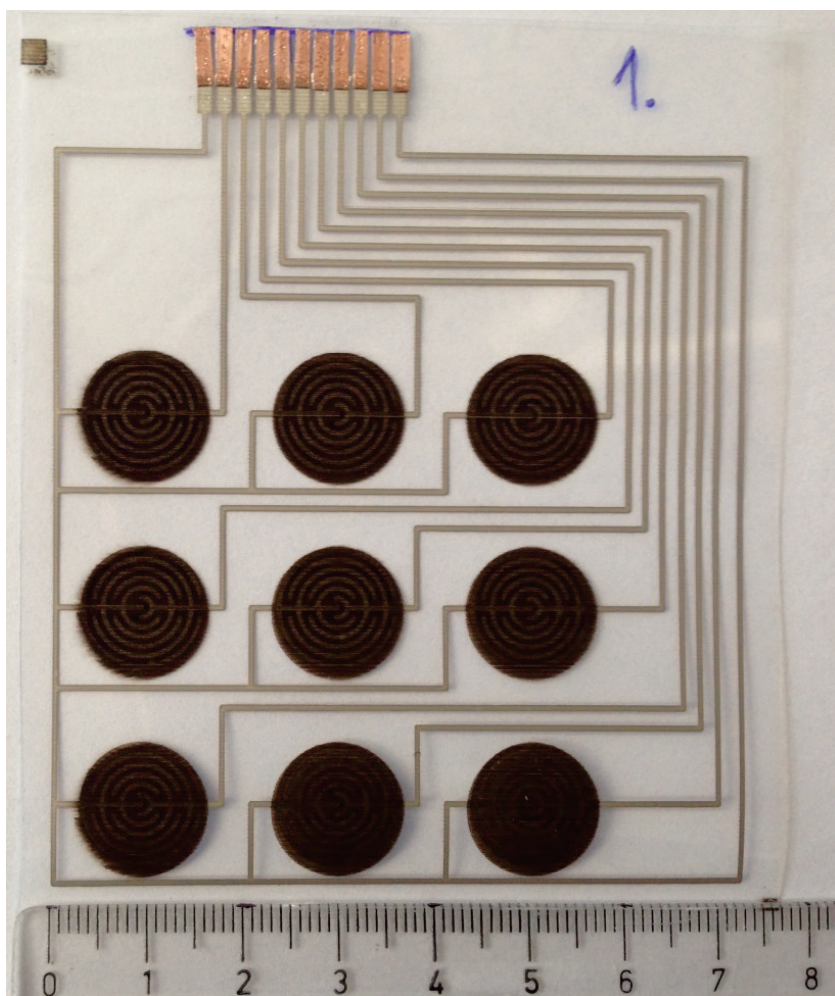
Obrázek 12: Natištěné a vyžítané vodivé cesty

### 3.3.5 Tisk citlivé vrstvy

K tisku citlivé vrstvy maticového prvku byl použit inkoust tvořen disperzí nanočástic CuO (oxidu mědnatého) ve vodě. Byly tištěny předem navržené motivy kruhového tvaru o průměru cca 13mm na předem natištěné vodivé cesty devíti kruhových interdigitů. Celkem bylo natištěno osm vrstev CuO, aby bylo dosaženo co nejkompaktnějšího povrchu citlivé vrstvy překrývající vodivé cesty interdigitů.

Další procedurou při výrobě maticového prvku bylo nalepení vodivé lepící Cu pásky na Ag kontakty prvku, zabraňující seškrábnutí stříbrné vrstvy při opakovaném zasouvání a vytahování kontaktů z patice.

Poslední procedurou výroby je odštížení přebytečné folie po stranách prvku a přesné zastřížení folie u kontaktů tak, aby kontakty přesně zapadly do patice. Hotový maticový prvek s natištěnou citlivou vrstvou a s polepenými kontakty je k vidění na Obrázku 13.

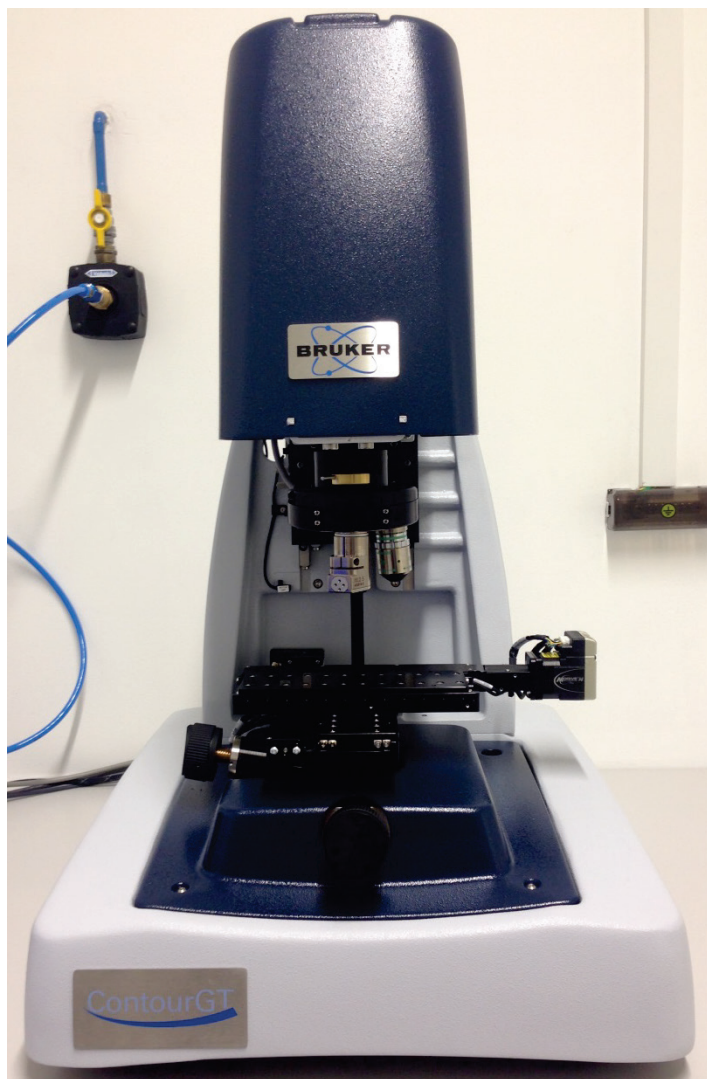


Obrázek 13: Hotový maticový prvek

### 3.4 Analýza povrchu vytištěného maticového prvku

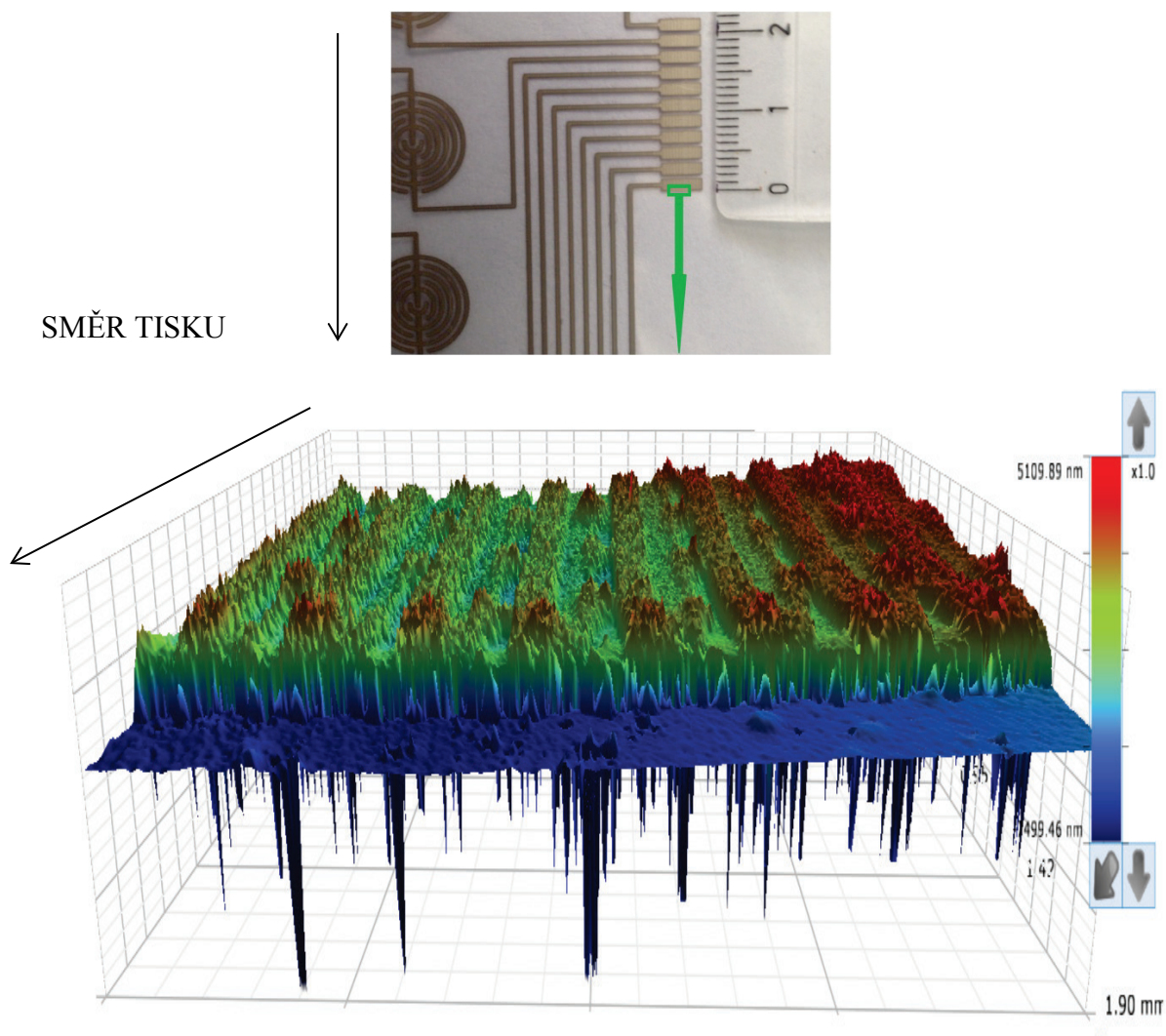
Analýza povrchu vytištěného maticového prvku byla provedena na optickém profilometru viz Obrázek 14 a na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) viz Obrázek 17.

#### 3.4.1 Analýza povrchu vodivých cest optickým profilometrem



Obrázek 14 : Optický profilometr značky BRUKER, snímek byl pořízen v laboratořích Centra polymerních systémů UTB ve Zlíně

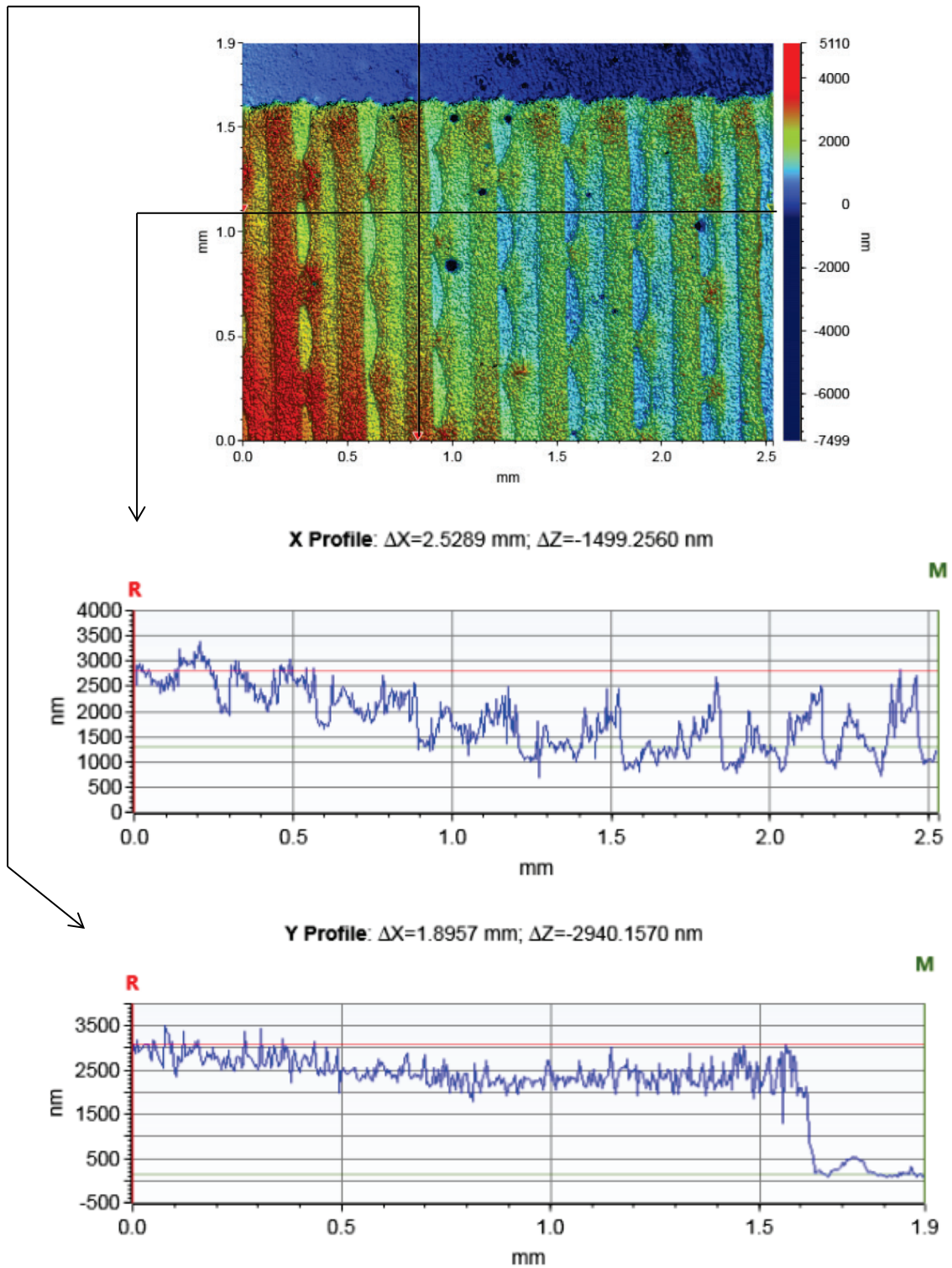
Pro analýzu povrchu vodivých cest byla zvolena oblast hrany kontaktu maticového prvku, protože oblast kontaktů bude nejvíce mechanicky namáhána (oděrem o kontakty konektoru) a bylo potřeba znát míru kompaktnosti stříbrné vrstvy po natištění a slinutí, zajišťující následnou elektrickou vodivost vrstvy. Analýzou povrchu byla zjištěna topografie povrchu natištěné vrstvy stříbra. Výsledky měření - viz Obrázek 15 a Obrázek 16.



Obrázek 15 : 3D Topografie povrchu natištěných Ag vrstev

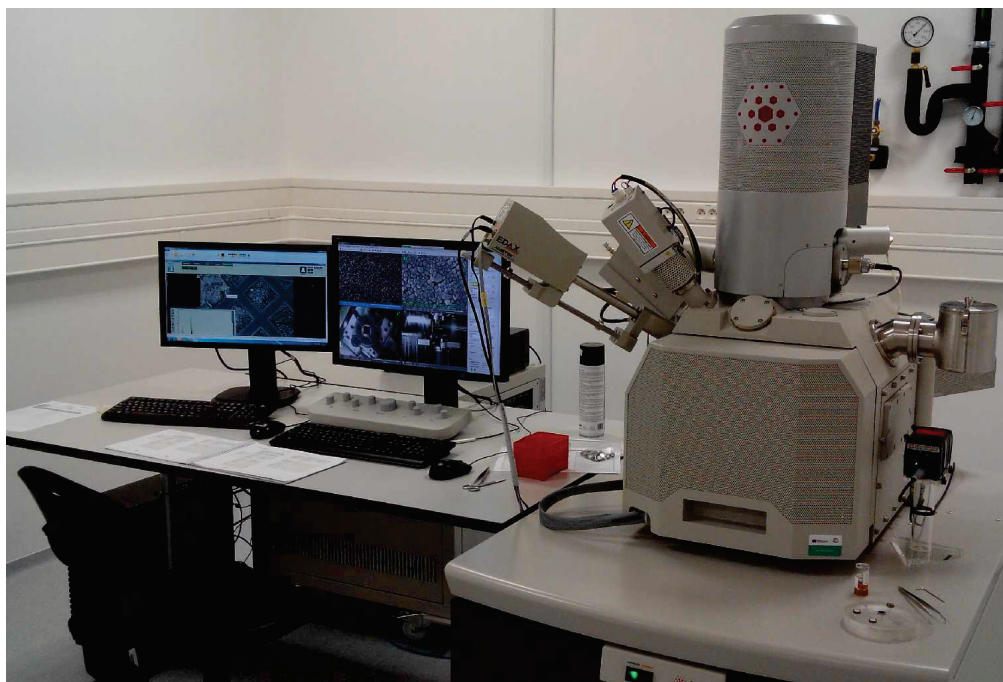
Na Obrázek 15 je vyznačena analyzovaná oblast, směr tisku a výsledná 3D topografie povrchu Ag vrstvy. Z obrázku je zřejmé to, že dlouhé vyvýšeniny připomínající řádky na poli brambor na povrchu vznikají ve směru tisku. Tento jev by se dal pravděpodobně eliminovat použitím bitmapy s větším dpi. Poté by se zaplnily i mezery mezi vyvýšenými místy.

Na Obrázek 16 je zobrazena topografie povrchu ve 2D, přičemž výška povrchu v každém bodě plochy je udána barevnou škálou. Součástí tohoto obrázku jsou dva profily získané z míst označených úsečkami na 2D topografii a to ve směru x a y. Z profilů lze snadno vyčíst výšku natisknuté vrstvy ve směru osy x a y protože nulovou výšku představuje povrch substrátu. Výška vrstvy se pohybuje v rozmezí od 1000nm do 3000nm ve směru osy x a v rozmezí od 2000nm do 3000nm ve směru osy y v místech pořízení profilů vyznačených úsečkami.

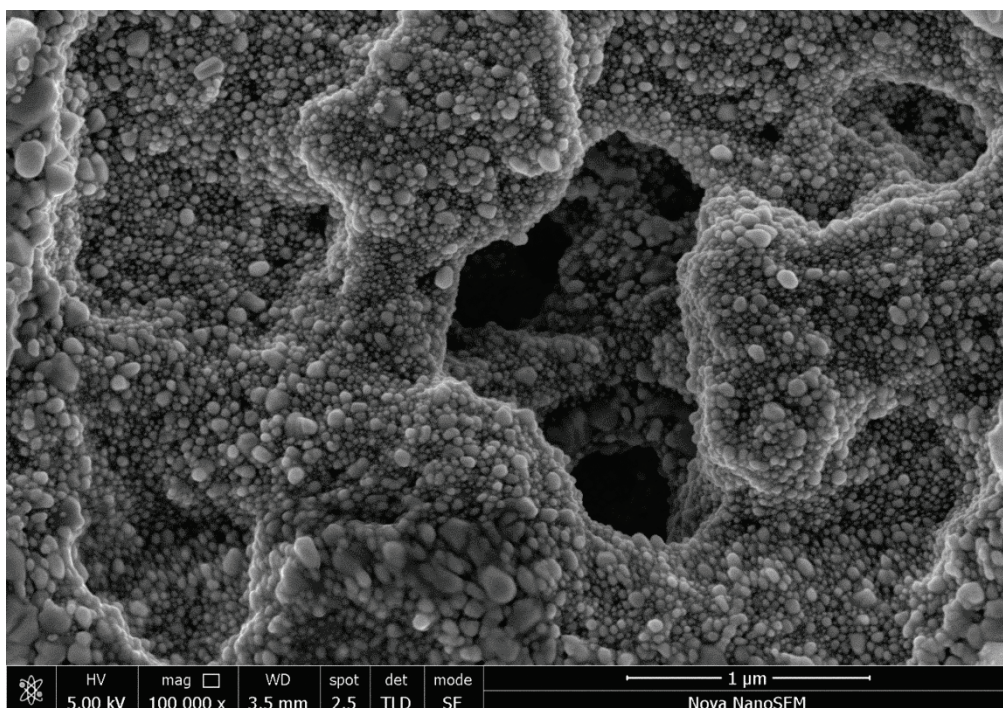


Obrázek 16 : 2D topografie a profily ve směru os x a y natištěné stříbrné vrstvy

### 3.4.2 Analýza povrchu skenovacím elektronovým mikroskopem

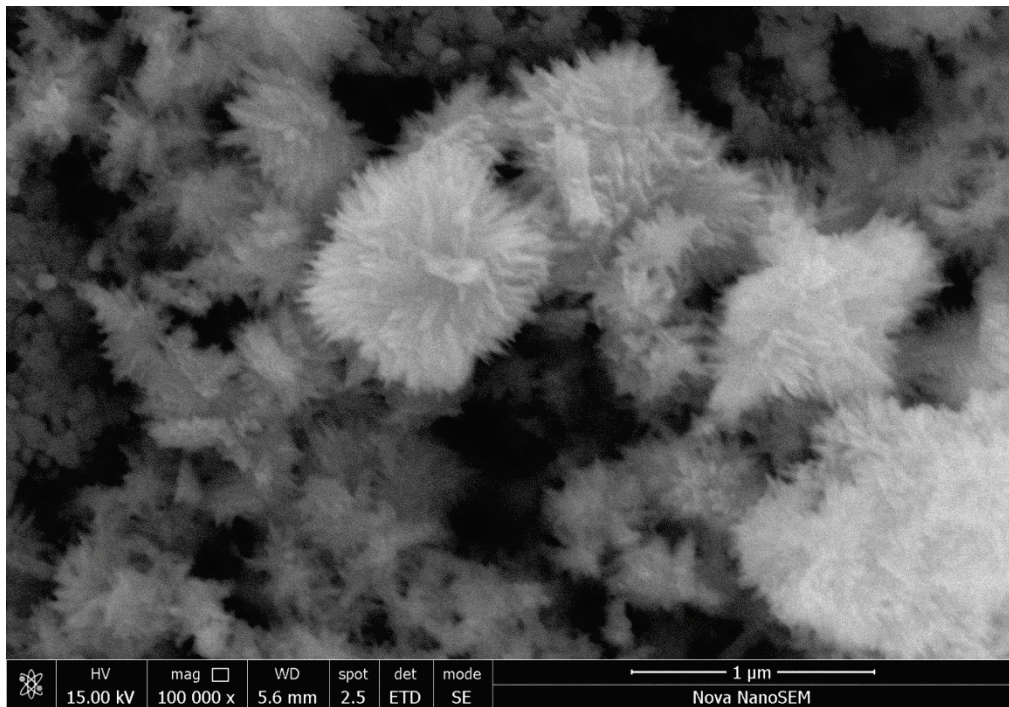


Obrázek 17 : Skenovací elektronový mikroskop, snímek byl pořízen v laboratořích Centra polymerních systémů UTB ve Zlíně



Obrázek 18 : Snímek ze SEM zobrazující povrch natištěné vrstvy tvořené nanočásticemi Ag.





Obrázek 19 : Snímek ze SEM zobrazující povrch natištěné vrstvy tvořené nanočásticemi Ag překryté vrstvou nanočástic CuO.

Na snímcích ze SEM lze pozorovat morfologii natištěných materiálů. Stříbrné elektrody a vodivé cesty jsou tvořeny nanočásticemi stříbra, které jsou ve vzájemném těsném kontaktu v kompaktní vrstvě zprostředkovávající tak výbornou elektrickou vodivost kovového stříbra. CuO je naproti tomu charakterizován strukturou chryzantémových květů s velkým měrným povrchem a bohatstvím tvarů, které dávají největší šanci materiálu být citlivý na působení jakýchkoliv plynných látek.

## 4 MĚŘENÍ NA MATICOVÉM PRVKU

### 4.1 Použité příslušenství a aparatura

Měřicím zařízením použitým pro měření elektrického odporu senzorů maticového prvku bylo zařízení Hewlett Packard typ 34970A s modulem 34901A (viz Obrázek 20). Modul (karta) typ 34901A je 20-ti kanálový multiplexer, který umožňuje měření hodnot až na dvaceti kanálech současně, respektive měří vždy jen jeden kanál, ale dokáže mezi nimi velmi rychle přepínat. Zařízení odesílá data pro softwarové zpracování do PC.



Obrázek 20 : Měřicí zařízení Hewlett Packard typ 34970A

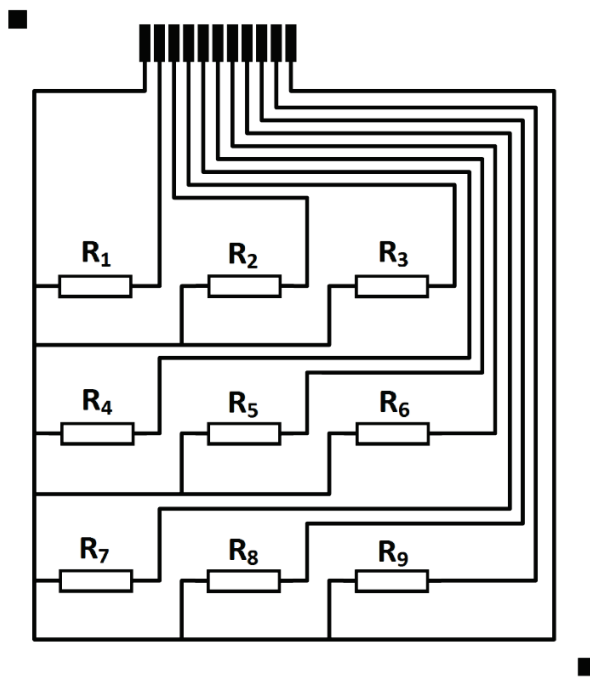
Pro měření při různých teplotách par alkoholů bylo potřeba použít temperovací lázeň. Dále aparaturu, která bude držet 800ml kádinku, opatřenou víčkem s otvorem pro zasunutí maticového detektoru, částečně ponořenou do temperovací lázně s vodou. Dále bylo použito zařízení pro odsávání případných uniklých par. Do kádinky bylo vždy nalito 150ml (tolik aby se vložený maticový prvek nemohl namočit) a kádinka byla uzavřena víčkem.



Obrázek 21 : Detail použité aparatury

## 4.2 Princip měření

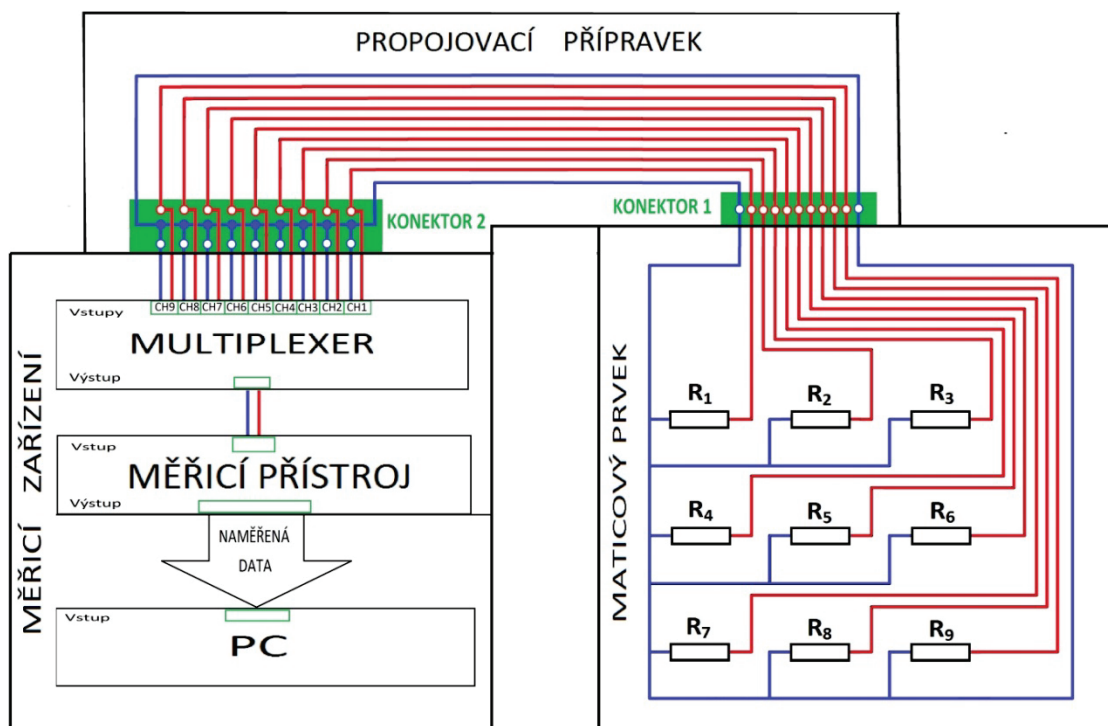
Princip měření spočívá v měření elektrického odporu každého interdigitu. Na Obrázek 22 je zobrazeno náhradní schéma maticového prvku, kde jsou pro lepší představu principu měření nahrazeny interdigity rezistory, protože interdigit u tohoto maticového prvku je vlastně rezistor s proměnným elektrickým odporem. Tento elektrický odpor klesá, když je rezistor (interdigit) vystaven alkoholovým parám. Je to pravděpodobně tím, že alkoholové páry redukují nevodivý nanostrukturovaný CuO citlivé vrstvy interdigitu, který má velký odpor (řádově stovky  $k\Omega$  až desítky  $M\Omega$ ), na vodivou nano Cu (malý odpor – jeho velikost závisí na rozsahu redukce CuO v citlivé vrstvě). Když senzory přestanou být ve styku s alkoholovými parami, tak Cu začne oxidovat na CuO vlivem vzdušné vlhkosti a elektrický odpor začne opět růst. Ověření tohoto mechanismu by vyžadovalo analýzy mimo rámec zadání práce a bude provedeno v rámci dalšího postupu výzkumu.



Obrázek 22 : Schéma náhradního maticového prvku

Pro účely měření odezvy senzoru na přítomnost alkoholových par byla zvolena perioda pracovního (testovacího) cyklu. Perioda cyklu se skládá ze dvou údobí cyklu. První údobí periody cyklu je doba, po kterou necháme interdigit vystaven působení alkoholových par. Druhé údobí periody cyklu je doba, po kterou je interdigit vystaven působení atmosférického vzduchu od vytažení z atmosféry alkoholových par až do jeho opětovného vsunutí do

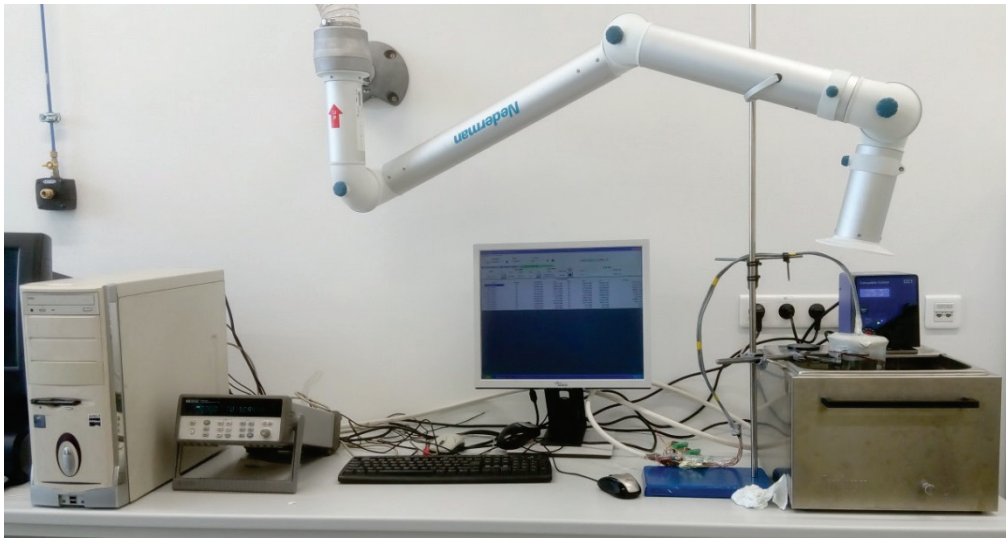
prostoru s parami. Počet cyklů je stanoven pro všechny druhy alkoholových par a pro všechny teploty stejně, tj. 4 cykly. Výsledkem měření jsou odezvy senzorů měnící se v čase. Za odezvu je považována změna elektrického odporu, vyjádřená jako poměr hodnoty naměřeného elektrického odporu ( $R$ ) k referenční hodnotě elektrického odporu ( $R_0$ ), vyjádřený v procentech. Za referenční hodnotu je vždy zvolena první (nejvyšší) hodnota elektrického odporu. Důležitým parametrem měření je také vzorkovací frekvence. Ta udává, kolikrát za vteřinu bude elektrický odpor interdigitu změřen.



Obrázek 23 : Schéma zapojení maticového prvku s měřicím zařízením

### 4.3 Detekce alkoholových par na maticovém prvku

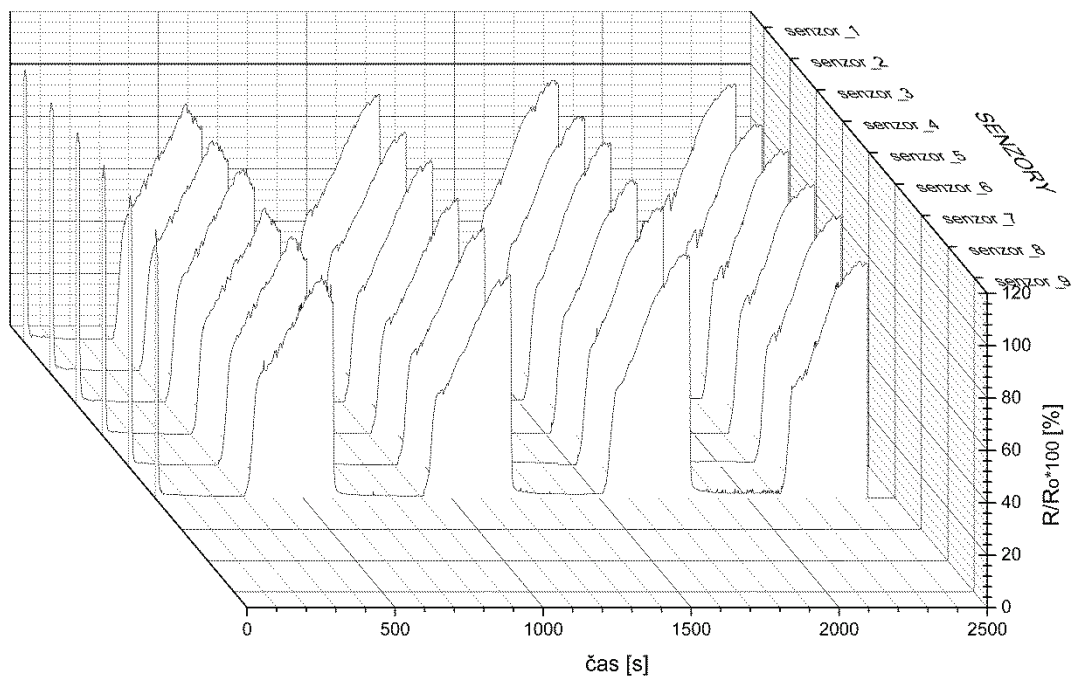
Detekce alkoholových par probíhala tak, že maticový prvek byl propojen pomocí propojovacího přípravku s měřicím zařízením, viz Obrázek 20, a uchycen k měřicí aparatuře, viz Obrázek 21. Podrobné schéma zapojení je na Obrázek 23. Nejdříve se nechala temperovat lázeň na požadovanou teplotu (25, 30 a 35°C). Poté se zapnulo měření na měřicím přístroji a maticový prvek byl následně hned vložen do otvoru ve víčku. Po uplynutí prvního údobí cyklu byl prvek vytažen otvorem opět ven a nechal se po druhé údobí na vzduchu. Po uplynutí druhého údobí byl prvek opět vložen otvorem do kádinky. Tato procedura se opakovala po dobu 4 cyklů, postupně při třech teplotách. Po uplynutí těchto cyklů bylo měření přerušeno a data uložena.



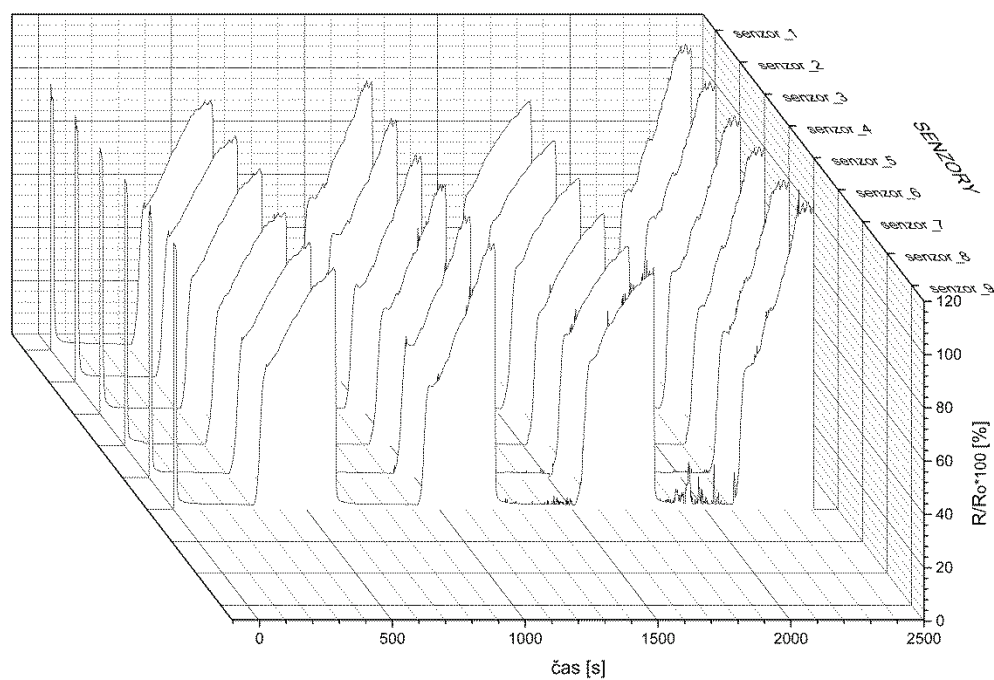
Obrázek 24 : Fotografie pracoviště s veškerou aparaturou a přístroji potřebnými pro měření.

#### 4.3.1 Detekce metanolových par

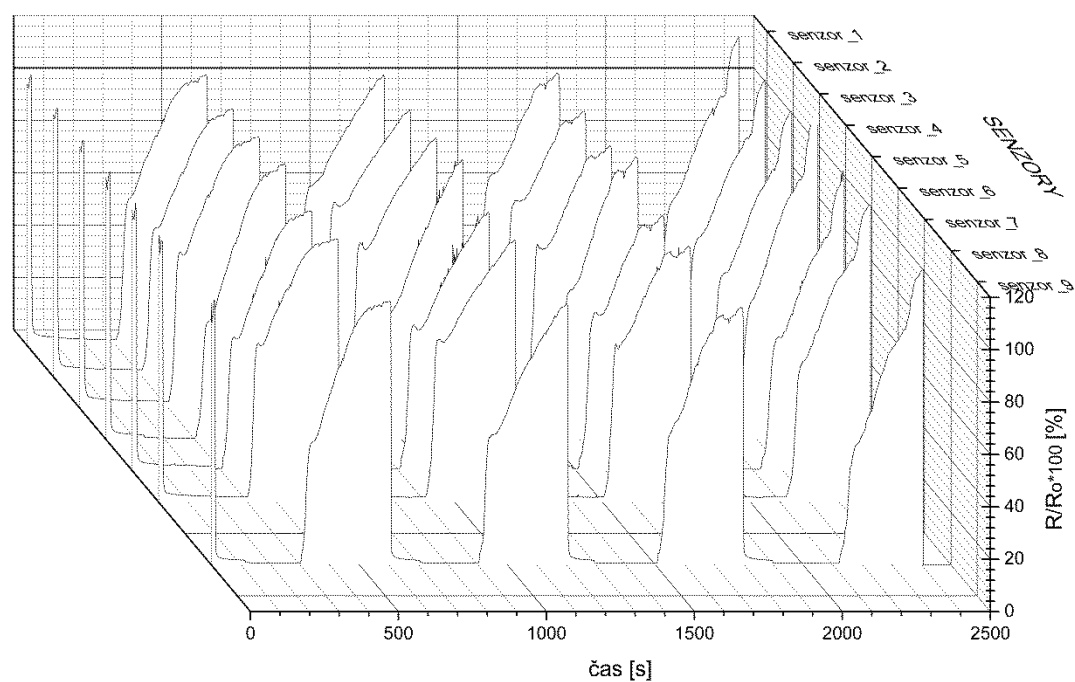
Grafy (Obrázek 25, 26 a 27) znázorňují výsledky měření odporu jednotlivých interdigitů maticového prvku v methanolových parách při třech různých teplotách. Senzory 7 a 9 a z části i 8 neposkytovaly při některých měřeních použitelný signál, proto nejsou data zobrazena.



Obrázek 25: Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na metanolové páry při 25°C

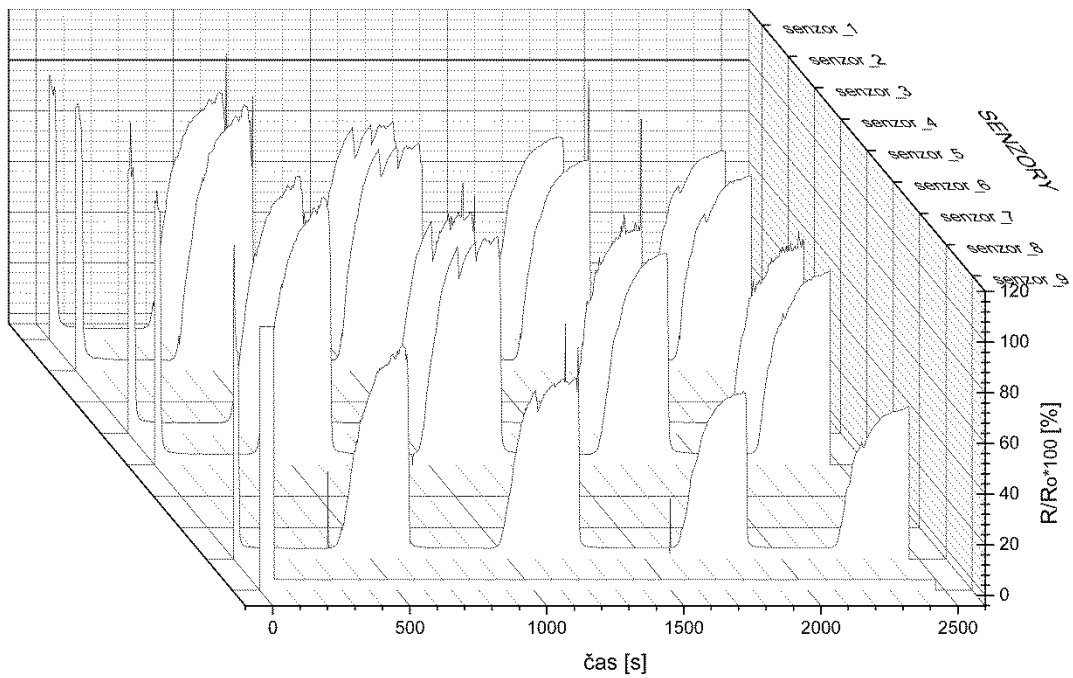


Obrázek 26 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na metanolové páry při 30°C

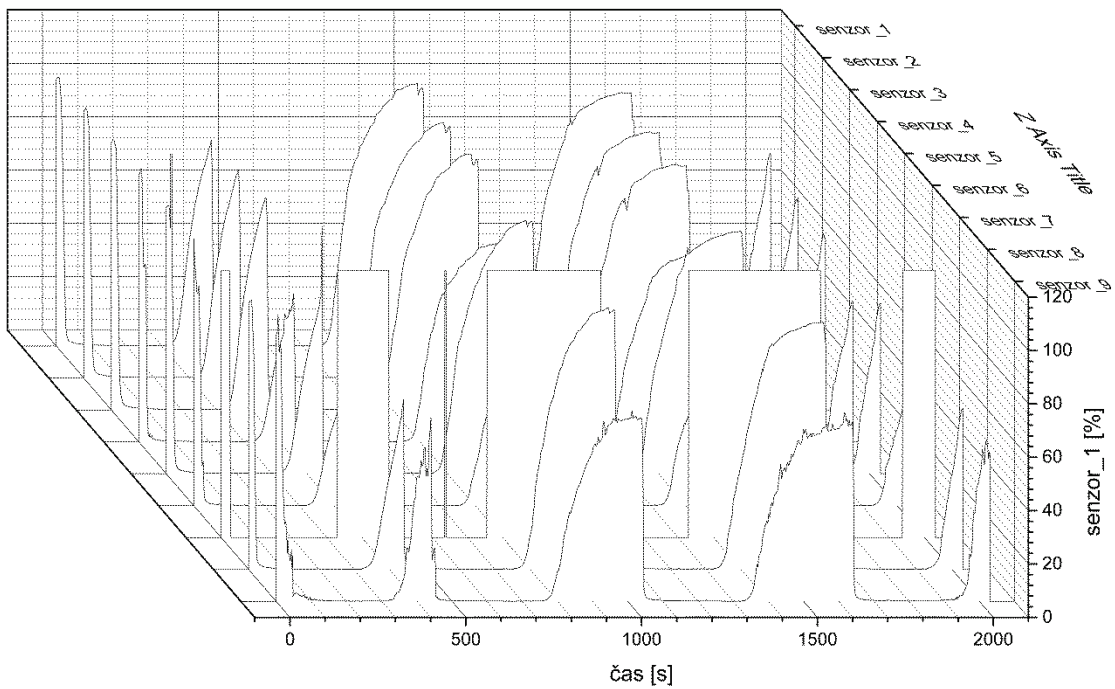


Obrázek 27 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na metanolové při 35°C

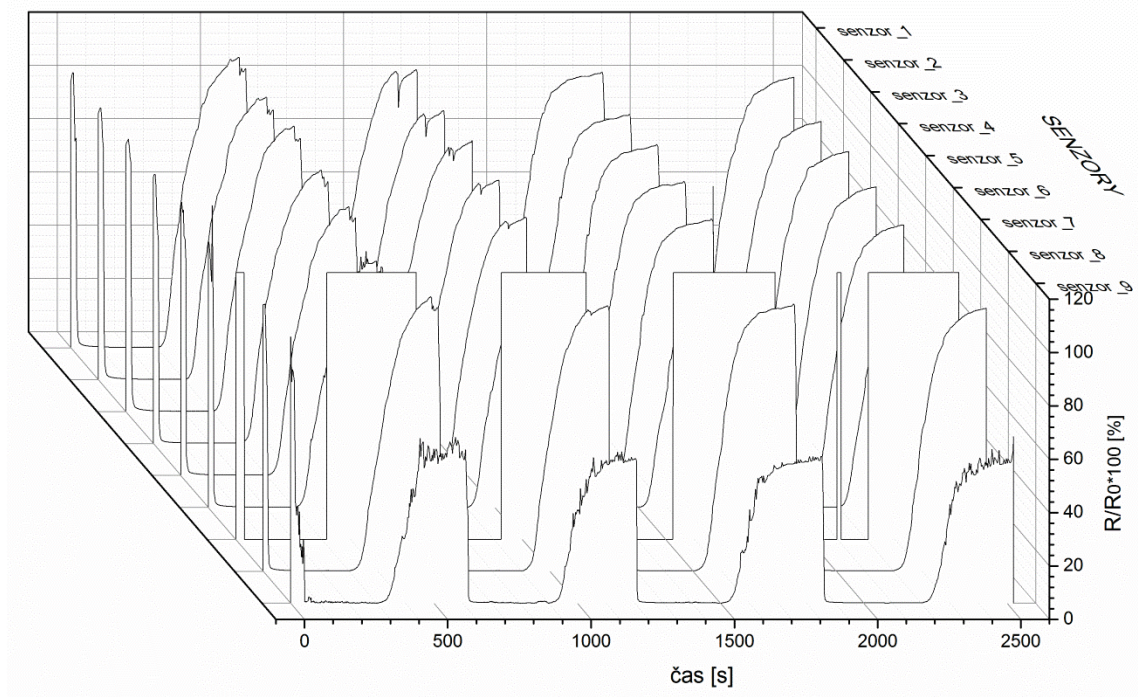
## 4.3.2 Detekce etanolových par



Obrázek 28 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na etanolové páry při 25°C



Obrázek 29 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na etanolové páry při 30°C

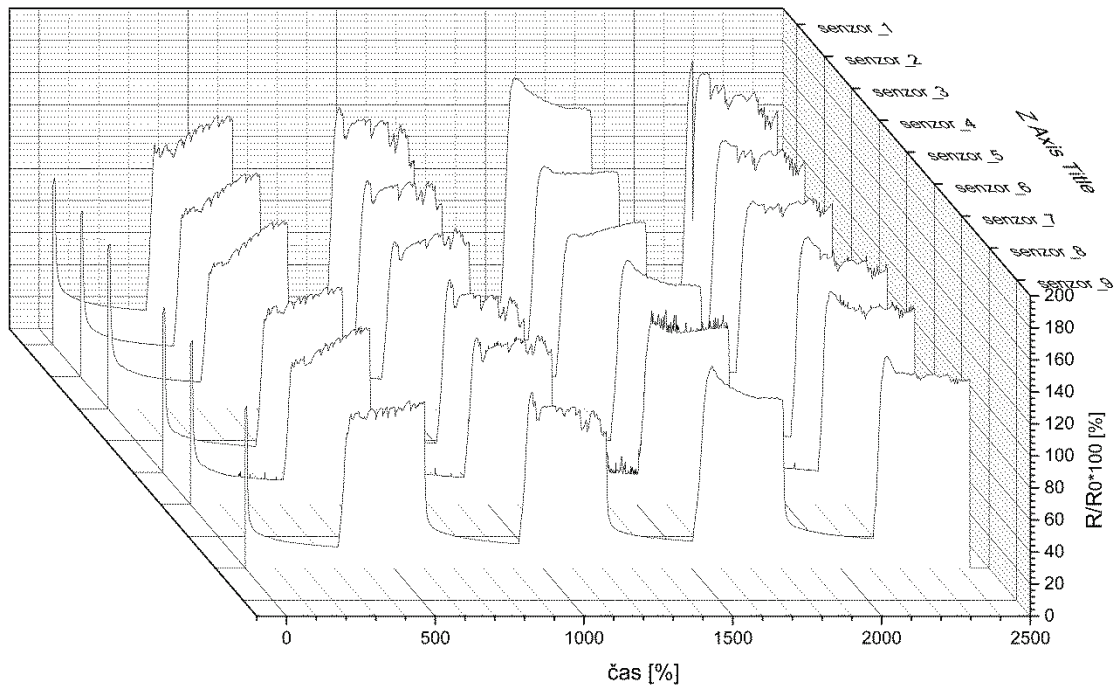


Obrázek 30 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na etanolové páry při 35°C

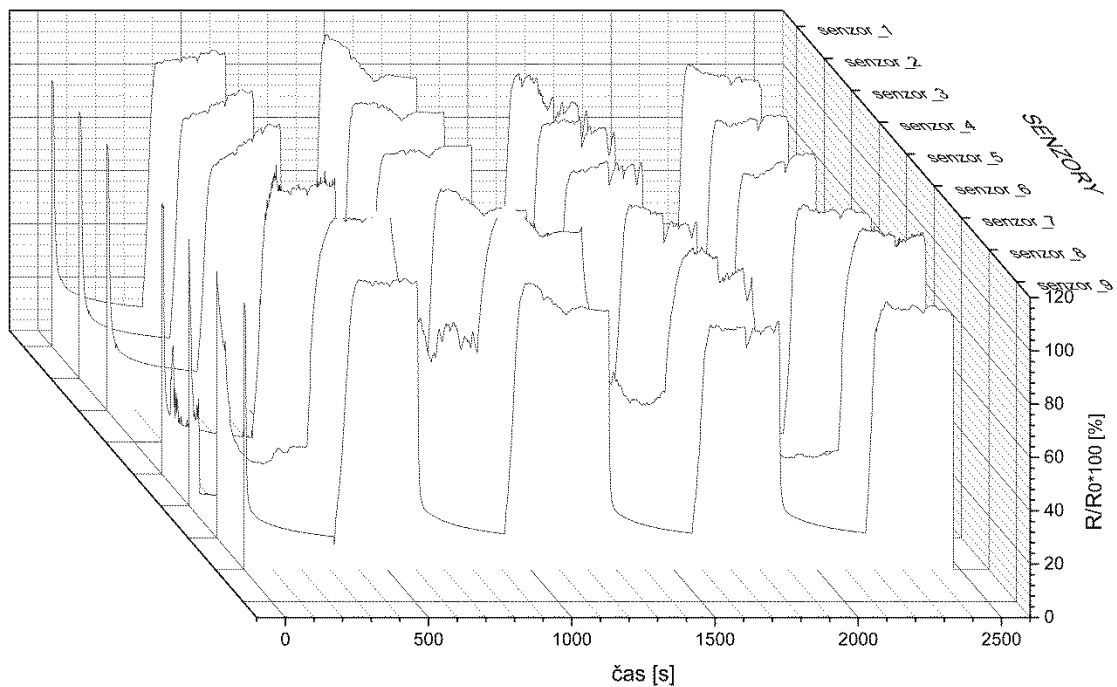
Grafy (Obrázek 28, 29 a 30) znázorňují výsledky měření odporu jednotlivých interdigitů maticového prvku v ethanolových parách při třech různých teplotách. Některé senzory opět neposkytovaly při některých měřeních použitelný signál, proto nejsou data zobrazena. Senzor 7 měřicí kanál zahltil.



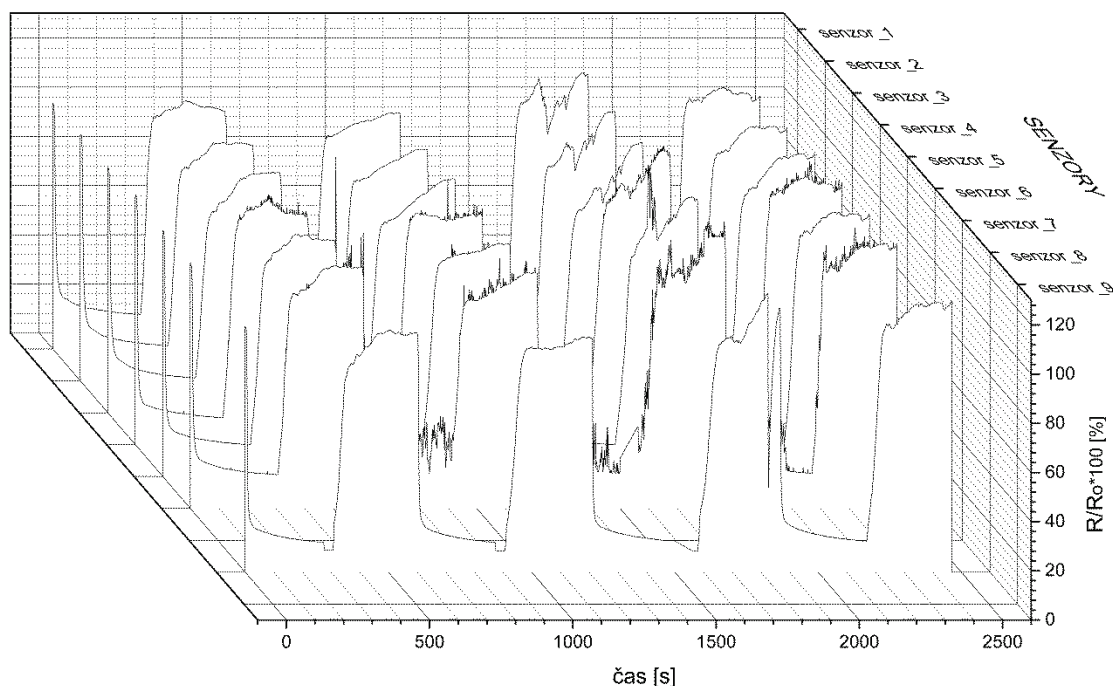
### 4.3.3 Detekce isopropanolových par



Obrázek 31 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na isopropanolové páry při 25°C



Obrázek 32 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na isopropanolové páry při 30°C



Obrázek 33 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na isopropanolové páry při 35°C

Grafy (Obrázek 28, 29 a 30) znázorňují výsledky měření odporu jednotlivých interdigitů maticového prvku v isopropanolových parách při třech různých teplotách. Některé senzory opět neposkytovaly při některých měřeních použitelný signál, proto nejsou data zobrazena.

#### 4.3.4 Shrnutí výsledků a diskuse testů par

Opakovaná pozorování prokázala schopnost prvku detekovat páry alkoholů. Vliv teploty v rozmezí 25 až 35 °C je nevýrazný a je překryt variabilitou měření. Různorodost získaných signálů je nutné chápat pozitivně, neboť až doposud se reprodukovatelnosti měření na našem pracovišti věnovalo jen málo pozornosti, a proto je nutné obzvlášť kriticky přehodnotit měření získaná na jednom interdigitu, byť by vykazovala dobrou (i výbornou) opakovatelnost.

Taktéž sensitivita vůči jednotlivým alkoholům se nezdá být příliš odlišná, přesto lze vysledovat určité typické průběhy sensorických charakteristik, a tedy jistou míru specifičnosti.

Methanol: po vložení senzoru prudký pokles elektrického odporu, po vytažení senzoru z prostředí par, rychlý nárůst cca do 50 %  $R_0$ , a pak se regenerace zpomalí.

- Ethanol: po vložení senzoru prudký pokles elektrického odporu, po vytažení senzoru z prostředí par, návrat k  $R_0$  bez charakteristického zlomu na relaxační křivce, která má exponenciální (sigmoidální) tvar blížící se k asymptotě  $R_0$ .
- Isopropanol: po vložení senzoru prudký pokles elektrického odporu, avšak nedojde k poklesu pod cca 10-15 % po vytažení senzoru z prostředí par, nastává relativně rychlý návrat k cca 90 % hodnoty  $R_0$  bez charakteristického zlomu na relaxační křivce. Po dosažení této hodnoty relaxace senzorů pokračuje různými způsoby.

## ZÁVĚR

V této diplomové práci byla vyvinuta metoda přípravy ohebného maticového prvku 3x3 senzorů par alkoholů. Maticový prvek byl vyroben na materiálové tiskárně za použití inkjetového tisku. Sensory jsou tvořeny stříbrnými (Ag) elektricky vodivými vrstvami a citlivými vrstvami oxidu měďnatého (CuO) na ohebném substrátu (PET folie), které byly natištěny inkousty tvořenými disperzemi nanočástic Ag a CuO. Sensory mají za normálních podmínek velký elektrický odpor, ale při styku s alkoholovými párami dojde k poklesu elektrického odporu senzorů. Když senzory přestanou být ve styku s alkoholovými párami, tak elektrický odpor znovu vzroste.

Byly provedeny prvotní testy možností využití připraveného maticového elementu k detekci alkoholových par. Zkoumány byly odezvy senzorů na metanol, etanol a isopropanol při teplotách 25, 30, 35°C a bylo zjištěno, že tyto procesy jsou ve všech případech reverzibilní. Vliv teploty byl v experimentech překryt mezivzorkovou variabilitou. Pokud jde o specifčnost odpovědi senzoru na konkrétní typ alkoholu, byly vysledovány typické tvary přechodových charakteristik pro methanol, ethanol a isopropanol.

Dosažené výsledky mají charakter pionýrské studie na našem pracovišti, všechny materiály byly použity poprvé a taktéž všechny přípravky, pomůcky a postupy musely být vytvořeny. Pro další postup výzkumných prací lze naznačit dva směry: (i) zlepšování metody tisku a standardizace získaných obrazců kvůli reprodukovatelnosti měření, a dále (ii) samotný výzkum funkce senzoru – zjištění, zda se jedná o chemickou reakci nebo fyzikálně chemické procesy je teprve před námi.

Z hlediska aplikačního budou mít pravděpodobně největší potenciál elementy, kde v každém senzoru bude natisknuta jiná citlivá vrstva, což vyžaduje pouze nepatrnou modifikaci tištěného motivu a procesu tisku.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, 2010, xv, 663 s. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- [2] HRUŠKA, František. *Senzory: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. (e-book), 2011, ISBN 978-80-7454-096-7
- [3] JANATA, Jiří. *Principles of chemical sensors*. 2nd ed. New York: Springer, c2009, xv, 373 p. ISBN 978-038-7699-318
- [4] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika I, učební texty pro střední školy*, 2.vydání, 2007.
- [5] HODSLAVSKÝ, Roman, *Elektrotechnika Elektronická učebnice* Bc. Mgr. Roman Hodslavský
- [6] MĚRKA, Petr. *Charakterizace polymerních vrstev pomocí AFM*. Bakalářská práce, 2013.
- [7] R. J. Lewis, *Atomic Force Microscopy in process engineering*. 2007.
- [8] KREBS, Frederik C. *Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009, vol. 93, issue 4, s. 394-412. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.10.004
- [9] YEN, Yu-Tang, Te-Hua FANG a Yu-Cheng LIN. *Optimization of screen-printing parameters of SN9000 ink for pinholes using Taguchi method in chip on film packaging*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2011, vol. 27, issue 3, s. 531-537. DOI: 10.1016/j.rcim.2010.09.008.
- [10] FADDOUL, Rita, Nadège REVERDY-BRUAS a Anne BLAYO. *Formulation and screen printing of water based conductive flake silver pastes onto green ceramic tapes for electronic applications*. *Materials Science and Engineering: B*. 2012, vol. 177, issue 13, s. 1053-1066. DOI: 10.1016/j.mseb.2012.05.015.
- [11] PUDAS, Marko. *Gravure-offset printing in the manufacture of ultra-fine-line thick-films for electronics*. Oulu: Oulun yliopisto, 2004. ISBN 95-142-7303-6.
- [12] CALVERT, Paul. *Inkjet Printing for Materials and Devices*. *Chemistry of Materials*. 2001, vol. 13, issue 10, s. 3299-3305. DOI: 10.1021/cm0101632.
- [13] XU, Qian, Petri IHALAINEN, Jan-Henrik SMÅTT, Anni MÄÄTTÄNEN, Pernilla SUND, Carl-Erik WILÉN a Jouko PELTONEN. *Template-induced fabrication of nanopatterned polymeric films by inkjet printing*. *Applied Surface Science*. 2014, vol. 313, s. 237-242. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.190.
- [14] ESPOSITO, Vincenzo, Christophe GADEA, Johan HJELM, Debora MARANI, Qiang HU, Karsten AGERSTED, Severine RAMOUSSE a Søren Højgaard JENSEN. *Fabrication of thin yttria-stabilized-zirconia dense electrolyte layers by inkjet printing for high performing solid oxide fuel cells*. *Journal of Power Sources*. 2015, vol. 273, s. 89-95. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.085.
- [15] DERBY, Brian. *Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution*. *Annual Review of Materials Research*. 2010, vol. 40, issue 1, s. 395-414. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104502.

- [16] MCILROY, C., O.G. HARLEN a N.F. MORRISON. Modelling the jetting of dilute polymer solutions in drop-on-demand inkjet printing. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2013, vol. 201, s. 17-28. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2013.05.007.
- [17] SAUNDERS, Rachel E., Julie E. GOUGH, Brian DERBY, Rachel SAUNDERS, Julie GOUGH a Brian DERBY. Delivery of human fibroblast cells by piezoelectric drop-on-demand inkjet printing. *Biomaterials*. 2008, vol. 29, issue 2, s. 35-50. DOI: 10.1007/978-90-481-9145-1\_3.
- [18] INGROSSO, Chiara, Joo Yeon KIM, Enrico BINETTI, Vahid FAKHFOURI, Marinella STRICCOLI, Angela AGOSTIANO, M. Lucia CURRI a Juergen BRUGGER. Drop-on-demand inkjet printing of highly luminescent CdS and CdSe@ZnS nanocrystal based nanocomposites. *Microelectronic Engineering*. 2009, vol. 86, 4-6, s. 1124-1126. DOI: 10.1016/j.mee.2008.11.028.
- [19] LEACH, R. *The Printing ink manual*. 5th ed. /. New York: Blueprint, 1993, xxi, 993 p., [8] p. of plates. ISBN 09-489-0581-6.
- [20] MAGDASSI, Shlomo. *The chemistry of inkjet inks*. Hackensack, NJ: World Scientific, c2010, viii, 345 p. ISBN 98-128-1821-9.
- [21] UMA, Harikrishnan K., Shobhana K. MENON a Jolke PERELAER. Crown Ether Bis-diazo Dyes for Aqueous Inkjet Inks by Micro Emulsion Technique. *Procedia Engineering*. 2013, vol. 51, s. 111-125. DOI: 10.1002/9783527647101.ch8.
- [22] SOUSA, Sónia, José António GAMELAS, António de Oliveira MENDES, Paulo Torrão FIADEIRO a Ana RAMOS. Interactions of ink colourants with chemically modified paper surfaces concerning inkjet print improvement. *Materials Chemistry and Physics*. 2013, vol. 139, 2-3, s. 877-884. DOI: 10.1007/springerreference\_66931.
- [23] MIELONEN, Katriina, Pavel GEYDT, Monika ÖSTERBERG, Leena-Sisko JOHANSSON a Kaj BACKFOLK. Inkjet ink spreading on polyelectrolyte multilayers deposited on pigment coated paper. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015, vol. 438, s. 179-190. DOI: 10.1016/j.jcis.2014.09.077.
- [24] *Indirect printing process for applying selective phase change ink compositions to substrates* [patent]. US5372852 A.
- [25] *Phase change ink formulation using a urethane isocyanate-derived resin* [patent]. US5750604 A.
- [26] *Solvent-based inkjet ink formulations* [patent]. US20110012954 A1.
- [27] *Solvent-based dye sublimation ink composition* [patent]. US8263682 B1
- [28] *SOLVENT-BASED INKJET INKS* [patent]. US20110012954 A1
- [29] EL-MOLLA, M.M. Synthesis of polyurethane acrylate oligomers as aqueous UV-curable binder for inks of ink jet in textile printing and pigment dyeing. *Dyes and Pigments*. 2007, vol. 74, issue 2, s. 371-379. DOI: 10.1016/j.dyepig.2006.02.021.
- [30] ZHAI, Dandan, Tianyu ZHANG, Jinbao GUO, Xiaohua FANG a Jie WEI. Water-based ultraviolet curable conductive inkjet ink containing silver nano-colloids for flexible electronics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2013, vol. 424, s. 1-9. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.01.055.

- [31] MIRSCHEL, Gabriele, Olesya DAIKOS, Katja HEYMANN, Ulrich DECKER, Tom SCHERZER, Carolin SOMMERER, Beatrix GENEST, Carsten STECKERT, PAUL FINK a Zivko PAVLOVIC. In-line monitoring of printing processes in an offset printing press by NIR spectroscopy: Correlation between the conversion and the content of extractable acrylate in UV-cured printing inks. *Progress in Organic Coatings*. 2014, vol. 77, issue 11, s. 671-671. DOI: 10.3403/30137966.
- [32] HUTCHINGS, Ian M. *Inkjet technology for digital fabrication*. Chicester: Wiley, c2013, xii, 372 s. ISBN 978-0-470-68198-5.
- [33] W. Gopel, K.D. Schierbaum, SnO<sub>2</sub>sensors – current status and future-prospects, *Sens. Actuators B – Chem.* 26 (May 1995) 1–12.
- [34] C. Kwan, G. Schmera, J.M. Smulko, L.B. Kish, P. Heszler, C.G. Granqvist, Advanced agent identification with fluctuation-enhanced sensing, *IEEE Sens.J.* 8 (May–Jun 2008) 706–713.
- [35] VLČEK, Jiří, *Základy elektrotechniky*, 2003, ISBN: 8594011421562
- [36] ŠTULÍK Karel, BAREK Jiří, *Senzory*, Praha 2007, ISBN: 978-80-86238-20-3
- [37] KALANTAR-ZADEH, Kouros. *Sensors an introductory course*. New York: Springer, 2013. ISBN 978-146-1450-528.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

R	Elektrický odpor senzoru (aktuální)
$R_0$	Elektrický odpor senzoru (počáteční)
G	Elektrická vodivost.
U	Elektrické napětí
I	Elektrický proud
Cu	měď
CuO	oxid měďnatý
Ag	stříbro
UV	ultrafialové
CIJ	(Continuous inkjet printing)
DOD	(Drop on demand)
PET	Polyethylentereftalát
PTFE	Polytetrafluorethylen



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 : Příklady elektrických jednobranů .....	19
Obrázek 2 : Příklady elektrických mnohobranů .....	20
Obrázek 3 : Příklady motivů interdigitů .....	21
Obrázek 4 : Schéma zapojení propojovacího přípravku .....	29
Obrázek 5 : Fotografie hotového propojovacího přípravku s očíslovanými kanály na konektorech. ....	29
Obrázek 6 : Návrh motivu vodivých cest .....	30
Obrázek 7 : Návrh motivu citlivé vrstvy .....	31
Obrázek 8 : Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix model DMP-2831 .....	32
Obrázek 9 : Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix model DMP-2831 umístěná v Gloveboxu v laboratořích CPS.....	32
Obrázek 10 : Fotografie s popisem jednotlivých částí Cartridge.....	33
Obrázek 11 : Pomůcky a komponenty pro plnění cartridge .....	34
Obrázek 12: Natištěné a vyžíhané vodivé cesty .....	35
Obrázek 13: Hotový maticový prvek.....	36
Obrázek 14 : Optický profilometr značky BRUKER, snímek byl pořízen v laboratořích Centra polymerních systémů UTB ve Zlíně .....	37
Obrázek 15 : 3D Topografie povrchu natištěných Ag vrstev .....	38
Obrázek 16 : 2D topografie a profily ve směru os x a y natištěné stříbrné vrstvy .....	39
Obrázek 17 : Skenovací elektronový mikroskop, snímek byl pořízen v laboratořích Centra polymerních systémů UTB ve Zlíně.....	40
Obrázek 18 : Snímek ze SEM zobrazující povrch natištěné vrstvy tvořené nanočásticemi Ag. ....	40
Obrázek 19 : Snímek ze SEM zobrazující povrch natištěné vrstvy tvořené nanočásticemi Ag překryté vrstvou nanočástic CuO. ....	41
Obrázek 20 : Měřicí zařízení Hewlett Packard typ 34970A.....	42
Obrázek 21 : Detail použité aparatury .....	42
Obrázek 22 : Schéma náhradního maticového prvku .....	43
Obrázek 23 : Schéma zapojení maticového prvku s měřicím zařízením.....	44
Obrázek 24 : Fotografie pracoviště s veškerou aparaturou a přístroji potřebnými pro měření.....	45

Obrázek 25: Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na metanolové páry při 25°C.....	45
Obrázek 26 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na metanolové páry při 30°C.....	46
Obrázek 27 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na metanolové páry při 35°C.....	46
Obrázek 28 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na etanolové páry při 25°C.....	47
Obrázek 29 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na etanolové páry při 30°C.....	47
Obrázek 30 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na etanolové páry při 35°C.....	48
Obrázek 31 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na isopropanolové páry při 25°C .....	49
Obrázek 32 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na isopropanolové páry při 30°C .....	49
Obrázek 33 : Odezvy jednotlivých senzorů maticového prvku na isopropanolové páry při 35°C .....	50

## SEZNAM ROVNIC

Rovnice (1) : Rovnice Ohmova zákona.....	17
Rovnice (2) : Rovnice pro výpočet el.vodivosti .....	17