

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta  
Katedra elektrotechniky a automatizace

# **Vliv vodivého inkoustu na vlastnosti taktilního snímače**

**Diplomová práce**

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Autor práce: Bc. Jaroslav Lufinka

PRAHA 2014

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra elektrotechniky a automatizace

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Lufinka Jaroslav

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

**Vliv vodivého inkoustu na vlastnosti taktilního snímače**

Anglický název

**Conductive Ink Influence on Properties of Tactile Transducer**

---

### Cíle práce

Cílem práce je zjištění vlastností taktilních senzorů s vodivým inkoustem jako převodníku síla - elektrický odpor. Bude studována závislost na různých velikostech elektrod a tloušťce naneseného inkoustu.

### Metodika

Seznamte se s principem taktilních senzorů a snímačů s využitím vodivého inkoustu a jiných polovodivých materiálů jako převodníku síla - elektrický odpor. Zjistěte závislost na různých velikostech elektrod a tloušťce naneseného inkoustu. naměřené výsledky vyhodnoťte.

### Osnova práce

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled konstrukcí a vlastností taktilních senzorů
4. Návrh měřicí metody
5. Realizace měření vlastností taktilních senzorů s vodivým inkoustem
6. Vyhodnocení naměřených výsledků
7. Závěr
8. Seznam literatury
9. Přílohy

## **Rozsah textové části**

cca 60 stran

## **Klíčová slova**

Taktilní senzor, taktilní snímač, vodivý inkoust, měření síly, měření tlaku

---

## **Doporučené zdroje informací**

VOLF, J. – TRINKL, A. – NOVÁK, M. – BÍLEK, J. – PRIKNER, P. – NEUBERGER, P.: Plantograf V12 with Optimal Size Determination Sensor Electrodes and its Using for Pressure Distribution Between Tire and Road. In: XX World Congress IMEKO, Busan, 2012, ISBN 978-89-950000-5-2 95400. pp. 1-4

VOLF, J. - PAPEŽOVÁ, S. - VLČEK, J. - HOLÝ, S.: Měřicí systém pro měření rozložení statických a dynamických tlaků s užitím v biomechanice. Jemná mechanika a optika. 2004, roč. 49, č. 5, s. 142-145. ISSN 0447-6441.

VOLF, J.: Užití taktilních čidel pro měření v biomechanice. Automatizace. 2006, roč. 49, č. 1, s. 27-29. ISSN 0005-125X.

VEDRAL, J., FISCHER, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku. ČVUT, Praha 1999

HAASZ, V., ROZTOČIL, J., NOVÁK, J.: číslicové měřicí systémy. ČVUT, Praha 2000

---

## **Vedoucí práce**

Volf Jaromír, prof. Ing., DrSc.

## **Termín zadání**

listopad 2012

## **Termín odevzdání**

duben 2014

---

Elektronicky schváleno dne 15.1.2014

**prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 24.2.2014

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan fakulty

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma "vliv vodivého inkoustu na vlastnosti taktilního snímače" vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jaromíra Volfa, DrSc. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Praze dne:

Podpis:

## **Poděkování**

Děkuji tímto mému vedoucímu práce prof. Ing. Jaromíru Volfovi, DrSc za velice cenné rady, čas a za výborný přístup při zpracování této práce. Další poděkování patří firmě Ahlborn a panu Ing. Vladimíru Kuncovi, který ochotně pomohl při řešení problému se snímačem síly. V neposlední řadě patří dík mým blízkým a rodině, která mě po celou dobu zpracování práce podporovala.

## **Abstrakt:**

Cílem této diplomové práce je zjistit vliv vodivého inkoustu na vlastnosti taktilního snímače. Práce ve své první části poskytuje popis jednotlivých vlastností a technologií taktilních snímačů. Další část je věnována vlastnostem vodivých inkoustu, jejich důležitým parametřům, metodám nanášení a použití. Praktická část se zabývá vývojem aplikačního zařízení, schopného nanášet vodivý inkoust na podklad v různých tloušťkách. Následující část pojednává o sestavení měřicího pracoviště kde je měřena závislost změny odporu vodivého inkoustu na působící síle. V poslední části práce jsou představeny výsledky měření, zhodnocení a doporučení.

**Klíčová slova:** Taktilní senzor, taktilní snímač, vodivý inkoust, měření síly, měření tlaku

## **Conductive Ink Influence on Properties of Tactile Transducer**

### **Summary:**

The aim of this thesis is to investigate the influence of conductive ink on the properties of tactile transducer. Work in the first part provides a description of each property and technology of tactile sensors. Another section is devoted to properties of conductive inks, and their important parameters, methods of application and use. The practical part deals with the development of application equipment capable of conductive ink applied to the substrate in a variety of thicknesses. The following sections describes a measurement workplace where is measured dependence of changes in resistance of ink to the applied force. The last part presents the results of measurements, appreciation and recommendations.

**Key words:** Tactile sensor, tactile transducer, conductive ink, force measurement, pressure measurement

# Obsah

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>2</b>
<b>2 PŘEHLED TAKTILNÍCH SENZORŮ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Definice a obecné pojmy.....	3
2.2 Základní vlastnosti taktilních senzorů.....	5
2.3 Taktilní senzory založené na piezorezistivním jevu .....	9
2.3.1 Rigidní piezorezistivita (Tenzometry) .....	9
2.3.2 Elastorezistivita .....	11
2.4 Další technologie taktilních senzorů .....	16
2.4.1 Kapacitní senzory .....	16
2.4.2 Piezoelektrické senzory.....	18
2.4.3 Optické senzory.....	20
2.5 Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých technologií .....	23
<b>3 PROBLEMATIKA VODIVÉHO INKOUSTU.....</b>	<b>24</b>
3.1 Vlastnosti vodivého inkoustu.....	25
3.1.1 Povrchové napětí.....	25
3.1.2 Viskozita .....	26
3.1.3 Hustota .....	26
3.1.4 Suspenze částic.....	26
3.1.5 Elektrická vodivost.....	26
3.1.6 Odolnost proti opotřebení .....	27
3.2 Inkoust s vodivými nanočásticemi .....	27
3.3 Metody nanášení vrstev inkoustu.....	27
3.3.1 Odstředivé lití.....	28
3.3.2 Ponor do kapaliny .....	29
3.3.3 Inkoustový tisk .....	29
3.4 Příklady použití vodivého inkoustu .....	31
<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>33</b>
<b>4 METODA NANÁŠENÍ VODIVÉHO INKOUSTU .....</b>	<b>34</b>
4.1 Výčet použitých vodivých inkoustů.....	35
4.2 Konstrukce aplikačního zařízení .....	37
4.2.1 Stříkací pistole.....	37
4.2.2 Zpracování aplikačního zařízení .....	38

4.2.3	Ovládání aplikačního zařízení.....	39
4.3	Postup aplikace inkoustu.....	40
4.4	Měření tloušťky vrstev inkoustu.....	42
<b>5</b>	<b>NÁVRH MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ TAKTILNÍCH SENZORŮ S VODIVÝM INKOUSTEM .....</b>	<b>43</b>
5.1	Koncept .....	43
5.2	Měřicí systém.....	44
5.2.1	Snímací matice měřících elektrod.....	44
5.2.2	Generování zatěžující síly.....	44
5.2.3	Měření tlaku.....	46
5.2.4	Měření elektrického odporu inkoustu.....	49
5.2.5	Aplikace měřicího systému v LabView.....	50
5.3	Postup měření.....	51
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....</b>	<b>54</b>
6.1	Příklad statistického vyhodnocení hodnot.....	54
6.2	Tloušťka vodivého inkoustu 7 $\mu\text{m}$ .....	56
6.3	Tloušťka vodivého inkoustu 15 $\mu\text{m}$ .....	58
6.4	Tloušťka vodivého inkoustu 23 $\mu\text{m}$ .....	60
6.5	Vyhodnocení naměřených dat.....	62
6.5.1	Vliv tloušťky inkoustu a velikosti plochy elektrod na vlastnosti taktilního snímače.....	63
6.5.2	Nejvhodnější kombinace elektrody a tloušťky vodivého inkoustu.....	65
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ PRO ZLEPŠENÍ .....</b>	<b>68</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ: .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ: .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM TABULEK:.....</b>	<b>76</b>
	<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>I</b>



# 1 ÚVOD

Práce je zaměřena na taktilní senzory, přehled jejich vlastností, technologií a konstrukcí a především zjištění vlivu vodivého inkoustu různých tloušťek na vlastnosti taktilního snímače. Taktilní senzory jsou založeny na různých principech a jedním z nich je piezorezistivní jev, který vykazují určité materiály. Známý zástupce piezorezistivního chování je tenzometr, který se vyrábí z kovu nebo polovodičových materiálů a v miniaturních formách tvoří konstrukce taktilních sensorů. Mezi materiály vykazujícími piezorezistivitu řadíme také tzv. elastorezistivní materiály. Tyto materiály mají flexibilní charakter a jsou saturovány o vodivé částice. Jejich princip změny vodivosti spočívá v přibližování vodivých částic vlivem působící síly a vytváření tak vodivých cest snižujících odpor materiálu. Vodivá guma je jedním s představitelů elastorezistivních materiálů, používaná např. v přístroji Plantograf V12. Na trhu ale existují i jiná média a jedním z nich je vodivý inkoust, který je také obohacen o vodivé částice a měl by tedy vykazovat piezorezistivní chování. Vodivý inkoust je primárně vyráběn jako náhrada měděných cest v elektronice, umožňující jejich tisk. Protože je vodivý inkoust kapalina dovoluje aplikaci na požadovaná místa a v různých vrstvách. Nabízí se tedy možnost použít vodivý inkoust do konstrukce taktilního senzoru jako převodníku síly na elektrický odpor.

Prvním úkolem je zpracovat metodu nanášení inkoustu na měřicí elektrody, která bude schopna vytvářet různě silné vrstvy inkoustu. Metoda je realizována aplikačním zařízením, které obsahovalo speciální stříkací pistoli s ovládáním doby nástřiku inkoustu.

Po sestavení aplikačního zařízení a vytvoření různě tlustých vrstev vodivého inkoustu je přistoupeno k měření. Měření se zabývá snímáním závislosti změny odporu vodivého inkoustu na zatížení při rozdílných tloušťkách vodivého inkoustu a rozdílných velikostech ploch snímacích elektrod. Zatížení je generováno pomocí robota Turbo Scara SR60 a způsobená síla je měřena tenzometrickým snímačem síly. Závěrem této práce jsou data z měření vyhodnocena a je vybrána nejvhodnější kombinace elektrody a tloušťky vrstvy inkoustu.

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 2 PŘEHLED TAKTILNÍCH SENZORŮ


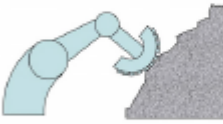

### 2.1 Definice a obecné pojmy

Taktilní senzory a snímače slouží k získání specifické informace, kterou nazýváme taktilní informace. Slovo taktilní znamená v překladu hmatové, tudíž pro získání taktilní informace je nutná přímá interakce předmětu a senzoru. Senzory jsou principiálně založené na měření síly respektive tlaku, pokud jsou tyto senzory uspořádány do maticového nebo jinak geometrického pole, potom mluvíme o taktilním snímači. Ten již dokáže měřit rozložení tlaků na své ploše a distribuovat tak taktilní informaci. Pro lepší orientaci v problematice uvedme definici dle M. H.Lee H.R.Nicholls.

Taktilní senzor je schopný na základě dotykové události s vnějším objektem zaznamenat jeho přítomnost a díky této dotykové informaci dokáže také měřit vlastnosti objektu, s nímž je v interakci. Díky této interakci umožňuje senzor získat specifickou informaci, kterou nelze získat jiným způsobem. [2]

Podobně jako hmatové receptory u lidí převádí taktilní senzor informaci o dotyku na elektrický signál, který je úměrný síle podnětu. Slouží tedy jako převodník silové veličiny na veličinu elektrickou a k tomu využívají různých fyzikálních zákonitostí. Taktilní senzory se realizují v mnoha provedeních od jednoduchých mikrospínačů až po sofistikované senzory schopny detekovat vícere zatížení. [1][2]

Schopnost rozlišovat rozdíly mezi povrchy textur, tuhost, detekovat počínající prokluz a vrátit objekt zpět mezi úchopnou hlavici, měřit rozložení tlaků na dané ploše a další. To jsou některé z důvodů proč snímat hmatovou informaci a možnosti jak a kde ji využít je celá řada. Především stojí za zmínku robotika, kde je dotyková informace užitečná v mnoha směrech. Tento obor jako jeden z prvních začal experimentovat na poli taktilního snímání a díky tomu bylo vynalezeno různých principů, konstrukcí a technologií taktilních senzorů použitelných i v jiných vědních oborech. Umělý hmat v robotice se inspiruje u lidské schopnosti vnímat hmat a z toho také vycházejí tři základní druhy aktivit proveditelných díky hmatu: manipulace, průzkum a odezva. Nejlépe tyto aktivity zobrazuje *Obr. 1*. Manipulaci lze prezentovat například jako pohyb motoru robotické ruky, kde taktilní senzor zajišťuje stabilitu. Taktilním čidlem je možné odlišit např. pravou kůži od syntetiky, to můžeme nazvat průzkumem. Hmatovou odezvou lze rozlišovat jemný dotek nebo náraz. [4]

	<p>Manipulace: kontrola úchopové síly; lokalizování kontaktu a pohybu; hodnocení stability</p>
	<p>Průzkum: textura povrchu; tření a tvrdost; tepelné vlastnosti;</p>
	<p>Odezva: detekce a reakce na kontakt externích činitelů</p>

Obr. 1 Použití taktilní informace

Taktilní senzory lze volně rozdělit do tří podskupin, dle [3].

### **Jednoduché dotekové senzory**

Tyto senzory detekují sílu na jednom definovaném bodě. Obvykle se jedná o prahové senzory nebo binární senzory, které jsou schopny podat informaci pouze o kontaktu s objektem.

### **Prostorové senzory**

Prostorové senzory obvykle reprezentují jednotlivé dotekové senzory zařazené do pole, díky němuž jsou schopny měřit prostorovou distribuci síly.

### **Senzory zaznamenávající skluz (smyk)**

Tyto senzory detekují a měří pohyb objektu po senzoru, tedy smykovou složku síly. Takové vlastnosti může být dosaženo speciálně navrženým senzorem nebo interpolací údajů z pole senzorů.

Moderní taktilní senzory jsou schopny snímat smykovou i normálovou složku síly, díky své sofistikované konstrukci. Příklady konstrukcí budou znázorněny v následujících kapitolách.

Taktilní senzory mohou po dostatečné interakci se zkoumaným objektem získat informaci, kterou běžně zpracovávají vizuální systémy. Oproti vizuálním systémům mají ale určité výhody:

- taktilní senzory jsou lehká a malá zařízení schopná integrace do hlavic robota apod.
- jejich pracovní prostor je schopný změny díky umístění na robota
- oproti vizuálním systémům nejsou závislé na kvalitě osvětlení sledované scény
- řízení robotických pracovišť v reálném čase, vizuální řízení potřebují nějaký čas na zpracování a kompresi obrazu
- náklady na realizaci jsou nižší

Taktilní senzory mají i určité nevýhody oproti vizuálním systémům:

- rozlišovací schopnost je omezená díky mechanickým vlivům konstrukce
- kontaktní metoda – je vyžadována minimální úchopná síla, která vede k opotřebení senzoru

## 2.2 Základní vlastnosti taktilních senzorů

Každý senzor má své vlastnosti a funkce, které ho definují. Pro tuto práci je důležité vytyčit elementární vlastnosti zkoumané u taktilních senzorů. [3]

### Linearita

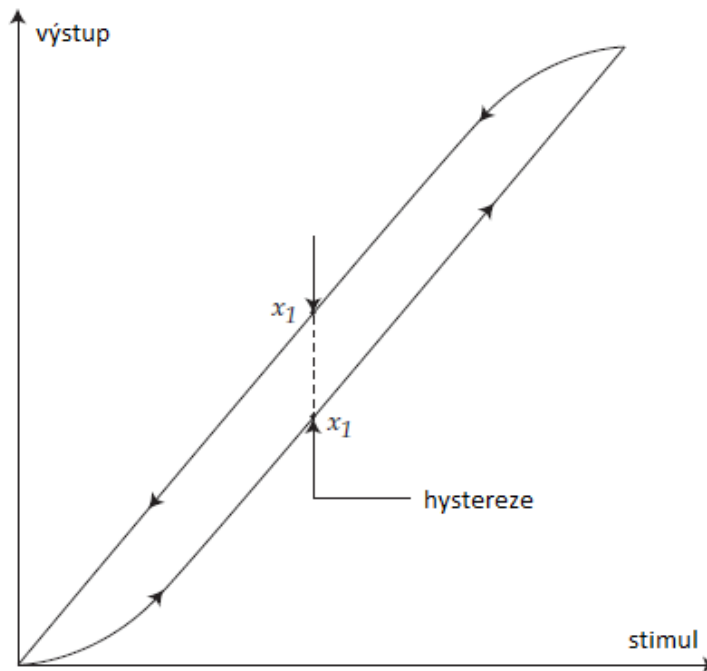
Důležitý parametr definující charakteristiku senzoru. Čím více je charakteristika lineární tím jednodušeji lze popsat vztah mezi vstupem a výstupem a také kalibrovat senzor. Hodnota linearity je udávána v procentech z rozsahu měření. Nelinearita je vyjadřována jako velikost chyby způsobené nelinearitou.

### Rozlišení

Jedná se o schopnost senzoru rozlišovat dvě velmi blízké hodnoty na vstupu. Například senzor pracující v rozsahu 10 – 150 N s rozlišením 1,5 N, dokáže detekovat působení síly, pokud bude větší nebo menší než 1,5 N.

### Hystereze

Zatěžování taktilního senzoru cyklickou silou může docházet k odchylkám výstupního signálu tzv. hysterezní chybě, viz. *Graf. 1*. Např. vodivá guma, která je využívána u odporových taktilních senzorů má svoji určitou elasticitu a dochází k odchylce výstupní charakteristiky při zatěžování a odlehčování vlivem flexibility materiálu. Hystereze u taktilních snímačů představuje negativní parametr, tudíž při návrhu či výběru senzoru je kladen důraz na co nejmenší hodnotu hystereze.



Graf. 1 Příklad hysterezní křivky

### Rozsah

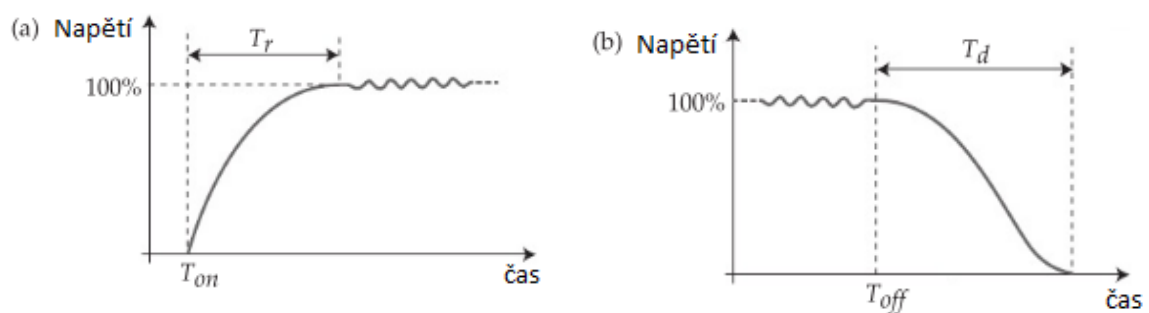
Parametr udávající minimální a maximální vstupní hodnotu, kterou je senzor schopen kvalitně zpracovat, aby hodnota výstupu odpovídala udávané přesnosti a byla co možná nejvíce lineární.

### Přesnost

Největší odchylka mezi ideálním výstupním a reálným signálem. Přesnost je udávána v procentech.

### Doba odezvy

Časový údaj reprezentující dobu, kterou senzor potřebuje k ustálení výstupního signálu při změně vstupního signálu, viz. Graf. 2. Tento jev je patrný i při záporné změně vstupního signálu a nazývá se doba poklesu.

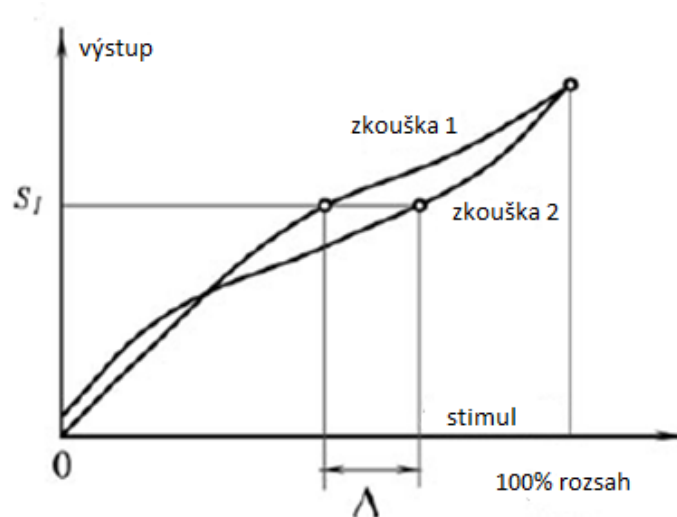


Graf. 2 a) doba náběhu b) doba poklesu

### Chyba opakování

Senzor díky různým vlivům působícím na senzor není schopen zobrazovat vždy stejné hodnoty a projevuje se tzv. chyba opakování nebo také chyba reprodukovatelnosti. Mezi negativní zdroje způsobující tuto chybu patří tepelný šum, plastičnost materiálu další. Právě plastičnost materiálu má největší dopad na taktilní senzory založené na piezorezistivních materiálech, zejména potom na vodivé gumě. Chyba opakování je vyjadřována jako největší rozdíl na výstupu mezi dvěma kalibračními křivkami, viz. Graf 3. Obvykle se stanovuje v procentech z celkového rozsahu, viz. rovnice (1).

$$\delta_r = \frac{\Delta}{r} 100\% \quad (1)$$



Graf. 3 Chyba opakovatelnosti, dva různě velké vstupní signály náležejí stejnému výstupnímu signálu

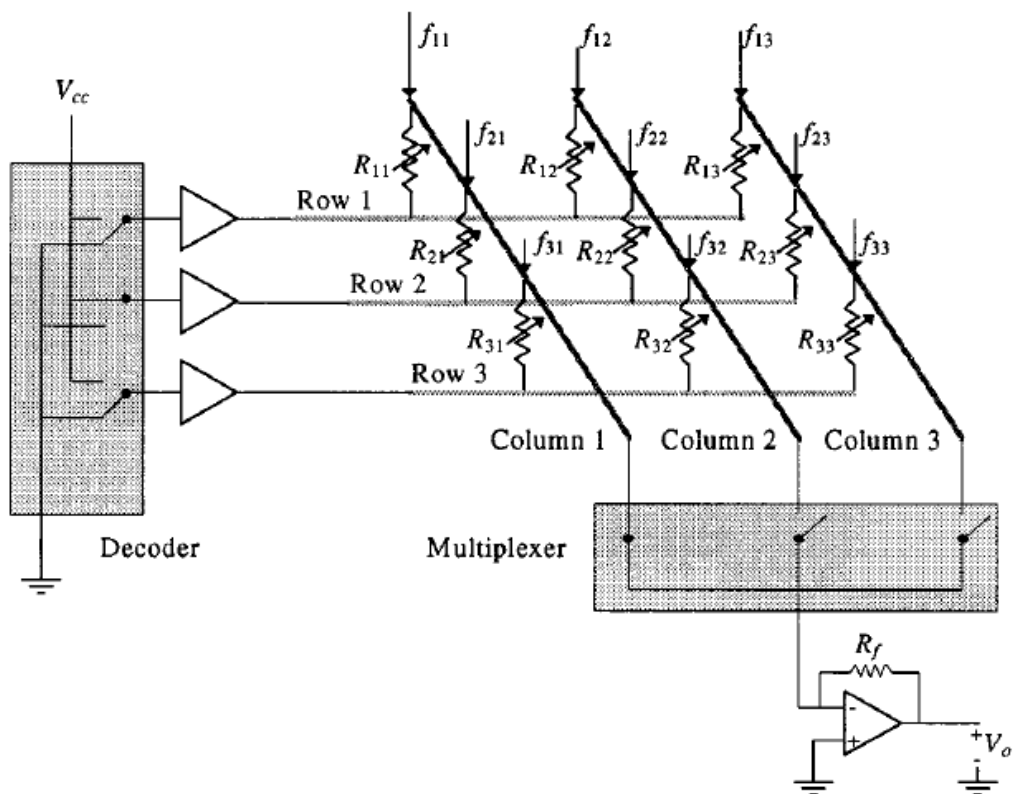
Mezi další významné vlastnosti taktilních senzorů můžeme dále řadit mechanické provedení a odolnost, velikost, odolnost vůči rušení, hmotnost a také cenu. Ve studii [5] Mark H. Lee provedl výzkum s cílem určit obecné specifikace pro taktilní senzory. Tyto specifikace byly následně použity pro návrh mnoha taktilních senzorů. Specifikace senzoru jsou:

- 1) Prostorové rozlišení 1 až 2 mm
- 2) Velikost pole  $5 \times 10$  až  $10 \times 20$  prvků
- 3) Senzitivita od  $0.5 \times 10^{-2}$  do  $1 \times 10^{-2}$  N pro každý snímací element (tactel)
- 4) Dynamický rozsah 1000:1
- 5) Stabilní chování a žádná hystereze

- 6) Samplovací frekvence od 100 Hz do 1 kHz
- 7) Monotónní odezva, nemusí být nutné lineární
- 8) Kompatibilní rozhraní, robustní a levné provedení

Výše popsané vlastnosti (5), (7) a (8) by se měly vztahovat obecně k jakémukoli senzoru, ostatní jsou pouze návrhy, zejména počet prvků pole a prostorové rozlišení. Ve studii [6] byly identifikovány doplňující žádoucí vlastnosti taktilních senzorů jako je spolehlivost, modularita, rychlost a možnost podpory multisenzoru. [7]

Obr. 2, znázorňuje příklad taktilní matice a její schéma zapojení používající změnu odporu na jednotlivých snímacích elementech jako převodník síly. Řádky a sloupce jsou postupně spínány a je z nich vyčítána hodnota napětí na jednotlivých bodech, která odpovídá změně odporu při působení síly. [7]



Obr. 2 Obecná konfigurace taktilního pole na principu změny odporu



## 2.3 Taktilní senzory založené na piezorezistivním jevu

Vodivý inkoust zkoumaný v této práci pracuje na principu piezorezistivity, proto je důležité pro pochopení této problematiky si tento jev probrat blíže. Z těchto důvodů byla kapitola o piezorezistivitě a senzorech na ní založených vyhrazena zvlášť.

Piezorezistivní taktilní senzory jsou vyrobeny z takového materiálu, který mění svůj elektrický odpor při působení tlaku. Samotné slovo “piezo“ je odvozené z řeckého slova tlak. Piezorezistivní efekt je dobře známý při mechanickém namáhání kovového vodiče (tenzometru), který mění svoji geometrii a s tím také elektrický odpor  $R$ . Tento jev lze vyjádřit vztahem, viz. rovnice (2). Efekt piezorezistivity se uplatňuje i u polovodičových materiálů a je o několik řádů větší. Ovšem výsledný odpor nezávisí pouze na změně objemu materiálu, ale je také závislý na změnách ve vnitřní struktuře. [8] [9]

$$R = \int_A^B \frac{\rho ds}{S} \quad (2)$$

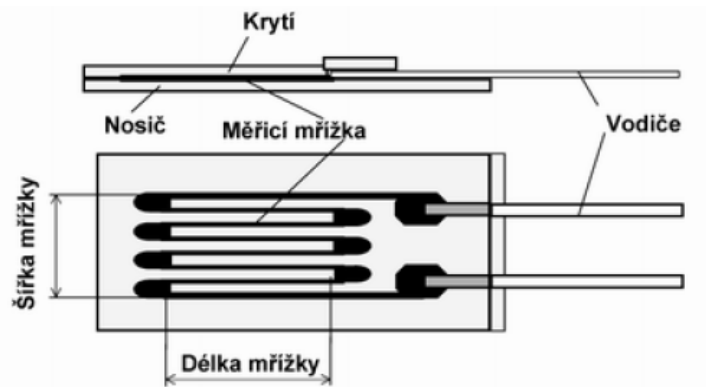
$R$  ( $\Omega$ ) – odpor proudové trubice mezi průřezy  $A$ ,  $B$  kolmými ke směru vektoru proudu  $J$ ;  $\rho$  ( $\Omega m$ ) – měrný odpor;  $S$  ( $m^2$ ) – průřez vodiče.

Mnoho piezorezistivních taktilních snímačů využívá efekt změny kontaktního odporu mezi dvěma povrchy při zatížení. Tento jev objevil francouzský inženýr Theodore du Moncel v 19. století. [9]

Piezorezistivní materiály lze rozdělit podle mechanických vlastností do dvou skupin, na rigidní piezorezistory a elastorezistory. [9]

### 2.3.1 Rigidní piezorezistivita (Tenzometry)

Tenzometr je senzor, který je schopen měřit tenzi tedy mechanické napětí. Jeho konstrukce je uspořádána tak, aby při její deformaci (prodloužení či zkrácení) vyvolané vnější silou došlo ke změně odporu. Tenzometr ke své činnosti potřebuje deformační člen, na který je vhodně umístěn, obvykle nalepen. Rozlišujeme tenzometry kovové a polovodičové. Kovové se dále dělí na fóliové a drátkové. K docílení vyšší citlivosti se kovový vodič umísťuje na izolační vrstvu do meandrického tvaru, viz. Obr. 3. [8]



Obr. 3 Fóliový tenzometr

Relativní změnu odporu vzhledem k relativnímu prodloužení fóliového a drátkového tenzometru lze vypočítat dle vztahu (3). [1]

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \varepsilon \quad (4)$$

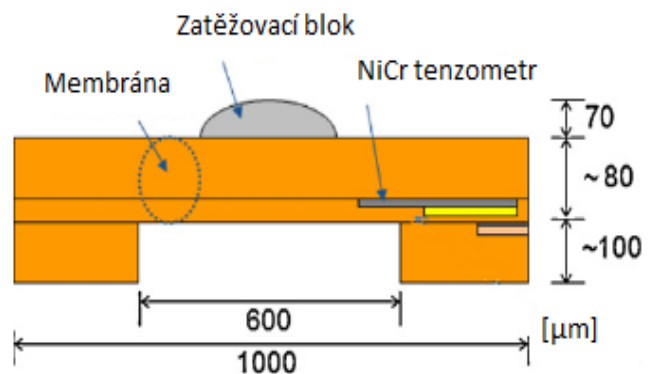
Kde:

$K$  – součinitel deformační citlivosti ( $K \sim 2$ ),  $\varepsilon$  – poměrné prodloužení ( $\varepsilon \sim 10^{-3}$ ),  $\Delta R$  ( $\Omega$ ) - změna odporu,  $R_0$  ( $\Omega$ ) - počáteční odpor

Tenzometry se obvykle zapojují do Wheatstonova můstku, kde je jeden pár tenzometrů namáhán na deformačním členu na tlak a pár druhý na tah. Vzniká tak největší rozdíl napětí na měřící diagonále a to v jednotkách  $\mu V$  a díky zapojení do můstku je zajištěna tepelná kompenzace.

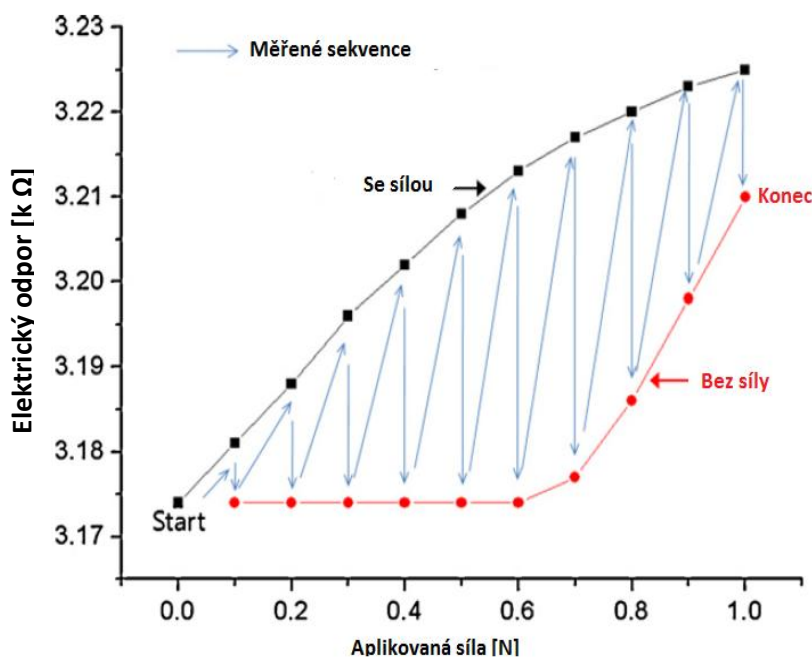
### 2.3.1.1 Příklad konstrukce taktilního senzoru s tenzometry

V práci [10] bylo vyvinuto flexibilní taktilní sensorové pole založené na polymerové MEMS technologii a s galvanickým pokovením. Pole taktilního senzoru bylo velké až  $32 \times 32$  snímacích elementů, které jsou odpojitelné, viz. Obr. 5. Senzor je založen na kovovém NiCr tenzometru vloženém v polymerové membráně. Obr. 4 ukazuje strukturu a rozměry jednoho snímacího elementu. Jeden taktilní element byl testován normálovou silou od 0 – 1 N. Naměřené hodnoty odporu se téměř lineárně zvětšovaly vzhledem

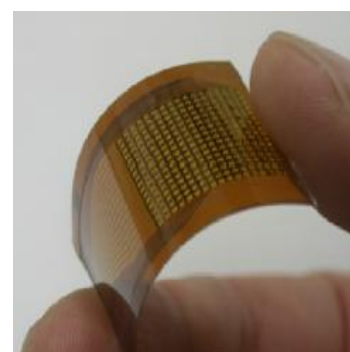


Obr. 4 Struktura jednoho snímacího elementu

k aplikované síle v rozsahu od 0 – 0,6 N. Elektrický odpor od síly větší než 0,6 N se již nevracel na původní hodnoty po odlehčení, ale vznikla odchylka způsobená deformací membrány, která překročila svoji elasticitu, viz. Graf. 4. Změna odporu byla 2%/N v rozsahu 0 – 0,6 N a 1%/N v rozsahu 0,6 – 1 N. Díky flexibilnímu materiálu je možné použít tento taktilní senzor i na nerovné povrchy.



Graf. 4 Závislost rozdílu odporu na aplikované síle, a obnova hodnot odporu.



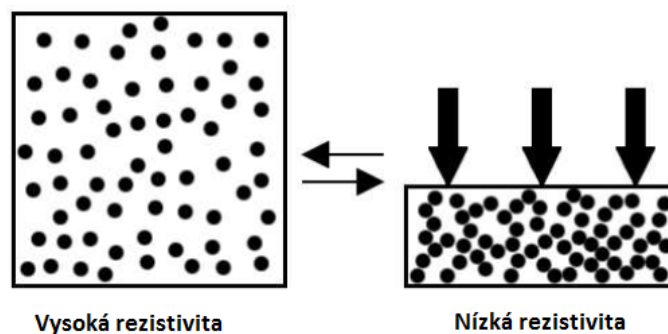
Obr. 5 Flexibilní senzorové pole

### 2.3.2 Elastorezistivita

Jedná se o senzory používající speciální odporové elastomery, které vykazují piezorezistivní chování tzv. elastorezistenci. Nejznámějším zástupcem této kategorie je vodivá guma. Vlastnost tohoto materiálů je obdobná jako u tenzometrů, pokud je materiál vystaven mechanickému namáhání, mění svůj elektrický odpor. Princip je ale poněkud odlišný. Vodivá guma jako zástupce elastomerů je kompozit saturovaný vodivými částicemi, obvykle grafitem nebo kovem (stříbro či zlato), rozprostřených uvnitř izolantu - elastomeru. Tyto nepatrné částice tvoří vodivé dráhy a umožňují průchod elektrickému proudu materiálem. [9][8]

Existuje více vysvětlení určujících vodivost elastorezistivního materiálu. Následují dvě nejvíce důležité teorie vysvětlující tento jev: Pokud je elastomer vystaven působící síle, vodivé částice se dostávají blíže do kontaktu. Záleží na tzv. perkolačním prahu, jde o mezní obsah vodivých částic, který pokud je překročen, začne se materiál chovat jako vodič. Působící síla na elastorezistivní materiál stlačuje částice k sobě, až začne vytvářet

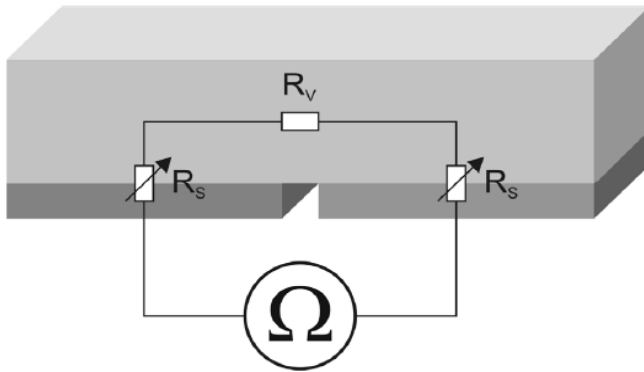
vodivé řetězce. Čím více vodivých částic je v kontaktu, tím více se vytvářejí vodivé dráhy pro průchod elektrického proudu a materiál se stává více vodivý a snižuje svůj elektrický odpor. Tento jev ovlivňuje velikost a množství saturovaných vodivých částic. Je velice složité určit závislost na perlokační prahu a tvaru částic. Rozdílné tvary vodivých částic mají totiž na perlokační práh velký vliv. Například částice kulatého tvaru potřebují vyšší el.napětí, oproti tomu podlouhlé částice vyžadují napětí menší k vytvoření vodivých drah. Záleží také na použitém elastomeru a jeho elastičnosti, která ovlivňuje citlivost piezorezistivního efektu. Princip perkolace vodivých částic znázorňuje Obr. 6. [12][13]



Obr. 6 Princip perkolace elastorezistivního materiálu

Druhé vysvětlení elastorezistivity pojednává o změně velikosti kontaktu mezi elastorezistivním materiálem a elektrodami, kde při zatížení se zvyšuje kontakt a elektrický odpor snižuje. V práci [12] zkoumající princip odporového taktilního snímače. Byl testován elastorezistivní materiál nalepený na snímací elektrody kvůli eliminaci kontaktního odporu a nenalepený. Měření přilepené oproti nenalepené vodivé gumě na elektrodách neukázalo téměř žádnou závislost mezi zatížením a elektrickým odporem. To vede k předpokladu, že kontaktní plocha se mění při působení zatížení, což je důležitým faktorem vysvětlujícím princip změny elektrického odporu elastorezistivních materiálů. [12]

Tento poznatek je poměrně zásadní pro tuto práci. První záměr byl nanést inkoust přímo na povrch elektrod, ovšem nakonec byla použita fólie, na kterou se inkoust aplikoval z důvodů popsaného v kapitole 4.3. Pokud by inkoust umožňoval použití přímo na elektrodách pravděpodobně by byl výrazně snížen rozdíl odporu při zatíženém a nezatíženém stavu. Z elektrického pohledu je výstupní odpor sensorického elementu složen ze tří samostatných rezistorů, viz. Obr. 7. Kde  $R_v$  je odpor elastorezistivního materiálu mezi elektrodami a  $R_s$  je povrchová (kontaktní) rezistivita snižující se při zatížení. Existenci kontaktního odporu mezi dvěma rovnými plochami bylo matematicky popsáno už v roce 1966 v práci [13]. Matematický model používá pro popis kontaktní plochy Gaussovo rozdělení drsnosti.



Obr. 7 Elektrický obvod elastorezistivního materiálu na radiálních elektrodách



Obr. 8 Umístění vodivé gumy na radiálních elektrodách

Detail kontaktních ploch a jejich povrchových změn při nezatíženém a zatíženém stavu zobrazuje Obr. 9. Z obrázku je patrné, že při zatížení se kontaktní plocha mezi elektrodou a materiálem nad ní zvětší, což má za následek pokles odporu. Umístění elastomerů na elektrody může být dvojího typu: [12]

#### **Axiální konstrukce:**

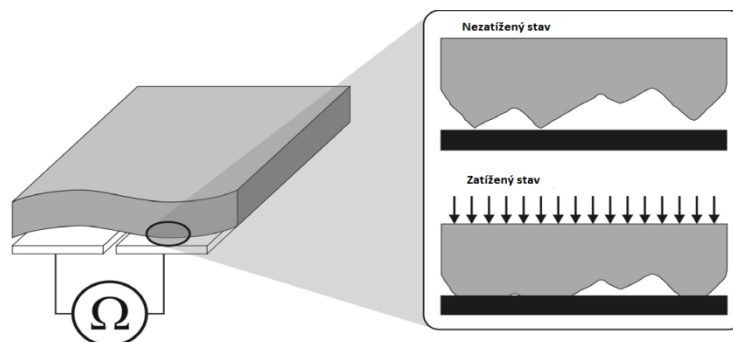
Výhoda použití axiálního umístění elektrod umožňuje jednoduchou výrobu taktilní matice. Zjednodušeně řečeno stačí horizontálně a vertikálně uspořádat vodiče a mezi ně vložit elastorezistivní materiál. Aplikovaná síla působí v ose toku elektrického proudu a je tedy používán celý objem čidla. Nevýhoda axiální konstrukce je namáhání vrchních elektrod při zatěžování a tím zkracování životnosti senzoru.

#### **Radiální konstrukce:**

Umístění elektrod vedle sebe řeší problém namáhání vrchních elektrod při působení síly. Další výhodou je snadná aplikace odporového materiálu na elektrody. Možnou nevýhodou je snížení citlivosti senzoru.

Citlivost snímače je závislá na velikosti, ale také použitím materiálu snímacích elektrod (měděné elektrody mají vyšší citlivost než např. cín) a druhu vodivé gumy a její drsnosti. Pokud je vodivá guma příliš hladká má tendenci se přichytávat na elektrodách, což způsobuje hysterezi. Velikost elektrod a tloušťka odporového materiálu je jedním s předmětů této práce a bude blíže popsána v naměřených výsledcích, viz.. kapitola. 6.5. [11][12]

Elastorezistivní chování mohou vykazovat i jiné materiály než pouze vodivá guma. Vodivý inkoust použitý v této práci mění svůj el.odpor také na principu elastorezistivního jevu, ovšem jako izolant mezi vodivými částicemi není elastomer (guma) ale kapalina a to převážně voda. Rozbor problematiky vodivých inkoustů je probrán v kapitole 3.1.



Obr. 7 Detail změny kontaktní plochy elastorezistivního elementu

### 2.3.2.1 Příklad konstrukce taktilního senzoru s použitím vodivého inkoustu

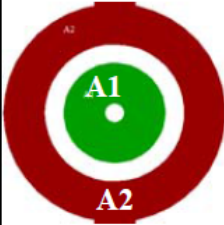
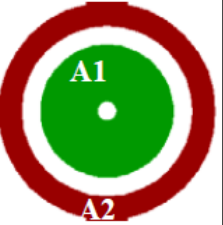
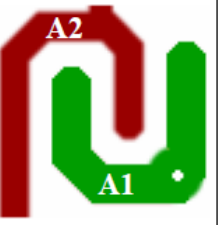
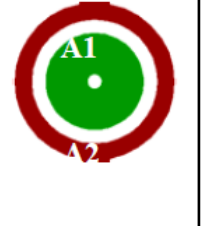
Výzkumných pracovišť zabývajících se vývojem taktilních senzorů na bázi vodivého inkoustu je velice málo. Práce [14] z roku 2010 představuje jednu z mála doposud zpracovaných studií zabývajících se touto problematikou.

Taktilní senzory v této práci jsou založeny na piezorezistivním materiálu tvořícím tenký film na plastové podložce, která spočívá na vršku radiálních elektrod. Jako piezorezistivní materiál je použit vodivý polymer, konkrétně vodivý inkoust na bázi vody. V práci byly použity dvě technologie výroby elektrod. Jedna používala flexibilní tištěný spoj o tloušťce 200 $\mu\text{m}$  známý jako Cuflex a druhá technologie byla založena na principu tisku plošných spojů. Vodivý inkoust tvořila polymerová disperze obsahující Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) jako vodivou surovinu. Výsledný vodivý inkoust byl namíchán přímo na samotném pracovišti. Podklad měl plochu 5 x 5 cm<sup>2</sup>, na který byl nanesen vodivý inkoust, byl z plastového materiálu PET (polyethyleneterephthalate). Na tuto fólii bylo aplikováno padesát mikrolitrů inkoustu. Fólie byla pomocí rotačního zařízení roztočena na 1500 ot/min po dobu jedné minuty, což umožnilo rozlití inkoustu a vytvořila se tak téměř homogenní 70 $\mu\text{m}$  tlustá vrstva na povrchu plastové fólie s vodivostí 0.082 S/cm<sup>2</sup>.

Elektrody použité v této práci měly různé geometrické uspořádání s různou plochou, viz. Obr. 10 a úkolem bylo zjistit, jak se bude vodivý inkoust chovat a na kterých elektrodách bude podávat nejlepší výsledky. Měření statické odezvy senzoru probíhalo s pneumatickým systémem od firmy Tekscan, který zajišťoval silové zatížení elektrod. Pneumatické měřicí zařízení má na svém konci membránu přitlačenou těsně na povrch elektrod a tlakovou komoru umožňující regulovat tlak uvnitř. Komora má připojený ma-

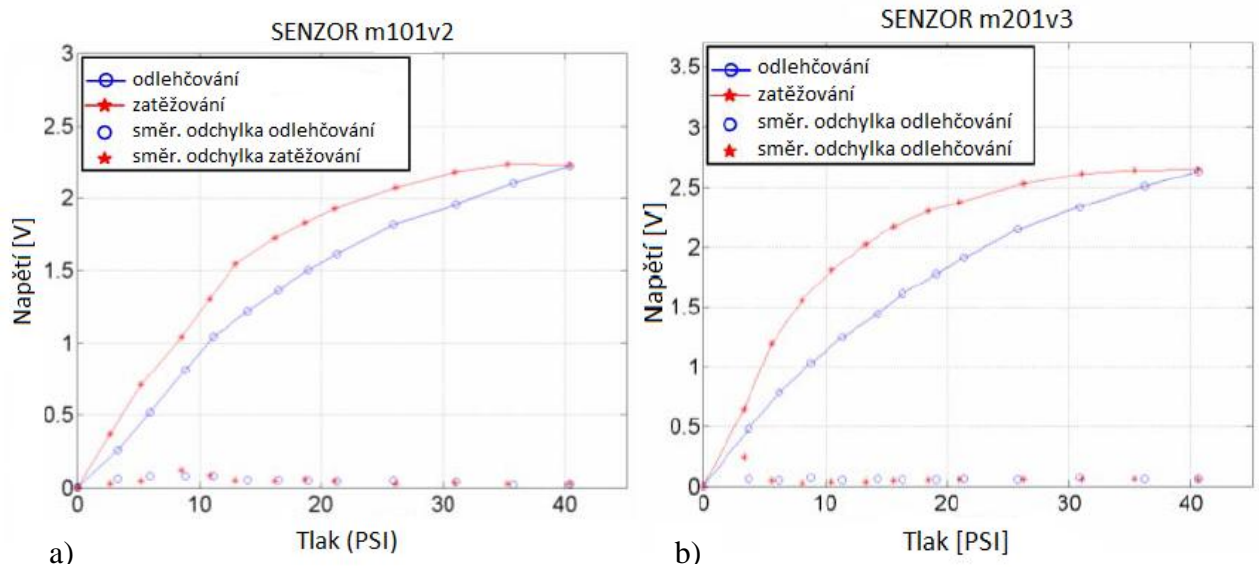
nometr sloužící k odečtu tlaku, protože tlak vyvinutý v komoře je téměř shodný s tlakem působící na elektrody skrz membránu. Měřeny byly i dynamické vlastnosti senzoru. K tomuto účelu byl měřicí systém doplněn elektromagneticky ovládaným ventilem schopným velice rychle otevřít ventil a tak snížit tlak vzduchu v komoře. Senzor byl konstruován jako taktilní pole a čtecí elektronika je shodná jako na, *Obr. 2 v kapitole 2.2.*

*Tab. 1 Rozdílné tvary a plochy jednotlivých elektrod*

<b>m101</b>	<b>m101v2</b>	<b>m201v3</b>	<b>m10075v2</b>
			
A1 = 0,86 mm <sup>2</sup> A2 = 2,58 mm <sup>2</sup>	A1 = 1,5 mm <sup>2</sup> A2 = 1,55 mm <sup>2</sup>	A1 = 1,53 mm <sup>2</sup> A2 = 1,53 mm <sup>2</sup>	A1 = 0,7 mm <sup>2</sup> A2 = 0,73 mm <sup>2</sup>

Zatěžování každé elektrody proběhlo pětkrát a to jak zvyšujícím se tlakem tak snižujícím, takže bylo možné zjistit hysterezi jednotlivých měřících bodů. Měření mělo za úkol zjistit nejen závislost velikosti ploch elektrod na odporu inkoustu, ale také jaký vliv bude mít jejich různá geometrie. Proto byla navržena elektroda pod označením m201v3, viz. *Tab. 1*, která nemá kruhový tvar jako ostatní ale tvoří jakýsi hřeben. Měření ukázalo, že odlišný tvar měl vliv na výslednou charakteristiku. Nevýrazně se změnila sensitivita senzoru, ale výraznější změnou byla přítomnost větší hystereze oproti kruhovým elektrodám, což je negativní parametr. Tuto skutečnost dokládá, *Graf. 5*, prezentující hřebenovou elektrodu m201v3 a kruhovou elektrodu m101v2, viz. *Tab. 1*, která se nejvíce přibližuje velikostí plochy jedné z elektrod použitých v této diplomové práci. Testována byla i druhá technologie výroby elektrod, pomocí síťotisku kde výsledné elektrody tvořily axiální konstrukci. Lepší výsledky ale vykazovala radiální konstrukce. Senzor má měřicí rozsah cca do 275 970 Pa, další parametry práce neudává. Práce [14] ukazuje metodiku, jak jednoduše lze nanášet inkoust a jakým způsobem zatěžovat elektrody k zjištění závislosti rezistivity na síle. Tlak byl téměř stejný při zatěžování tak při odlehčování elektrod, což je důležitý faktor pro přesně měření hystereze. Rozprostření inkoustu pomocí odstředí-

vé síly je jednoduché ovšem souvislá piezorezistivní vrstva má za následek ovlivňování okolních elektrod.



Graf. 5 Závislost napětí na tlaku dvou typů elektrod kde je a) kruhová elektroda b) hřebenová elektroda

## 2.4 Další technologie taktilních senzorů

### 2.4.1 Kapacitní senzory

Kapacitní taktilní senzory jsou tvořeny elektrickým kondenzátorem. Konstrukce je tvořena tak, aby při aplikaci síly na senzor došlo k ovlivnění kapacity vycházející ze známého vztahu pro deskový kondenzátor:

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (5)$$

Kde:  $C$  ( F ) - kapacita senzoru;  $\varepsilon_o$  (  $Fm^{-1}$  ) - permitivita vakua;  $\varepsilon_r$  ( - ) - relativní permitivita;  $S$  (  $m^2$  ) - plocha společných elektrod;  $d$  ( m ) - vzdálenost elektrod.

Obvyklá konstrukce senzorů je provedena tak, aby při zatížení se přibližovaly elektrody kondenzátoru a tím se měnila proměnná  $\Delta d$ . Jeden taktilní bod se nejčastěji skládá ze tří vrstev. Vrchní a spodní vrstvu tvoří elektrody kondenzátoru o určité ploše a materiálu. Mezi elektrody je vloženo dielektrikum, které může zároveň sloužit jako deformační člen a svým materiálem určuje tuhost a tedy citlivost snímače. Deformační člen musí vykazovat určité mechanické vlastnosti jako odolnost, stálou tuhost a pokud slouží zároveň, jako dielektrikum musí splňovat i elektrotechnické požadavky na materiál, který musí mít stálou permeabilitu a minimální svod, atd.



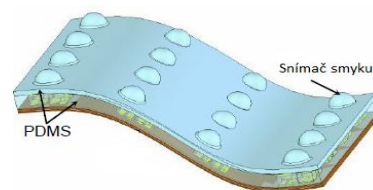
Měření změny kapacity je založeno na faktu, že protékající proud kondenzátorem je vyjádřen následujícím vztahem:

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (6)$$

Metody jak měřit velikost kapacity jsou například: měřením času nabíjení kondenzátoru, měřením frekvence rezonančního obvodu nebo měření útlumu dané frekvence. Prakticky se kapacitní senzory používají pro spojitě nebo nespojitě (dvoupolohové) měření. Taktilní kapacitní senzory sdílí jeden významný problém a to je vliv kovových objektů poblíž senzoru, které mají negativní dopad na přesnost změny kapacity. Tento problém se vyskytuje převážně u tzv. “makrosenzorů“. Eliminovat tento vliv lze vhodnou konstrukcí a rozložením obvodu, proto se používá především provedení tzv. “mikrosenzorů“, které mají vyhodnocovací elektroniku v těsné blízkosti čidla. [8]

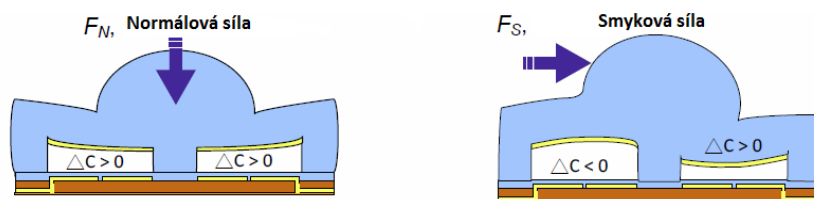
### 2.4.1.1 Příklad konstrukce kapacitního senzoru

Práce [15] představuje kapacitní taktilní pole, které umožňuje měřit normálové i smykové silové zatížení. Pole je realizováno na flexibilní tištěné desce FPCB (Flexible printed circuit board) která obsahuje polydimethylsiloxane (PDMS), tento materiál slouží jako deformační člen. Každý taktilní element obsahuje čtyři kapacitní buňky složené do



Obr. 8 Kapacitní taktilní pole

pole  $2 \times 2$  a každá buňka má dvě snímací elektrody se společnou plovoucí elektrodou. Snímací elektrody jsou implantovány na FPCB, kdežto plovoucí elektroda je vložena do struktury deformačního členu. Obr. 10 ukazuje část provedení taktilního pole, kde stojí za povšimnutí kulovitý profil sloužící pro lepší detekci a rozložení sil při smykovém zatížení. Profil v této práci nazývají snímač smyku. Při působení smykové síly je díky kulovitému profilu vždy více zatěžován pouze jeden pár elektrod oproti druhému páru a tento rozdíl je vyhodnocen jako smyková síla. Tento princip demonstruje Obr. 11. Maximální citlivost je 1,67% / mN. Minimální detekční síla je 26 mN.



Obr. 9 Ukázka reakce snímače při namáhání normálovou a smykovou silou

## 2.4.2 Piezoelektrické senzory

Piezoelektrické taktilní senzory využívají jako převodník síly na elektrický signál piezoelektrický jev. Jedná se o fyzikální jev vznikající při deformaci piezoelektrického krystalu. Deformace krystalu některých dielektrických látek má za následek dipólový elektrický moment objemu elementu. Polarizaci krystalu způsobí elektrické momenty všech objemových elementů. Elektrická polarizace je rovna číselně fiktivnímu vázanému náboji na jednotkové ploše povrchu, jenž je kolmý ke směru vektoru polarizace. Pokud dojde k přiložení elektrod na povrch krystalu začnou se do těchto elektrod indukovat volné náboje, které jsou měřitelné. Krystal křemene, který bude mít podélnou osu stejnou s mechanickou a příčnou s elektrickou tak působící síla  $F_x$  ve směru elektrické osy vyvolá na elektrodách náboj o velikosti dle následující rovnice:

$$Q = d \cdot F_x \quad (7)$$

*Kde:  $Q$  (C) - náboj na elektrodách výbrusu;  $d$  ( $CN^{-1}$ ) - piezoelektrická konstanta, pro  $SiO_2$  je  $d = 2,3 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$ ;  $F_x$  síla působící na výbrus krystalu (N).*

Pokud působí síla opačná  $F_y$  ve směru mechanické osy krystalu, tak pro vyvolaný elektrický náboj platí následující vztah:

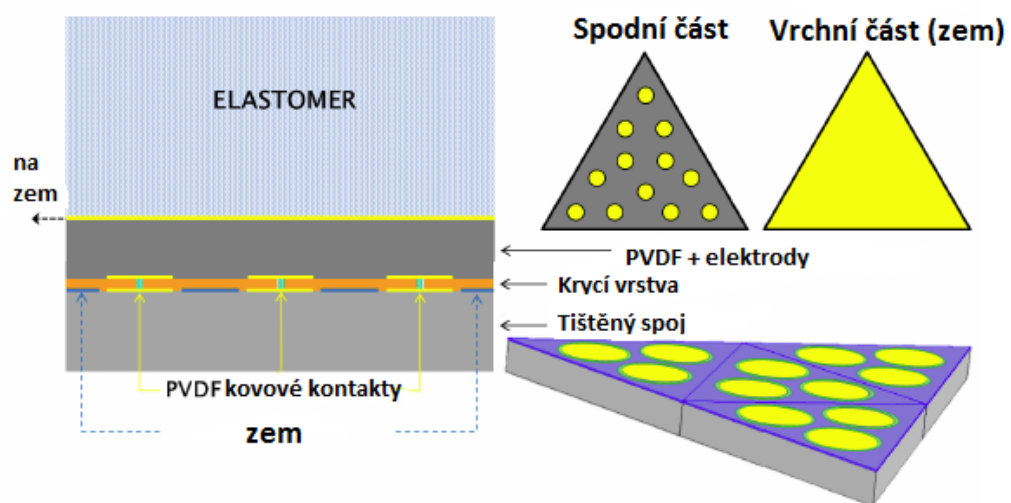
$$Q = d \cdot F_y \frac{b}{a} \quad (8)$$

Pokud působí síla  $F_y$  tak záleží oproti předchozímu případu na rozměrech výbrusu, což představují proměnné  $a$ ,  $b$  v rovnici (8). Piezoelektrický materiál dříve tvořil výbrus křemene, v současnosti se používá dalších materiálů, mající podobné vlastnosti: piezoelektrická keramika (titaničitan barnatý  $BaTiO_3$ , titaničitan olovnatý  $PbTiO_3$ , zirkonát olova  $PbZrO_3$  a niobáty) nebo polyvinylidenfluorid ( $PVDF_2$ ) vyznačující se mechanickou flexibilitou, rozměrovou stabilitou, nízkou hmotností a chemickou inertností. Konstrukčně jsou čidla velmi jednoduchá. Mezi výhody patří malý rozměr čidla, oproti tomu nevýhodou je velký vnitřní odpor vyžadující vstupní odpor vyhodnocovacích obvodů řádově  $10^{12} \Omega$ . Taktilní senzory využívající tento piezoelektrický jev jsou založeny na piezoelektrickém rezonátoru. Amplituda kmitů rezonátoru závisí nepřímo úměrně na velikosti  $R$ , což je odpor odpovídající ztrátám v piezokrystalu při mechanickém zatížení. Geometrie a uchycení piezorezonátoru, tlumící gummy atd., také velkou měrou ovlivňují amplitudu piezorezonátoru a tím i celkové vlastnosti senzoru. Snímání statických sil vyžaduje zapojení nábojového zesilovače, což přináší poměrně velké obtíže. Piezoelektrické taktilní senzory jsou vhodné pro měření dynamických sil či vibrací. [1][8]

### 2.4.2.1 Příklad konstrukce piezoelektrického senzoru

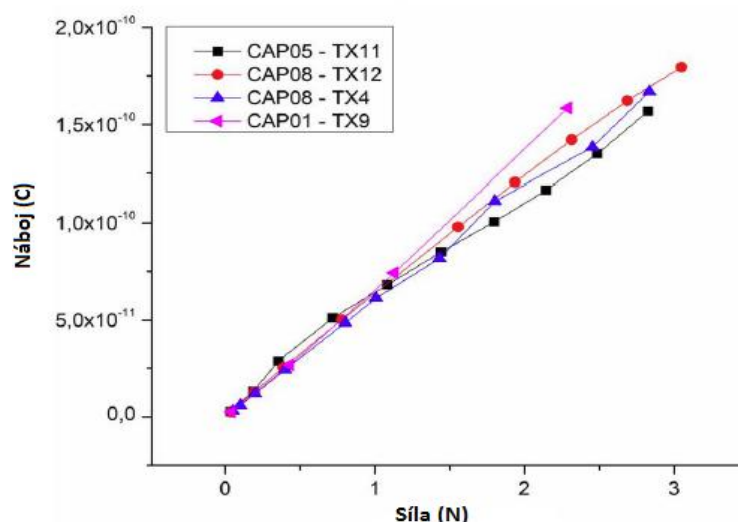
Příkladem senzoru pracující na tomto principu vyvinula Univezita v Italském Janově. Jako snímač síly byl použit 110  $\mu\text{m}$  tlustý piezoelektrický film polyvinylidenfluorid známý jako (PVDF) vyrobený společností Measurement Specialties integrovaný na flexibilní tištěný spoj. Materiál PVDF byl vybrán pro své vysoké elektromechanické vlastnosti nabízející frekvenční rozsah pásma až do 1 kHz pro danou aplikaci.

Zajímavě řešená je technologie výroby kovových elektrod na povrchu PVDF materiálu. Elektrody byly totiž vytištěny pomocí piezoelektrické tiskárny Fujifilm Dimatix 2800 (DMP2800). Tiskárna umožňuje tzv. “Drop On Demand“ což znamená, že tiskárna skrz tiskovou hlavu o průměru 21.5  $\mu\text{m}$  je schopna generovat samostatné kapky média o objemu 10 pl. Médium použitý na nástřik elektrod byl vodivý kovový inkoust (CCI-300) firmy Cabot, obsahující stříbrné nanočástice s nosné kapalině složené z etanolu a etylenglykolu. Před samotným tisknutím byl vodivý inkoust vystaven patnácti minutové ultrazvukové lázni za účelem zabránění aglomerace stříbrných nanočástic a poté byl přefiltrován v 0,2  $\mu\text{m}$  nylonovém filtru. Během samotného tisknutí byl PVDF film zahřátý na 60  $^{\circ}\text{C}$  kvůli rychlejšímu odpařování rozpouštědla. Takto byly vytisknuty dva různé vzory. Na jedné straně PVDF substrátu byla vytištěna homogenní vodivá plocha představující elektrickou zem. Strana druhá byla potištěna dvanácti kruhy, každý o průměru 3 mm. Celkově byla plocha senzoru vytvarována do trojúhelníku, viz. Obr. 12. Obrázek rovněž ukazuje kompletní senzor a jeho průřez, kde je patrný elastomer na povrchu zajišťující krytí. Tištěný spoj byl na PVDF film přilepen vodivým epoxidovým lepidlem (CW2400). Jednotlivé trojúhelníkové moduly jsou vyrobeny tak, že umožňují vzájemné propojení k vytvoření libovolně velkého pole podle potřeby aplikace. [17]



Obr. 10 Konstrukce modulu piezoelektrického taktálního pole

Experimentální měřicí sestava obsahovala vibrační zařízení, trojúhelníkový taktilní senzor a snímač síly, na který byl nainstalován  $4 \times 4$  mm čtvercový profil zatěžující jeden taktilní kruhový bod. Stimulační frekvence vibrací byla stanovena na 6 Hz a čtyři taktilní body testovány a zprůměrovány. Následující *Graf. 6*, ukazuje výsledek z měření. Vertikální osa reprezentuje průměry špiček náboje, horizontální osa zatěžující sílu. Lze konstatovat, že výsledky jsou velice uspokojivé, charakteristika má lineární charakter. [17]



*Graf. 6 Náboje generované z jednotlivých PVDF taktilních bodů (TX 11,12,4,9) a jejich reakce na sílu s frekvencí ( $f = 6$  Hz)*

### 2.4.3 Optické senzory

Senzory tvořené optickým vláknem, pracují na principu modulace světla procházejícího tímto vláknem při vnějším zatížení. Zdroj světla optického senzoru je laser, laserová dioda nebo LED. U světla procházejícího světlovodem je možné měnit amplitudu, fázi, polarizaci nebo spektrální vlastnosti. Změna která nastane je analyzována detektorem. Výhoda optovláknových senzorů je jejich odolnost vůči vnějšímu elektromagnetickému poli. Navíc umožňují stejně jako v telekomunikacích přenášet informace mezi objekty s rozdílnými potenciály a na velké vzdálenosti ve velkém kmitočtovém pásmu. Taktilní čidla využívající optické vlákna se nejvíce využívá změna amplitudy procházejícího světla, která je ovlivnitelná těmito způsoby:

- změnou okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí – např. mikroohyby
- změnou vzájemné optické vazby
- změnou tlumení
- změnou odrazu a přechodu světla

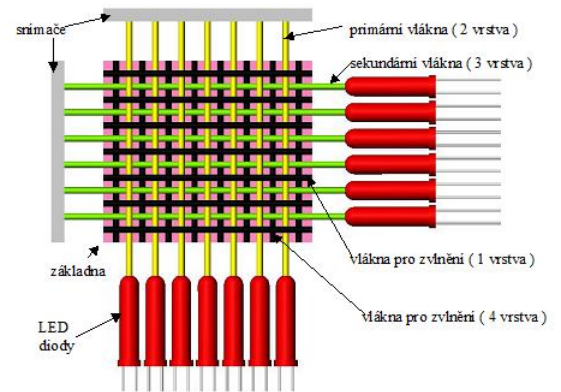
### 2.4.3.1 Senzory s mikroohybem optického vlákna

Senzory tohoto typu využívají měření útlumu světla, ke kterému dochází pokud je optické vlákno vystaveno vnějšímu silovému působení způsobující jeho mikroohyb. Optické vlákno je složeno z jádra a pláště. Jádro i plášť jsou vyrobeny ze skleněného materiálu, ale jádro má vyšší index lomu než plášť. Světelný paprsek se šíří jádrem díky odrazu od rozhraní s pláštěm. Paprsek prochází jádrem bez útlumu, pokud splňuje tzv. totální odraz. Ten vzniká není-li překročen kritický úhel  $\alpha$  dopadajícího paprsku na rozhraní jádra a pláště. Pokud nastává totální odraz, světelný paprsek se odráží od rozhraní a prochází jádrem téměř bez útlumu. Překročí-li paprsek kritický úhel  $\alpha$  dojde k porušení podmínky o totálním odrazu a část světelné energie projde skrz rozhraní do pláště a dochází k útlumu měřitelnému na výstupu detektorem. Úplný vnitřní odraz je dán podmínkou:

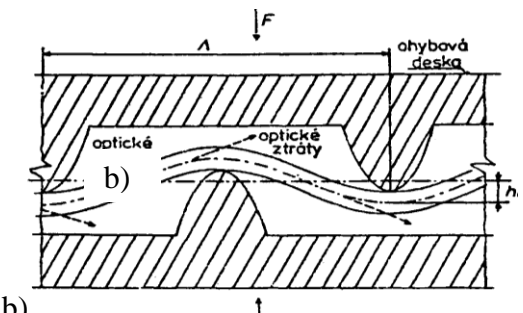
$$\Theta_c \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

Kde:  $\theta_c$  - úhel dopadu;  $n_1$  - index lomu jádra;  $n_2$  - index lomu pláště

Změnou zakřivení optického vlákna či změnou poměrů indexů lomu lze tuto podmínku porušit. Taktilní senzor je tedy zkonstruován tak, aby při zatížení došlo k ohybu optického vlákna pod kritický poloměr, a nastává porušení podmínky pro kritický úhel a světlo začne částečně pohlcovat plášť. Tyto tzv. vidy se mohou nadále šířit v plášti optického vlákna jako plášťové vidy nebo proniknout do okolního prostředí. Ohybové ztráty lze rozdělit na mikroohybové a makroohybové. Pokud je rádius zakřivení vlákna větší než průměr jádra vlákna nazývá se makroohyb. Mikroohyb nastává, je-li rádius zakřivení vlákna menší než průměr jádra. Ohybové senzory používají často multimódová vlákna, která vykazují větší ztráty při ohybu a zvyšují tedy citlivost senzoru. Multimódová vlákna mají větší průměr jádra, dovolují tak ohyb vlákna bezpečně pod mezí pevnosti materiálu vlákna. [18]



a)

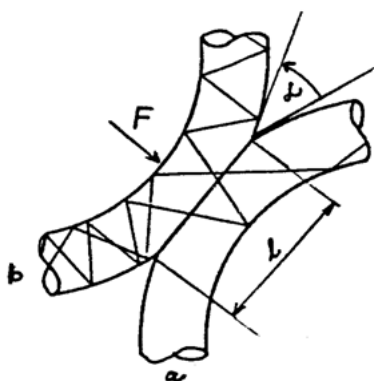


b)

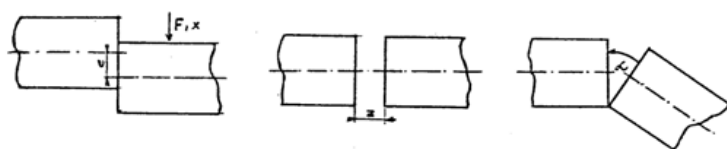
Obr. 11 a) maticový vrstevný mikroohybový snímač b) princip mikroohybovů.

### 2.4.3.2 Senzory se změnou vzájemné optické vazby

Senzor tohoto typu využívá dotyku dvou optických vláken, kde v místě dotyku je odstraněný plášť, do kontaktu tedy přicházejí samotná jádra vláken. Konstrukce zahrnující vhodnou délku stykové plochy vláken a úhlu  $\alpha$  bude mít za následek přenos světelné energie z jednoho vlákna do druhého, která bude úměrná působící síle. Zdroj světla je připojen k prvnímu optickému vláknu a detektor je zapojen na vlákno druhé. Princip přenosu světla z jednoho optického vlákna do druhého znázorňuje, *Obr. 14*. Existují ještě jiné způsoby změny vzájemné vazby, např. vzájemný posun vláken různými směry, viz. *Obr. 15*. [1]



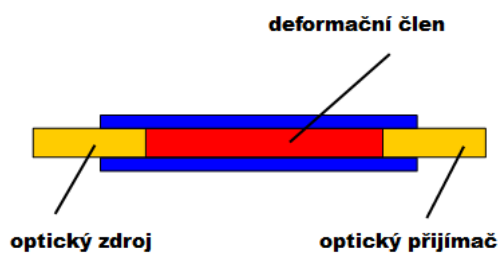
*Obr. 12 Snímač se vzájemnou optickou vazbou*



*Obr. 13 Snímač se změnou vzájemné optické vazby*

### 2.4.3.3 Senzory se změnou tlumení

Optické vlákno je rozdělené na dvě části, mezi které je vložen průsvitný člen měnící své optické vlastnosti vlivem působící síly. Působící síle není už vystaveno samotné optické vlákno, jako tomu bylo v předešlých řešeních, ale slouží pouze jako vodič světelné energie. Typ takovýchto senzorů se převážně využívá pro měření teploty, kdy deformační člen vložený mezi optická vlákna mění své vlastnosti vlivem změny teploty. Pro taktilní čidla je použit takový materiál schopný tlumit světelný paprsek vlivem působící síly, viz. *Obr. 16*.



*Obr. 14 Senzor s deformačním členem měnící světelné vlastnosti podle velikosti zatížení*

### 2.4.3.4 Sensory se změnou přechodu a odrazu světla

Senzor se skládá z optického vysílače a přijímače světla a reflexní plochy. Tato plocha je umístěna na pružném členu, který vlivem působení síly mění své postavení a vychyluje světelný paprsek, viz. Obr. 17. Ovlivňuje intenzitu dopadajícího světla zpět do optického přijímače. Vlastnosti senzoru je tedy dány mechanickými vlastnostmi – především tuhosti pružného členu a formou reflexní plochy.



Obr. 15 Vlevo optický senzor s pružným členem, vpravo senzor s průsvitným elastomerem

Na Obr. 17, je příklad i jiného řešení a to s průsvitným elastomerem, který chrání optická vlákna. Pokud by elastomer měnil i své optické vlastnosti, senzor by se mohl zařadit do skupiny se změnou tlumení.

## 2.5 Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých technologií

Tab. 2 Výhody a nevýhody jednotlivých typů taktálních senzorů

Typ	Výhody	Nevýhody
Piezorezistivní	Nízké výrobní náklady Dobrá citlivost Nízký šum Jednoduchá vyhodnocovací elektronika	Tuhé a křehké Nelineární odezva Hystereze Teplotně závislé Signálový drift
Kapacitní	Dobrá citlivost Nízké výrobní náklady	Přeslechy Hystereze Složitější vyhodnocovací elektronika
Optické	Imunní vůči elektromagnetickému rušení Flexibilní Dobrá citlivost Rychlé	Velikost Ztráty vlivem mikroohybu - u některých funkčním principem ale mimo místo měření síly škodlivé Spotřeba Složitá výpočty
Ultrazvukové	Rychlá dynamická odezva Dobré silové rozlišení	Omezené použití při nízkých frekvencích Složitá vyhodnocovací elektronika Teplotně závislé
Magnetické	Vysoká citlivost Dobry dynamický rozsah Žádná mechanická hystereze Robustnost	Citlivost na magnetické rušení Složitá výpočty Velikost Spotřeba
Piezoelektrické	Dobrá dynamická odezva Velká šířka pásma	Teplotní závislost Citlivé elektrické připojení

Výše uvedená tabulka vychází z práce [19]. Shrnutí v tabulce zahrnuje magnetické a ultrazvukové taktilní senzory, které nebyly v předchozích kapitolách popsány. Nejsou výrazně používány pro taktilní senzory a rozsah této práce by na popis všech technologií nestačil a není to ani její účel. Principiálně a také konstrukčně jsou nejjednodušší taktilní senzory využívající elastorezistivní materiály ovšem za cenu hystereze a teplotní závislosti, kterou lze ale do určité míry kompenzovat.

### 3 PROBLEMATIKA VODIVÉHO INKOSTU

Inkoustem se označuje taková látka, která obsahuje pigment nerozpustný ve vodě či barvivo rozpustné ve vodě určená k vytvoření obrazové předlohy, především písma. Inkousty lze obecně rozdělit do čtyř skupin podle toho, v jaké jsou fyzikální formě: [21]

- Vodní
- Jiná kapalina
- Pasta
- Prášek

Kapalina zvaná vodivý inkoust má takové vlastnosti, že po nanesení (obvykle vytisknutí) na vhodný povrch má po vyschnutí určitou vodivost. Vodivé inkousty se skládají z částecek pojiva a vodivých částecek pro vedení elektrického proudu. Jako vodivé částice se nejčastěji používají částičky stříbra, zlata, uhlíku nebo mědi. Pojivem bývá termoplast či termoset. Příchod nanotechnologií znamenal velikou změnu i v inkoustech. Inkousty saturované místo barviva o vodivé nanočástice začaly mít vysoce vodivý charakter. Takový inkoust mající ty správné vlastnosti může nahradit vodivé cesty v elektronice, které se složitě a nákladně vyrábějí z mědi. Navíc vodivý inkoust je stále inkoust, tedy jedná se o kapalinu, která může být vtištěna pomocí některých známých tiskových technologií, což otevírá široké pole použití v různorodých aplikacích včetně taktilních sensorů. Poslední desetiletí je viditelný znatelný nárůst výzkumných aktivit zabývajících se tiskem vodivého inkoustu na různé substráty. Primární použití mají vodivé inkousty v tisknutelné elektronice. Výroba obvodů pomocí inkoustového tisku probíhá za nízké teploty a tak umožňuje snadnou aplikaci na flexibilní a lehké substráty jako jsou PET fólie, papír atd. Výroba zařízení s vodivým inkoustem snižuje odpad při výrobním procesu a spotřebovává méně energie. Vodivé inkousty se rozdělují na několik druhů podle charakteru vodivých částic.

[20] [22]



### 3.1 Vlastnosti vodivého inkoustu

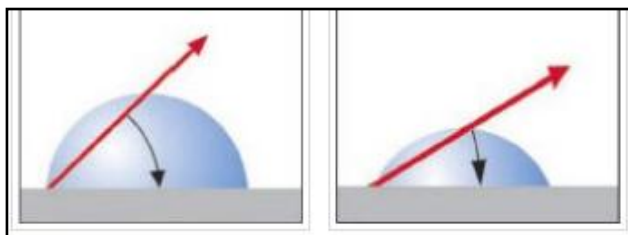
Použití vodivého inkoustu je možné v mnoha odvětvích a aplikacích. Podle technologie nanášení a druhu aplikace musí inkoust jakožto kapalina splňovat určité vlastnosti. Mezi základní vlastnosti patří viskozita, rozpustnost, slučitelnost složek, smáčivost se substrátem a další. Dále by měl inkoust vykazovat rychlé schnutí, oděruvzdornost, schopnost procházet tryskou aniž by ji ucpával a měl by umožňovat rychlé vyčištění komponent nanášecího stroje s minimálním úsilím. Hlavním problémem s nanášením vodivých inkoustů je přilnavost na substrát, zejména pokud se jedná o sklo. To jsou požadavky na vlastnosti, pokud se inkoust hodnotí při výběru tiskové technologie.

Vodivý inkoust má své funkční vlastnosti, které se měří a hodnotí s ohledem na výběr aplikace. Mezi nejdůležitější vlastnost patří elektrická vodivost. Pokud vodivý inkoust má nahradit běžný vodič je vyžadována vodivost co nejvyšší ale v oblasti použití taktilních senzorů toto tvrzení neplatí. Pro taktilní senzor hledáme inkoust, který nebude mít vodivost příliš velkou, ale bude ji schopen měnit při působení síly. Vodivost je tedy jeden z primárních parametrů při výběru inkoustu ovlivňující charakter senzoru.

Další kapitoly stručně popisují některé z nejdůležitějších parametrů, které je nutné zohlednit při výběru vodivého inkoustu a jeho nanášení na určitý substrát. [20]

#### 3.1.1 Povrchové napětí

Povrchové napětí je síla působící na povrch kapaliny, která má tendenci minimalizovat svoji plochu a dosáhnout stavu s nejmenší energií. Povrchové napětí ovlivňuje tvar, do jakého se dostane kapalina na určitém povrchu, pokud bude povrchové napětí vysoké tím více bude kapalina “kulatější”. Povrchové napětí vody je  $7,5 \times 10^{-4}$  N. Nízké povrchové napětí kapaliny má za následek její rozlévání po povrchu. Tento jev umožňuje zjistit zda inkoust zůstane na místě kam byl nanesen či nikoliv a jak velkou plochu bude zabírat po zaschnutí. Smáčivost je často používaný termín a udává míru přilnutí kapaliny na daný povrch a přímo závisí na povrchovém napětí. [20]



Obr. 16 vlevo - Špatná povrchová smáčivost;  
vpravo - Dobrá povrchová smáčivost

### 3.1.2 Viskozita

Fyzikální veličina udávající míru odporu tekutiny k pohybu (tečení). Viskozita charakterizuje vnitřní tření kapaliny závisující na přitažlivých silách mezi částicemi. Čím větší viskozita tím více kapalina klade odpor k pohybu. Kapaliny s nízkou viskozitou mají schopnost se lépe rozlévat a proudit. Ideální kapalina nemá vnitřní smykové – tečné napětí a tedy má nulovou viskozitu. Z praktického hlediska byla zavedena tzv. kinematická viskozita definovaná vztahem:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (10)$$

Kde:  $\eta$  = dynamická viskozita (Pa.s);  $\rho$  = hustota (kg/m<sup>3</sup>)

Kinematická viskozita vody má při 18 °C 1,06.10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s. Viskozita se měří pomocí viskozimetrů a pro většinu známých tekutin lze velikost viskozity v závislosti na tlaku a teplotě zjistit v odborné literatuře. [23]

### 3.1.3 Hustota

Hustota je definována jako hmotnost na jednotku objemu, v tomto případě objemu vodivého inkoustu, který má hustotu v rozsahu 0,8 ~ 2 g/ml. Hustota neboli měrná hmotnost je dána vztahem.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (11)$$

Kde:  $m$  = hmotnost tělesa (kg);  $V$  = objem tělesa (m<sup>3</sup>)

### 3.1.4 Suspenze částic

Většina dnes komerčně používaných vodivých inkoustů, past a prášků obsahujících kovové částice jako hlavní vodivou složku. I velmi malé částice v jednotkách mikrometrů mohou ucpávat trysky tiskových zařízení. Ideální je použití vodivých inkoustů s nanočásticemi.

### 3.1.5 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost jinak také konduktance vyjadřuje schopnost vodiče vést elektrický proud. Elektrická vodivost má značku G a její jednotkou je S (siemens). Vodivost je převrácenou hodnotou odporu R. Vodivost vytištěné struktury vodivým inkoustem je ovlivněna chemickými a fyzikálními vlastnostmi jako: geometrie struktury (tloušťka, morfologie povrchu, atd.) a mezifázové vlastnosti na rozhraní různých materiálů.

### **3.1.6 Odolnost proti opotřebení**

Strukturální integrita povrchu vodivého inkoustu během doby životnosti musí být co nejvíce odolná proti působení vnějších vlivů. Kvantifikace odolnosti se obvykle provádí mechanickým broušením povrchu s porovnáním jiné referenční plochy. V případě vytištěných vodivých cest v elektronice není požadavek na odolnost inkoustu tak vysoký neboť je zařízení většinou zakrytováno. Pro účely taktilních senzorů je ale velmi důležité aby se vodivý inkoust vlivem působení sil nepoškozoval, neboť je zatěžujícím silám vystavován. Inkoust tedy musí splňovat, jak požadavky s ohledem na použitou technologii kterou bude nanášen, musí mít také vhodné elektrické vlastnosti a zároveň musí být velice odolný a poddajný aby byl schopen použití v taktilním snímači.

### **3.2 Inkoust s vodivými nanočásticemi**

Nanočásticemi označujeme takové částice, které mají rozměry od 1 do 100 nm v průměru. Jedná se o ultra jemné částice nemožné pozorovat pouhým okem. V inkoustu jsou jednotlivé “částice” často vidět, ale ve skutečnosti se jedná o koagulaci nanočástic.

Kovové nanočástice mohou být vyrobeny chemickou syntézou nebo fyzikálními procesy. Fyzikální metodou se rozumí například plynové odpařování v angličtině často používaná zkratka GEM (gas evaporation method), což je proces odpařování oxidů kovů a jejich kondenzace v atmosféře inertního plynu. Metoda je analogická k odpařování vody z horkého povrchu a její kondenzace na povrchu chladném, na kterém voda vytváří drobné kapky. Částice vyrobené touto metodou mají dobrou krystalitu. Velikost částic může být řízena nastavením teploty zdroje odpařování nebo tlaku inertního plynu. Další metodou jak vyrobit nanočástice je pulsním elektrickým obloukovým výbojem bez vzniku aglomerátů či nečistot. [20]

Dobrym stabilizátorem nanočástic, konkrétně stříbrných, je karboxymetyl celuloza. Pokud se skombinuje s vhodným smáčedlem slouží karboxymethyl celuloza zároveň jako pojivo a zaručuje dobrou přilnavost k různorodým substrátům např. papír, sklo, fólie. [22]

### **3.3 Metody nanášení vrstev inkoustu**

Způsob jak přesně a opakovatelně nanést vodivý inkoust tak aby neucpával nanášečí zařízení zahrnuje znát mnoho faktorů ovlivňující zvolenou metodu. V současnosti je inkoustový tisk už dobře známá a zvládnutá technologie, tudíž se nabízí jako ideální pro nanášení i inkoustů vodivých. Umožňuje totiž precizní kontrolu dávkování nad vytištěnou

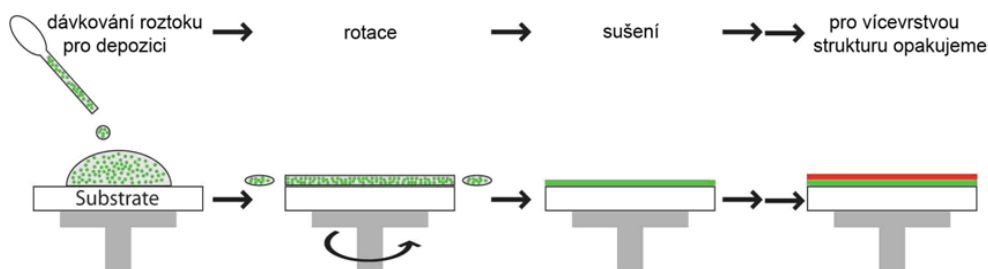
strukturou. Použití vodivého inkoustu v oblasti taktilních senzorů ještě není řádně zmapováno a zvolení té vhodné metody nanášení je předmětem výzkumů a bude se lišit podle konstrukce taktilního senzoru.

### 3.3.1 Odstředivé lítí

Dostupná a levná metoda používající odstředivou sílu pro výrobu homogenních vrstev. Kapalina je v nadměrném množství umístěna na substrát, který je roztočen určitou rychlostí (záleží na vlastnostech kapaliny) a vlivem působení odstředivé síly při otáčení je kapalina rovnoměrně rozprostřena na substrátu, viz. *Obr 19*. Tloušťka výsledné vrstvy je ovlivněna rychlostí a dobou otáčení, koncentrací a množstvím nanesené kapaliny. Kapaliny mající vysokou viskozitu vyžadují její větší množství a pomalejší otáčky cca 500 ot/min. Tato jednoduchá metoda vykazuje poměrně dobré výsledky k dosažení tenkých vrstev.

Nevýhoda odstředivého lítí je v nemožnosti rozprostřít materiál pouze na jedno určité místo substrátu. Problém také představují poměrně vysoké otáčky, které jsou zhruba 3000 ot/min vyžadující přesné upnutí do těžiště použitého substrátu. Další problémy jsou způsobeny poruchou depozice. Výčet hlavních problémů způsobou touto poruchou je následující: [25][26]

- Spirála – kapalina zaschne na povrchu substrátu připomínající spirálu, defekt způsobený vysokou akcelerací, uložením roztoku mimo střed, krátký čas otáčení či vysoká intenzita sušení
- Vzduchové bubliny – mohou vznikat, je-li depozit špatně dávkován v průběhu točení substrátu
- Pruhy a komety – způsobuje příliš vysoká rychlost a zrychlení nebo roztok uložený mimo střed
- Nevyplněná místa na okrajích – způsobuje nedostatečné množství kapaliny
- Díry – vadu způsobuje špatné očištění substrátu od všech nečistot



*Obr. 17 Proces odstředivého lítí*

### 3.3.2 Ponor do kapaliny

Metoda spočívající v nanášení kapaliny pomocí řízeného ponořování a vytahování substrátu do kapaliny (vodivého inkoustu). Ponořením substrátu do inkoustu ulpí část inkoustu na povrchu a vzniká tak na něm tenká vrstva. Finální podobu této vrstvy ovlivňuje řada faktorů jako je rychlost ponoru a vymoření, drsnost substrátu, doba ponoru, počet cyklů, koncentrace, viskozita, teplota kapaliny, vlhkost prostředí, rychlost schnutí kapaliny. Tloušťku výsledného filmu na povrchu substrátu nejvíce ovlivňuje počet opakování ponořování.

Výhodou metody ponoru je její dostupnost a jednoduchost, postačí zajistit řízené ponořování substrátu do kapaliny. Nevýhodou je pokrytí celého povrchu substrátu danou kapalinou, tudíž pro použití v oblasti taktálních senzorů činí tuto metodu nevhodnou. Navíc je za potřeby poměrně velké množství kapaliny, což při současných cenách vodivých inkoustů je také značná nevýhoda. [28]

### 3.3.3 Inkoustový tisk

Představuje nejvyspělejší technologii nanášení inkoustu na tiskový substrát. Základem je přenos obrazu v digitální podobě do tiskového zařízení. Inkoust je vystřikován v podobě kapiček požadovaných rozměrů z tiskové hlavy na substrát, na kterém vysychá a vytváří tak výslednou strukturu. Tisková hlava obsahuje trysku či několik trysek, které jsou schopny vytvářet kapky inkoustu. [30]

Výhody technologie:

- bezkontaktní depoziční technologie, schopna deponovat i kovové inkousty
- lze využít i domácí inkoustovou tiskárnu (podloženo experimenty viz [29])
- nevyžaduje čisté prostory

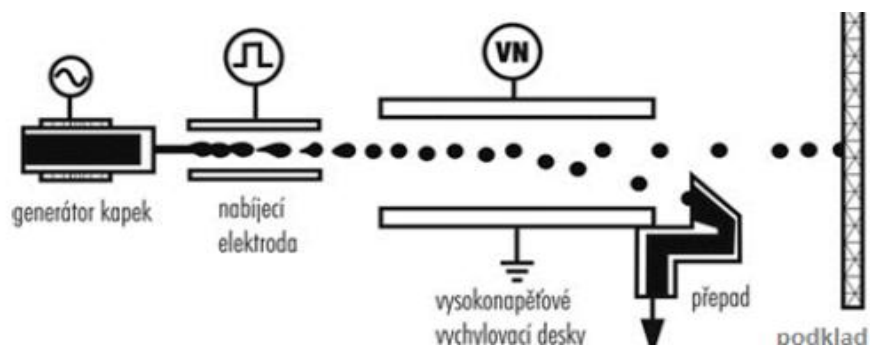
Nevýhody technologie:

- před použitím je nutné zjistit vhodnost inkoustu – může být složité
- rozpíjení inkoustu

### Kontinuální tisk

Zásadní princip této metody je tzv. Plateau-Rayleighova nestabilita, která říká, že volně padající proud kapaliny vytékající z kapiláry se vlivem smykového napětí mezi kapalinou, okolním vzduchem a nerovnostem v kapiláře může rozkmitat. Proud vykazuje nestabilitu a vzniká nový stabilní proud ve formě kapiček vlivem povrchového napětí kapaliny. [28]

Současné tiskárny jsou schopny generovat přesně definované velikosti kapek a jejich počet. Princip kontinuálního inkoustového tisku znázorňuje, *Obr. 20*. Inkoust protékající tryskou je stlačován vlivem modulovaného integrovaného piezopohonu. Vystřikovaný proud kapiček je vychylován působením řízeného elektrostatičkého pole deflekčních elektrod. Systém sbírá vychýlené kapičky a po filtraci je umožňuje vracet zpět do zásobníku, což šetří tiskový materiál. [28]

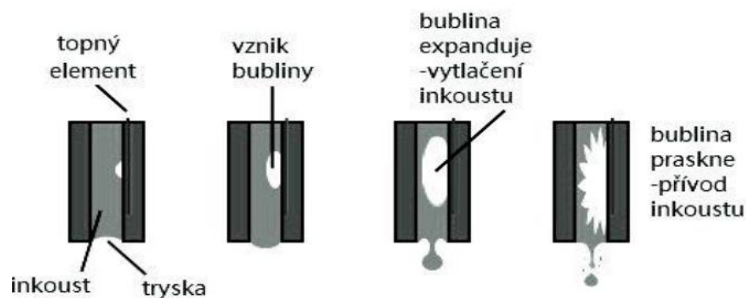


*Obr. 18 Princip kontinuálního tisku*

### **Tisk na požadavek tzv. “Drop On Demand”**

Metoda kde dopadající kapky na substrát nejsou tvořeny kontinuálním proudem inkoustových kapek, ale kapky jsou generovány na požadavek a přímo tvoří tištěnou strukturu. Nevznikají tak kapky, které musejí být sbírány, jako tomu je u kontinuálního tisku. Existují dvě technologie tohoto tisku: [28][30]

- *Piezelektrický inkoustový tisk* – piezokrystal umístěný v tiskové komoře umožňuje její deformaci. Piezokrystal se po přivedení náboje deformuje směrem k trysce a tak zmenší objem komory a vytlačí inkoust skrz trysku ven na substrát. Po změně polarity se piezokrystal vrátí do původní polohy, což vyvolá nasátí nového množství inkoustu vlivem opětovného zvětšení komory. Výhoda piezelektrického tisku je možnost využít širší spektrum inkoustu (není nutnost používat těkavé rozpouštědlo). Umožňuje tisk velmi malých konzistentních bodů (objem kapky cca 3 – 5 pl).
- *Termální inkoustový tisk* – tiskárna obsahuje malá odporová topná tělíska. Vytvořeným teplem je zahříván inkoust do bodu varu, při kterém v něm vznikají bubliny. Bublina při svém zvětšení vytlačí inkoust ven skrz trysku na substrát a praskne při čemž vytvoří vakuum. Vzniklým podtlakem je nasáto do komory nové množství inkoustu, který topné tělísko zchladí a proces může cyklicky pokračovat.



Obr. 19 Princip termálního inkoustového tisku

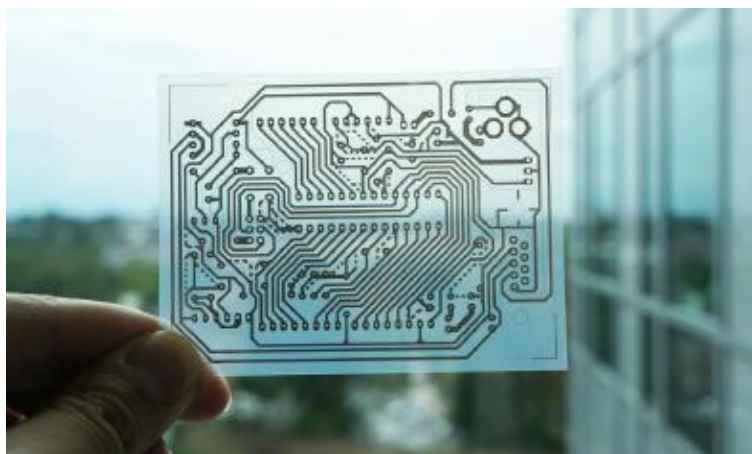
### 3.4 Příklady použití vodivého inkoustu

Studie [29] je věnována rychlému a levnému vytváření elektrických obvodů pomocí domácí inkoustové tiskárny a vodivého inkoustu umožňující výrobu prototypů tištěných obvodů. Metoda představuje alternativu ke konvenčnímu způsobu výroby plošných spojů. Nejdříve musel být nalezen optimální inkoust splňující takové parametry, aby mohl být snadno tisknutelný z inkoustové tiskárny. Jako vhodné disperzní médium se po provedení několika experimentech ukázal inkoust s nanočásticemi stříbra od společnosti Mitsubishi Paper Mill s označením NBSIJ-MU01. Testované inkoustové tiskárny byly značky Brother, protože jejich trysky v tiskové hlavě mají schopnost vytlačit větší objemy kapek než konkurence, což umožňuje depozici většího množství inkoustu na substrát. Tiskárna použitá v této práci je model Brother DCP –J140w používající piezoelektrické trysky a byla vybrána díky své nízké ceně. Stříbrný inkoust byl pomocí injekční stříkačky naplněn do nové prázdně cartridge umožňující plnění. Substráty na kterých byl testován vodivý tisk: křídový papír, fotopapír, transparentní PET fólie, magnetické listy.

Nejlepší vodivost výsledného vodivého tisku byla dosažena při nastavení tisku:

- Typ media: foto papír
- Kvalita tisku: nejlepší
- Barevný mód: živý
- Zvýšená barevnost: zapnuto
- Barevná hustota: +2

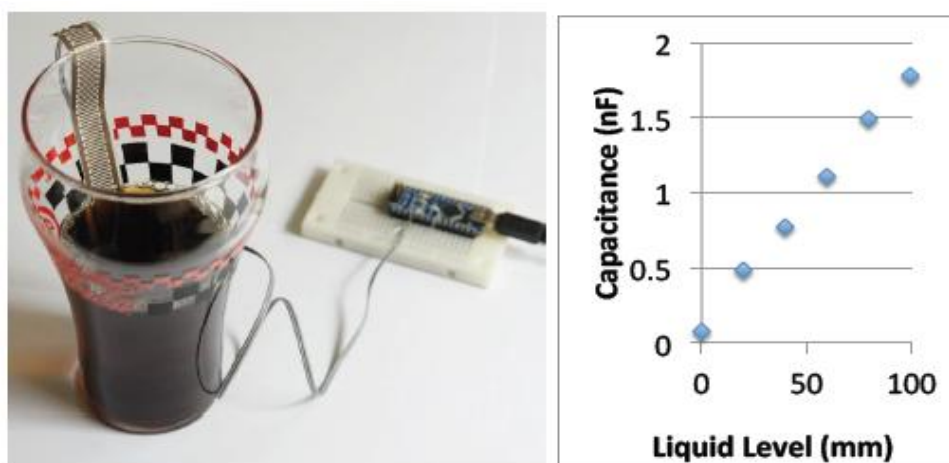
Snaha je dosáhnout co největšího depositu na povrch, protože dobrá vodivost se odvíjí od toho, kolik kapek inkoustu se spojí dohromady do kontinuální cesty. Pro tvorbu předlohy je možné použít jakýkoli vektorový kreslicí software s nastavením tisku pouze v černé. Následující Obr. 22, ukazuje vytištěný obvod Arduina z Gerber formátu na průhlednou flexibilní fólii.



Obr. 20 Jednostranný obvod Arduina vytištěný na transparentní fólii

Připojení elektronických součástek na takto vytištěný plošný spoj bylo realizováno pomocí elektricky vodivé pásky firmy 3M model 9703, které se osvědčila pro montáž jako nejlepší, kvůli své anizotropní elektrické vodivosti. Páska je saturována vodivými částicemi umožňující propojení s vodivým inkoustem a součástkou skrz tloušťku pásky.

Další velice zajímavou aplikací vyrobenou v této práci je kapacitní snímač měřící výšku hladiny. Jednoduše byla na úzkou plastovou pásku vytištěna hřebenová struktura tvořící dvě elektrody. Páska byla ponořena do sklenice s kapalinou a pomocí Arduina nano byla měřena kapacita. Na Obr. 23, je vidět realizace pásky a také graf vykazující velice dobrou korelaci měření kapacity a výšky hladiny ve sklenici. Náklady na výrobu takového snímače pomocí vodivého inkoustu jsou řádově v korunách.



Obr. 21 Pásek kapacitního snímače měřící výšku hladiny



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 METODA NANÁŠENÍ VODIVÉHO INKOSTU

Cílem této diplomové práce je změřit charakteristiku taktilního snímače s vodivým inkoustem. Před samotným měřením, ale musel být vyřešen problém jak inkoustem zakrýt a tím tedy vodivě spojit elektrody taktilního senzoru. Byly stanoveny požadavky na nanášení inkoustu a na jejich základě analyzovány prostředky, které by je splnily. Požadavky na aplikaci inkoustu byly následující:

- Nanést inkoust pouze na plochu kruhových elektrod, okolí mezi elektrodami tištěného spoje musí být bez inkoustu. Pokud by byla pokryta celá plocha tištěného spoje, mohlo by docházet k vzájemnému ovlivňování elektrod. Nanesení inkoustu pouze na elektrody má tento nežádoucí vliv eliminovat.
- Nanášecí metoda musí být schopna opakovatelnosti, určité přesnosti a především definovat různé tloušťky naneseného inkoustu.
- Homogenita a rovnost povrchu.
- Možnost použití různých druhů vodivých inkoustů.
- Díky vysoké ceně vodivých inkoustů zajistit co nejmenší spotřebu při nanášení.
- Nízké náklady na další materiál.

Na základě požadavků bylo možné přihlídnout ke známým metodám jak nanášet depozit na substrát a zhodnotit jejich vhodnost použití. Protože bylo nutné zajistit nános inkoustu pouze na elektrody, jako ideální se jeví použití šablony (masky) s kruhovými otvory, skrz které by se inkoust nanesl. Nabízí se použití obyčejného štětečku a přetření inkoustu přes šablonu. Taková metoda je ale značně nepřesná a těžko definovatelná, navíc inkoust by po zaschnutí měl tvořit co nejrovnější plochu. Vhodnější metoda by mohla být aplikace inkoustu pomocí inkoustové tiskárny, ukázka a popis v kapitole 3.4. Tisknout inkoust by zajistilo největší přesnost a kontrolu nad nanášením, ale problém vystává v použití substrátu. Původní koncept byl nanést inkoust přímo na tištěnou desku s elektrodami a i když je tato deska tvořena z flexibilního materiálu, běžnou tiskárnou by neprošla. Metoda tisku je limitována parametry inkoustu, který musí splňovat vhodnou viskozitu, velikost částic atd., aby byl schopen průchodu tryskou.

Po zhodnocení všech možností bylo nakonec přistoupeno k výrobě vlastního zařízení, které je schopné nanášet inkoust v různých vrstvách. Než bude zařízení popsáno, následující kapitola uvádí, s jakými inkousty bylo experimentováno. Data uvedená u inkoustů vychází z prospektů, které byly dodány na veletrhu, a jejich dostupnost na webu není.

## 4.1 Výčet použitých vodivých inkoustů

### KH WS SWCNT

Inkoust KH WS (Water solution) SWCNT (Single-Walled Carbon Nanotubes) Korejské firmy KH Chemicals je založen na vodní bázi a je obohacen o uhlíkové nanočástice jako vodivý materiál.

Tab. 3 Technické parametry inkoustu KH WS

	<b>KH WS SWCNT</b>
rozpouštědlo	Voda
SWCNT Obsah	0.1 wt% (<= 0.2 wt%)
Povrchový odpor	$10^{2-3} \Omega/\text{cm}$ na PET filmu
propustnost	80 – 90 %
rozpouštědlo	Voda



Obr. 22 KH WS SWCNT

### Luxor

Inkoust Taiwanské společnosti Luxor obsahující MWNT (Multi-Walled Carbon Nanotube) jako vodivé uhlíkové nanočástice. Konkrétní označení inkoust nenes, jedná se o vzorek dovezený z veletrhu. Bližší informace bohužel nejsou známy.

Tab. 4 Technické parametry inkoustu Luxor

	<b>Luxor</b>
rozpouštědlo	Voda 96%
MWNT Obsah	4%



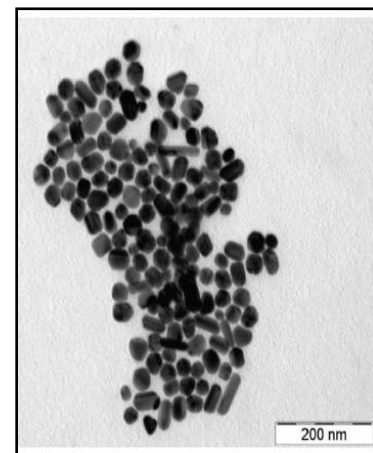
Obr. 23 Luxor

### NGAP FI Ag-4101 DZT – 3K

Vodivý inkoust Španělské firmy NANOGAP obsahující stříbrné nanočástice. Disperzi tvoří směs etylenu, glykolu a isopraonolu. Vhodný do tiskáren. Test ukázal po vytištění na papír a zahřátí na 120°C na dvě minuty, že vodivost dosahuje  $4,4 \times 10^{-5} \Omega/\text{cm}$ .

Tab. 5 Technické parametry inkoustu NGAP FI Ag-4101

	<b>NGAP FI Ag-4101</b>
Obsah Ag (wt %)	30
Průměrná velikost částic Ag (nm)	40 -60
Viskozita (cP)	8 - 10
Povrchové napětí (mN/m)	20 -28



Obr. 24 Nanočástice stříbra

### **DZT – 3K**

Vodivý inkoust vyrábějící společnost DZP Technologies. Tento inkoust jako jediný byl použit pro měření, protože díky jeho složení byl schopen vytvořit relativně kvalitní vrstvu. Výrobce popisuje a udává následující informace (Datasheet byl zaslán firmou na vyžádání, není dostupný na webu):

#### **Popis:**

Uhlíkový vodivý inkoust DZT – 3K tvoří vodní disperze uhlíkových mikročástic. Inkoust má výborné filmotvorné vlastnosti společně s těmito funkcemi:

- snadná manipulace
- schnutí při pokojové teplotě
- aplikace na různé substráty (papír, PET, polymery, textilie) s výbornou adhezí
- suchá vrstva vykazuje dobrou stabilitu během ohýbání a mačkání
- vysoký obsah pevných částic
- ředitelný destilovanou vodou

#### **Typické aplikace:**

- elektrické vodivé cesty v elektronických obvodech
- elektrody pro biosenzory
- deformační a kapacitní senzory
- impregnace tkaného materiálu
- elektrostatické stínění

*Tab. 6 Technické parametry inkoustu DZT – 3K*

	<b>DZT – 3K</b>
Pigment	uhlík
Obsah pevných částic	30 ± 3%
Rozpouštědlo	destilovaná voda
Ph	10 -11
Velikost částic	0,5 – 3 μm

## 4.2 Konstrukce aplikačního zařízení

### 4.2.1 Stříkací pistole

Princip aplikačního zařízení spočívá v rozstříku inkoustu přes šablonu mající kruhové otvory o cca 0,5 mm větší v průměru, než elektrody. Základem aplikačního zařízení je speciální stříkací pistole, viz. Obr. 27, která se používá na tzv. “airbrush”. Jedná se o dvoučinnou stříkací pistoli umožňující velice jemnou regulaci rozstříkovaného média díky mechanické spoušti s velkým rozsahem. Regulaci zajišťuje posuvná jehla, která je zabudována do těla pistole. Zmáčknutím spouště se otevře průchod pro stlačený vzduch a jemným přitahováním spouště se jehla posouvá dozadu a díky svému tvaru pomalu otevírá průchod pro inkoust v zásobníku, který začne stlačený vzduch strhávat a ve formě kapiček vyhánět směrem ven z pistole. Jehly jsou vyměnitelné za různé průměry a ovlivňují jemnost rozstříku.



Obr. 25 Stříkací airbrush pistole

Jeden z hlavních problémů bylo zvolit nanášecí metodu, která by šetřila vodivý inkoust, což tato pistole splňuje. Obsahuje totiž integrovaný zásobník na médium o obsahu 7 ml a její velkou výhodou je schopnost rozstříkovat již nepatrné množství inkoustu (desetiny ml) ze zásobníku. Spolu tak s jemnou regulací rozstříkování tvoří užitečný nástroj pro nanášení inkoustu.

Tab. 7 Specifikace stříkací pistole

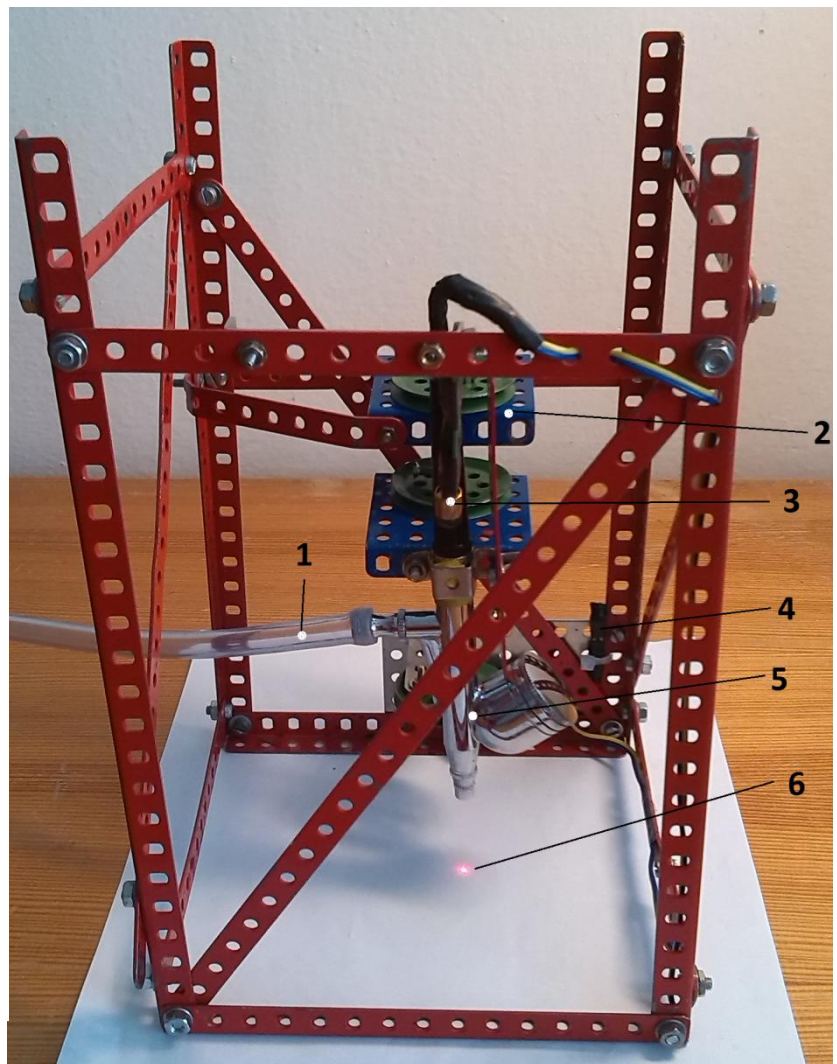
Specifikace stříkací pistole TG 130	
Způsob plnění:	Horní, gravitační (7 ml s víčkem)
Druh trysky:	Šroubovací
Velikost trysky:	0,3 mm
Alternativní rozměr trysky:	0,20/ 0,25/ 0,30
Délka:	150 mm
Hmotnost:	275 g
Pracovní tlak:	1 - 3,5 bar
Šroubení:	G1/8
Regulace množství barvy:	Ano
Jemná regulace vzduchu:	Ne

## 4.2.2 Zpracování aplikačního zařízení

Pro přesnější a regulovatelné nanášení inkoustu byl zhotoven rám, který držel pistoli tryskou kolmo k zemi, viz. Obr. 28. Rám je zhotoven z dílů stavebnice Merkur a umožňuje polohování pistole ve vertikálním směru o cca 8 cm pro nastavení vzdálenosti trysky od podkladu, protože vzdálenost ovlivňuje velikost plochy rozstříkovaného inkoustu. Problémem při zkušebním testování byl těžko odhadnutelný střed nástřiku. Ve středu nástřiku je totiž nejsilnější a nejvíce homogenní vrstva inkoustu, a tak byl na konstrukci namontován laser společně s baterií tak, aby jeho paprsek směřoval na střed nanášení pod tryskou pistole.

Prívod stlačeného vzduchu byl realizován pomocí originálního kompresoru Škoda 8P0012615A napájený 12 V, primárně určený k huštění auto pneumatik. Kompresor je kompaktních rozměrů a umožňuje regulaci výstupního tlaku vzduchu.

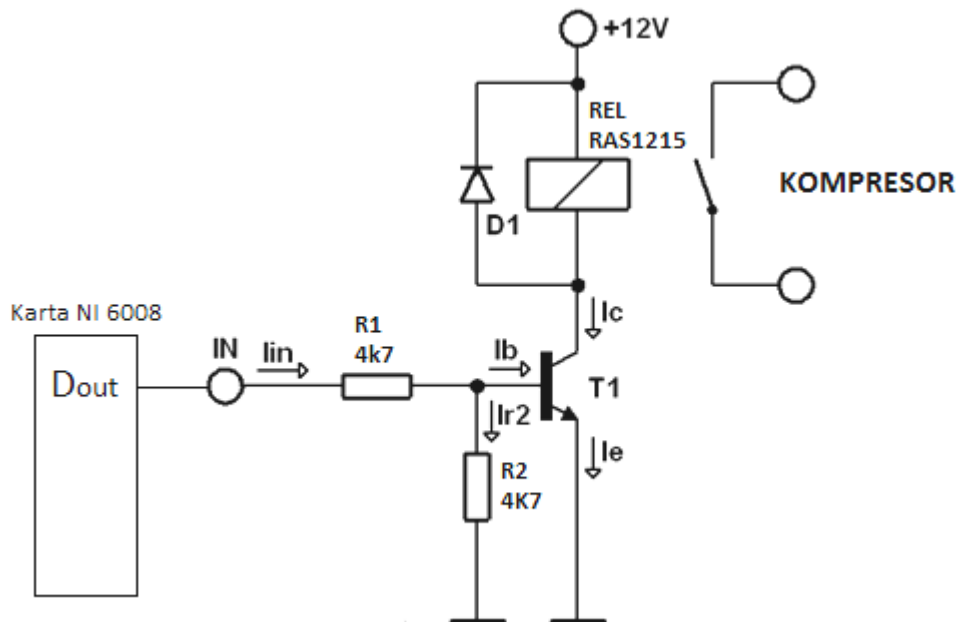
1. Prívod stlačeného vzduchu
2. Polohování pistole ve vertikálním směru
3. Laser ukazující na střed nanášení
4. Vypínač laseru
5. Stříkací pistole
6. Střed vystříkovaného inkoustu



Obr. 26 Pistole uchycená do rámu

### 4.2.3 Ovládání aplikačního zařízení

Nanášet inkoust kontinuálně se projevilo jako nevhodné. Inkoust nestačil zasychat a vlivem proudu vzduchu z pistole se rozléval do stran směrem pryč od středu. Nežádoucí jev byl odstraněn postupným nanášením vrstev tak, aby inkoust stihl vždy vyschnout. Aby byla docílena opakovatelnost nanášení a možnost vytvořit různě tlusté vrstvy, bylo zapotřebí jasně definovat dobu jednoho intervalu nanášení inkoustu. Protože kompresor neměl vzdušník, tak veškerý generovaný vzduch posílal na výstup, bylo tedy zvoleno elektrické ovládání zapínání kompresoru. Pokud by vzdušník měl, musel by být použit např. elektromagnetický ventil, který by ovládal přímo výstup vzduchu. K ovládání zapínání a vypínání byl sestaven jednoduchý obvod, viz. Obr. 29, ovládaný pomocí karty NI-6008 a programem LabView.



Obr. 27 Schéma obvodu pro spínání kompresoru

Obvod byl složen z relátka RELRAS1215 a bipolárního tranzistoru BC337-25. K relátku byl připojen kompresor a tranzistor spínala karta NI 6008 svým digitálním výstupem Dout a držela tento výstup na log. jedničce podle času zadaného v aplikaci LabView. Kompresor měl sice určitou dobu náběhu a doběhu než byl tlak konstantní, ale toto zpoždění bylo minimální a nepředstavovalo tedy problém. Aplikace v LabView umožňovala nastavování doby sepnutí kompresoru v jednotkách milisekund a softwarovým tlačítkem, které spouštělo kompresor. Pohodlně tak šlo nalézt optimální čas, po který se nanášený inkoust neroztékal.



### 4.3 Postup aplikace inkoustu

Pro aplikaci byly k dispozici čtyři různé vodivé inkousty. Tři z nich byly po pár experimentech klasifikovány jako nevhodné pro účely taktilního senzoru. Nevyhovující inkousty byly model KH WS SWCNT Ink a Luxor. Složení těchto inkoustů je založeno převážně na vodě a nejsou tedy schopny vytvořit stabilní depozit na jiném než savém materiálu jako je např. papír. Tyto inkousty se chovají v podstatě jako voda a navíc jejich vodivé částice vytvářely sraženiny, tudíž byly z experimentu vyřazeny. Inkoust NGAP FI Ag-4101 se stříbrnými nanočásticemi musel být z experimentu také vyřazen. Schopnost přilnout na elektrodách byla výrazně větší díky odlišnému chemickému složení, které netvořilo jenom vodu jako u dvou předešlých. Přesto výsledná vrstva nebyla uspokojivá. Po zaschnutí zbyl na elektrodách pouze nepatrný stříbrný film. Hlavním důvodem vyřazení tohoto inkoustu byla jeho příliš velká vodivost. Elektrody prakticky vodivě spojil a jeho odpor byl pouze v jednotkách  $\Omega$ .

Jediný vyhovující inkoust je inkoust s mikročásticemi uhlíku DZT-3K. Od ostatních inkoustů se výrazně liší svoji konzistencí. Má výrazně větší hustotu a viskozitu, celkově připomíná spíše konzistenci “laku“. Díky větší hustotě ucpával trysku stříkáci pistole, ale byl schopen vytvořit poměrně silnou soudržnou vrstvu i po vyschnutí. Inkoust byl tedy podroben ředění různými roztoky a jako nejvhodnější ředidlo se osvědčila voda v poměru 1:1. Po naředění v tomto poměru inkoust přestal ucpávat trysku pistole, ale stále byl natolik hustý, aby ulpíval na povrchu elektrod.

Zásadní změna od původního konceptu nastala při pokusu nanášet inkoust přímo na elektrody. Naředěný i neředěný vodivý inkoust po nanesení na kruhové elektrody nedržel svoji integritu. Jakékoli nepatrné mechanické namáhání způsobovalo odlupování inkoustu od povrchu elektrod. Měření vlastnosti inkoustu obnáší tlačení na jeho povrch plochým hrotem snímače síly, což by nebylo možné. Pokusy zakrýt inkoust např. lepicí páskou nebo bezbarvým lakem byly neúspěšné. Inkoust nevytvoří s povrchem elektrod dostatečně silnou vazbu. Navíc mezi vnější a vnitřní kruhovou elektrodou, kde není kovový materiál vzniká určitá prohlubeň projevující se i na povrchu naneseného inkoustu. Nejlépe to znázorňuje *Obr. 30*. Vrstva na elektrodách není homogenní a při zatěžování by stěžejní místo mezi elektrodami bylo zatěžováno méně.



*Obr. 28 Defekt vznikající na povrchu inkoustu naneseného na elektrodě*



Přistoupilo se tedy k alternativě nanést inkoust na povrch fólie, která bude přiložena na elektrody, obdobně jako vodivá guma. Zvolená PET fólie měla tloušťku cca 0,3 mm. Tenčí fólie není vhodná, neboť by mohlo dojít ke kritickému ohybu v místě kde je nanesený inkoust a mohlo by dojít k jeho poničení. Uhlíkový inkoust na fólii velmi obstojně držel, a tak bylo možné vytvořit vzorky pro měření. Šablona s otvory o průměru 3 mm byla ze stejné fólie jako podkladová. Aplikace vodivého inkoustu DZT-3K na povrch fólie probíhala za následujících podmínek:

- Tlak stlačeného vzduchu na vstupu do stříkací pistole: 1 bar
- Výška ústí pistole od povrchu: 45 mm
- Interval nástřiku vrstvy inkoustu: 800 ms
- Čekací interval mezi jednotlivými nástřiky vrstev: 30 s
- Inkoust naředěný vodou v poměru 1:1
- Teplota v místnosti při aplikaci: 23 °C

Tímto způsobem byly vytvořeny tři různě tlusté vrstvy inkoustu, kde každá byla tvořena určitým počtem nástřiků. Každá vrstva byla vždy násobkem té předešlé. Nejtenčí měla počet nástřiků 6, druhá 12 a nejsilnější 18. Nejtenčí vrstva má 6 nástřiků, což je dvojnásobek mezní hodnoty tří nástřiků, kdy inkoust začal tvořit homogenní vrstvu. Pokus o aplikaci inkoustu přímo na elektrody skrz šablonu ukazuje *Obr. 31*. Stejným způsobem byl inkoust nanášen na povrch fólie.

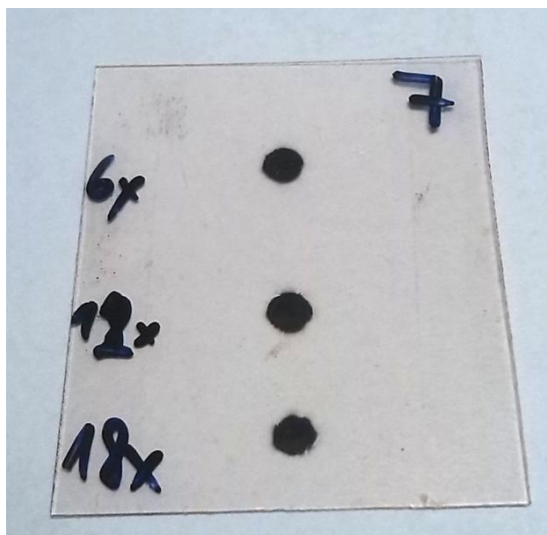
Touto metodou bylo zhotoveno několik vzorků fólií s naneseným inkoustem na jejich povrchu. Každý vzorek měl tři kruhové nánosy inkoustu, každý z nich představoval jednu tloušťku inkoustu. Měření tak bylo snadnější, protože fólie obsahovala všechny tři tloušťky inkoustu a jedním přiložením fólie na elektrody bylo možné změřit všechny tloušťky vždy na jednom druhu elektrod. Ukázku vzorku fólie s inkoustem na povrchu ukazuje *Obr. 32*.



*Obr. 29 Ukázka pokusu nanášení vodivého inkoustu na povrch elektrod skrz šablonu*

## 4.4 Měření tloušťky vrstev inkoustu

Měření tloušťky inkoustu na fólii bylo provedeno digitálním mikrometrem s přesností na 0,001 mm značky Mitutoyo SR44x1 s rozsahem 0 – 25 mm. Výsledky ukazují, že se podařilo dosáhnout rozdílně tlustých vrstev, vždy téměř dvojnásobně. Pro měření byly vybrány čtyři nejlepší vzorky. Vlastní měření na elektrodách probíhalo s fólií číslo 1, která rozdíl tloušťek nejvíce vyhovuje, viz. Tab. 8.



Obr. 30 Ukázka vzorku fólie s naneseným inkoustem různých tloušťek

Tab. 8 Naměřené tloušťky jednotlivých vrstev (modře zvýrazněná měřící fólie)

Označení fólie		Tloušťka vodivého inkoustu [ $\mu\text{m}$ ]				průměr
		1	2	3	4	
Počet nástřiků	6x	7	5	6	6	6
	12x	15	12	11	15	13
	18x	23	20	20	19	21

# 5 NÁVRH MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ TAKTILNÍCH SENZORŮ S VODIVÝM INKOUSTEM

## 5.1 Koncept

Základem měření vlastností piezorezistivních materiálů, v tomto případě vodivého inkoustu, je zjištění jeho chování při zatěžujícím tlaku. Protože inkoust má plnit úlohu převodníku síly a jedná se o piezorezistivní materiál, úkolem měření je zjistit závislost elektrického odporu inkoustu  $R$  na síle  $F$  po přepočtu dle zatěžující plochy na tlaku  $p$ . Měřicí systém tedy musí být schopen měřit velikost síly působící na jeden taktilní bod a elektrický odpor inkoustu. Pro zjištění hystereze musí metoda měření umožňovat působení stejnou silou při zatěžování a stejnou při odlehčování bez záskmitů. Přístupů jak vyvíjet tlak na piezorezistivní materiály je více. V práci [8] bylo sestaveno měřicí tlakové zařízení pro kalibraci piezorezistivního elastomeru na základě tlaku vody. Tlak vody v zařízení umožňující regulaci pomocí škrtkících ventilů zatěžoval piezorezistivní materiál skrz flexibilní membránu. Výzkum [14] využívá podobného principu s tím rozdílem, že stlačované médium v systému vyvíjející tlak, je plyn.

Měřicí metoda byla inspirována disertační prací [16]. Autor používá k zatěžování taktilního bodu vertikální pohyb ramene robota s upnutým snímačem síly na jeho konci. Tato metoda byla vybrána z důvodu dostupnosti prostředků na katedře elektrotechniky a automatizace. Robot umožňuje přesný pohyb ve vertikálním směru a tím vyvíjí tlak na elektrody bez kolísání, tudíž splňuje podmínky pro měření hystereze. Na snímač síly je upnutý měřicí "hrot" v podobě válečku, který svým kruhovým čelem přichází do kontaktu s měřeným piezorezistivním médiem. Pracoviště navržené pro měření vlastností taktilních senzorů založených na vodivém inkoustu se skládalo z těchto důležitých částí:

- Robot BOSCH Turbo Scara SR60 zajišťující generování zatížení
- Vlastní taktilní senzor s vodivým inkoustem různých tloušťek nanesený na fólii zakrývající měřicí elektrody
- Systém pro měření elektrického odporu a tlaku
- Externí PC na získávání, vizualizaci, zpracování a ukládání naměřených dat

Navrženou metodou měly být změřeny čtyři velikosti měřících elektrod a na každé velikosti otestovány tři různé tloušťky inkoustu a interpretovány závislosti a vyhodnoceny nejlepší kombinace tloušťky a velikosti elektrod. Funkční popis a realizace jednotlivých částí měřicího systému je popsána v následujících kapitolách.

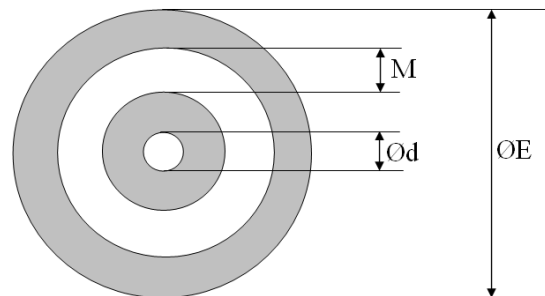
## 5.2 Měřicí systém

### 5.2.1 Snímací matice měřících elektrod

Rozměry elektrod dle *Obr. 33* jsou následující:

1.  $\text{ØE}=2\text{mm}$ ,  $\text{Ød}=0,4\text{mm}$ ,  $M=0,1\text{mm}$  – označení „LH“
2.  $\text{ØE}=2\text{mm}$ ,  $\text{Ød}=0,1\text{mm}$ ,  $M=0,1\text{mm}$  – označení „PH“
3.  $\text{ØE}=2,5\text{mm}$ ,  $\text{Ød}=0,4\text{mm}$ ,  $M=0,25\text{mm}$  – označení „LD“
4.  $\text{ØE}=2,5\text{mm}$ ,  $\text{Ød}=0,1\text{mm}$ ,  $M=0,25\text{mm}$  – označení „PD“

Měření probíhalo na snímací matici, která obsahovala čtyři různě velké kruhové elektrody. Snímací matice pochází z disertační práce [16]. Označení elektrod zůstalo zachováno stejné. Všechny čtyři velikosti elektrod byli na jedné tištěné desce zvané Cuflex. Na vývody řádků a sloupců byly přiletovány vodiče, umožňující snadnou volbu konkrétní elektrody. Elektrody jsou dále v práci nazývány dle jejich označení.

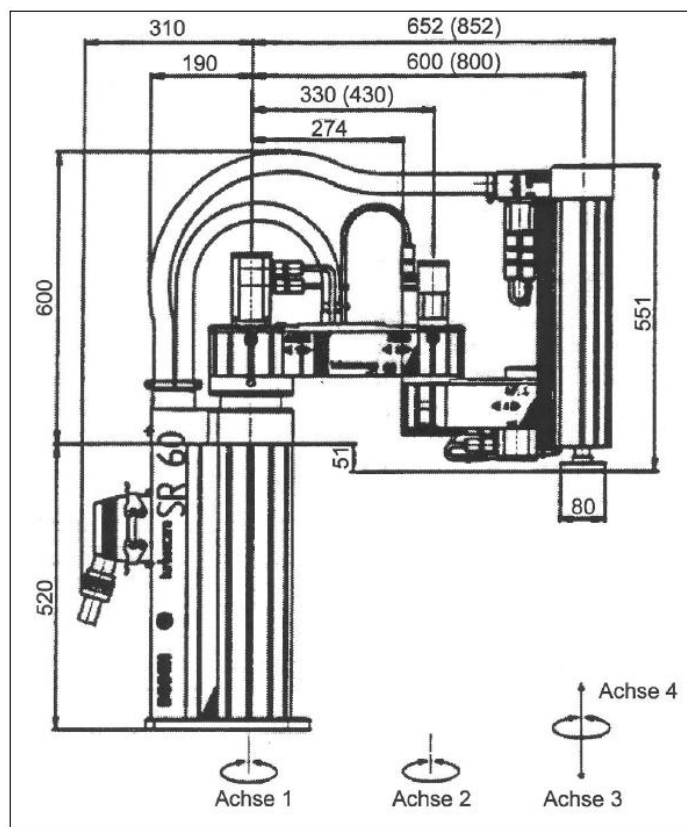


*Obr. 31* Rozměry měřících elektrod

### 5.2.2 Generování zatěžující síly

Měření vlastností vodivého inkoustu se odehrálo na robotizovaném pracovišti, které vlastní katedra elektrotechniky a automatizace, Technické fakulty, České zemědělské univerzity. Základem pracoviště je robot Turbo Scara SR60 a dopravní linka, viz. *Obr. 34*. Robotem a jeho osou č. 4, která umožňuje pohyb ve vertikálním směru, bylo generováno zatížení pohybem kolmo proti elektrodám s naneseným inkoustem. Pro účely měření byl používán pouze pohyb robota, dopravní linka a další funkce nebyly aktivní. Robot je chráněn bezpečnostní průhlednou skříní, zamezující vstupu do pracovního prostoru robota. Vstup do bezpečnostní skříně je realizován dvířky, která jsou opatřena kontaktem detekujícím stav dveří, a v případě jejich otevření se automaticky vypne pohon robota. Důležitým prvkem kontrolovaným v průběhu měření je maják indikující stav robota, ve kterém se právě nachází. Maják signalizuje tyto stavy:

- Maják zhasnutý – neaktivní automatický režim
- Červená barva – vznikla porucha a chod robota je zastaven
- Zelená barva – aktivovaný automatický režim robota



Obr. 32 Rozměry a osy robota BOSCH Turbo Scara SR60.

Robot BOSCH Turbo Scara má kinematickou strukturu SCARA a disponuje třemi rotačními a jedním translačním pohybem, dohromady tedy má robot čtyři stupně volnosti. Robot vlivem bezpečnostní skříně nemůže využít kompletně celý pracovní prostor a to především prostor za sebou. Omezení pracovního prostoru ale nemá žádný vliv na měření. Nejdůležitější je totiž translační pohyb. Servomotory o výkonech 0,15 a 0,95 kW zajišťují pohyb ramene robota. Každý ze čtyř pohybů má svůj servomotor a obsahuje harmonickou převodovku, elektromagnetickou brzdu s inkrementálním čidlem.

Technická data robota BOSCH Turbo Scara SR60 dle [31] :

**Operační prostor:**

rádus max: 600mm  
rozsa h osy 1:  $\pm 140$  stupňů  
rozsa h osy 2:  $\pm 150$  stupňů  
rozsa h osy 3 (zdvih): 200 mm  
rozsa h osy 4:  $\pm 360$  stupňů

**Přesnost:**

tolerance umístění: 0,025 mm  
rozlišení: 0,01 mm  
tolerance osy 4: 0,1 stupně

**Maximální rychlost:**

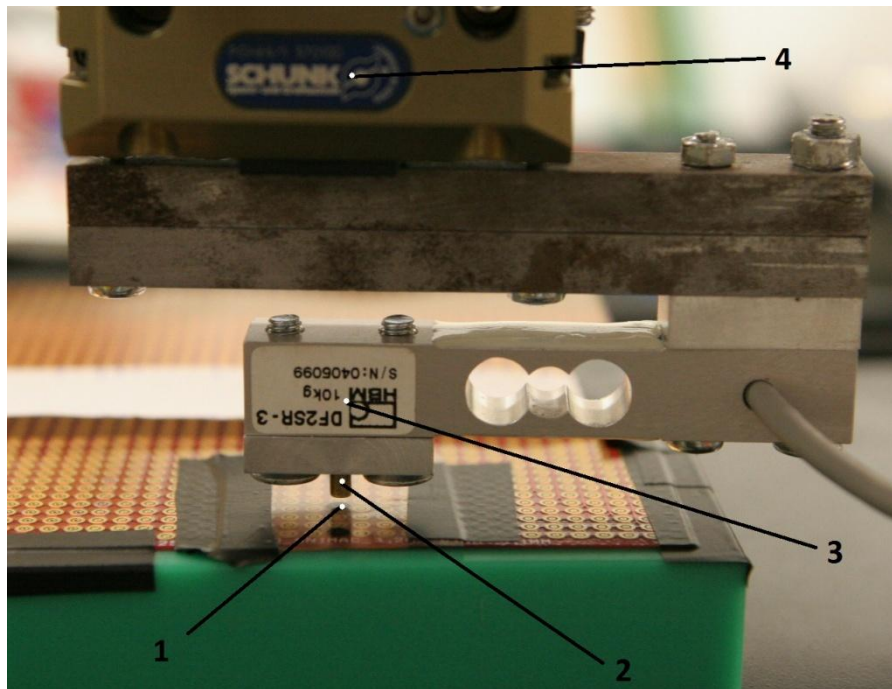
složení os 1 a 2: 4400 mm /s  
osa 1: 265 stupňů/s  
osa 2: 350 stupňů/s  
osa 3: 700 mm/s  
osa 4: 1100 stupňů/s

**Zatížení:**

jmenovité zatížení: 2 kg  
maximální zatížení: 5 kg

### 5.2.3 Měření tlaku

Zatěžovací sílu realizuje robot vlivem posunu ramene ve vertikálním směru. Velikost síly, kterou rameno tlačí na povrch inkoustu, ale robot měřit neumí. Na konec ramene robota byl tedy nainstalován tenzometrický snímač síly značky Hottinger model DF2S-3, na kterém byl připevněn měřící hrot s kruhovou plochou o průměru 3 mm, viz. Obr. 35. Model snímače síly DF2S-3 byl vybrán pro svoji vysokou citlivost a dostačující rozsah. Podrobné technické parametry ukazuje Tab. 11.

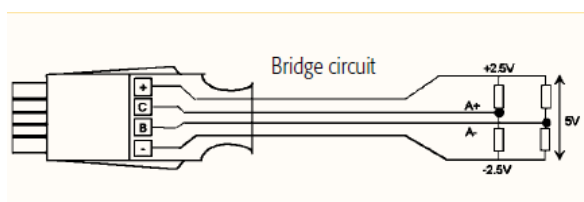


Obr. 33 1) vodivý inkoust na fólii 2) měřící hrot 3) snímač síly DF2S-3 4) hlavice robota

Měřící hrot se svojí kruhovou plochou, větší než byl průměr elektrod, dosedal na povrch jednoho taktilního bodu a tlačil vodivý inkoust nanesený na fólii proti kruhovým elektrodám, na kterých byl měřen elektrický odpor inkoustu. Ze známé plochy měřícího hrotu a síly byl počítán tlak, který působil na elektrody. Tenzometrický snímač síly tvoří deformační člen a čtyři tenzometry zapojené do plného můstku. Na měřící diagonále byla vyčítána hodnota napětí, které reprezentovalo velikost zatížení. Toto napětí bylo měřeno pomocí ústředny Almemo 2890 – 9 a speciálního konektoru dodaného firmou Ahlborn určeného k měření můstkového zapojení. Univerzální konektor pro měření napětí, který byl součástí ústředny, měření výstupního signálu z tenzometrického snímače neumožňoval. Ústředna je totiž řešena tak, že na senzory měřící různé fyzikální veličiny je potřeba použít speciálních konektorů, které například v našem případě obsahuje přesný stabilizační obvod pro napájení můstku. Výhodou speciálních konektorů je přítomnost EEPROM paměti, kte-

rá slouží pro uložení kalibrace, nuly a dalšího nastavení provedeného v ústředně. Není tedy nutné po opětovném připojení senzoru nic znovu nastavovat, i kdyby ústředna prošla resemem.

Snímač síly byl kalibrován tak, že 1 gram odpovídá změně napětí o 1  $\mu\text{V}$ . Ústředna byla poté nastavena, aby data na displeji zobrazovala hodnoty v gramech pro snazší následný přepočítání na tlak. Zapojení konektoru a parametry ústředny a snímače síly jsou následující:



Obr. 34 Schéma vnitřního zapojení konektoru ALMEMO pro měření můstků

Tab. 9 Technická data ALMEMO konektoru [34]

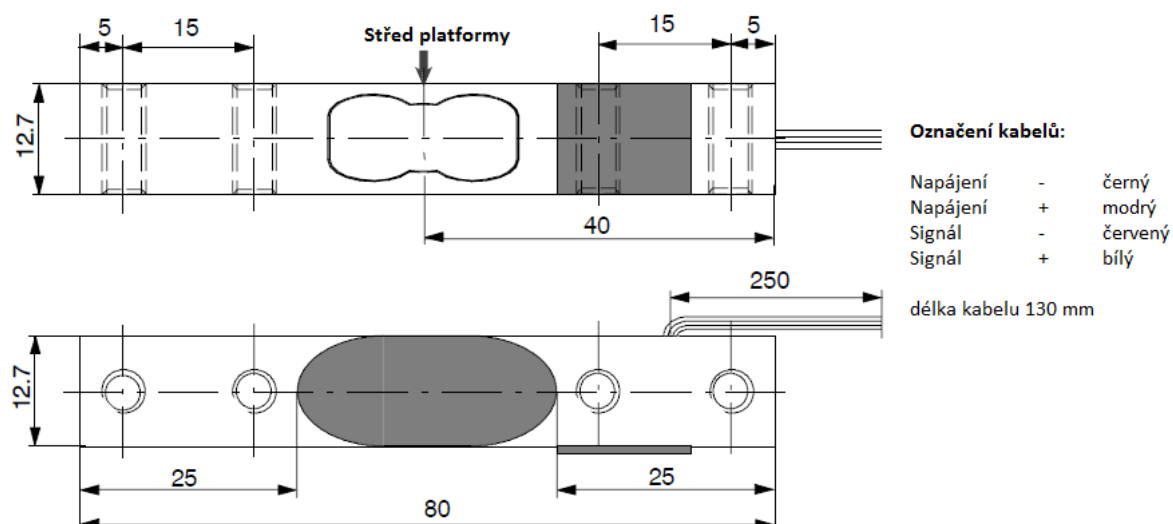
<b>55mV DC ZA9105FS0</b>	
Měřicí rozsah	-10 až +55 mV
Rozlišení	1 $\mu\text{V}$
Napětí $U_f$	5V $\pm$ 0.05V
Teplotní koeficient	<50ppm/ $^{\circ}\text{C}$
Výstupní proud	max. 100mA
Proud v klidu	approx. 3 mA

Tab. 10 Technická data ústředny ALMEMO 2890 – 9[34]



<b>ALMEMO 2890 - 9</b>	
Měřicí vstupy	9 ALMEMO zásuvek, elektricky izolované
Kanály	9 primárních. Max 32 dodatečných pro duální senzory a funkční kanály (např. diferenční hodnoty)
A/D převodník	Delta-sigma 24-bit
Napájení senzoru	9 nebo 12 V, max 0.5 A
Výstupy	2 ALMEMO zásuvky (analog, data, trigger, relé, paměť, atd.)
Displej	Grafický 128x128 pixelů, volitelná intenzita podsvícení
Klávesnice	9 membránových tlačítek, otáčení kolečko
<b>Napájení</b>	
Nabíjecí baterie	6 NiMH, 1600 mAh
Síťový adaptér	230 V AC na 12 DC, 1 A
<b>Rozměry</b>	
Box	204x109x44 mm





Obr. 35 Rozměry snímače a zapojení vodičů

Tab. 11 Technické parametry tenzometrického snímače Hottinger DF2S-3 [35]

DF2S-3		
Přesnost	%	<b>0.03</b>
Max.zatížení (E <sub>max</sub> )	kg	1 - 20
Max. rozměry	mm	150 x 150
Citlivost (C <sub>n</sub> )	mV/V	2 ± 10 % (1 kg:1.8 ± 10 %)
Vyrovnaní nuly		0 ± 0.5
Teplotní efekt na vyrovnaní nuly (TK0)	% z C	± 0.3000
Teplotní efekt na citlivost (TKC)		± 0.05000
Chyba hysterese (d <sub>hy</sub> )	% z C	± 0.0300
Nelinearita (d <sub>lin</sub> )		± 0.0300
Měření (d <sub>cr</sub> ) nad 5 min.		± 0.0500
Vstupní odpor (RLC)		1000 ± 10
Výstupní odpor (R <sub>0</sub> )	Ω	1000 ± 10
Referenční budící napětí (U <sub>ref</sub> )	V	5
Nominální rozsah budícího napětí (BU)		5 ...15
Izolační odpor (R <sub>is</sub> )	GΩ	> 2
Nominální rozsah teplot (BT)	°C	-10... +40 [+14 ... +104]
Servisní rozsah teplot (B <sub>tu</sub> )		-20... +50 [-4 ... +122]
Skladovací rozsah teplot (B <sub>tl</sub> )		-30 ... +70 [-22 ... +158]
Mezní zatížení (EL)	% of E <sub>max</sub>	150
Boční meze zatížení (E <sub>lq</sub> ), statické		300
Maximální zatížení (E <sub>d</sub> )		150
Odchylka z E <sub>max</sub> (s <sub>nom</sub> ), approx.	mm	< 0.4
Váha (G), approx.	g	30
Třída ochrany dle EN60529 (IEC529)		IP54
Materiál: Měřicí člen		Hliník
Povrchový nátěr		Silikonová guma

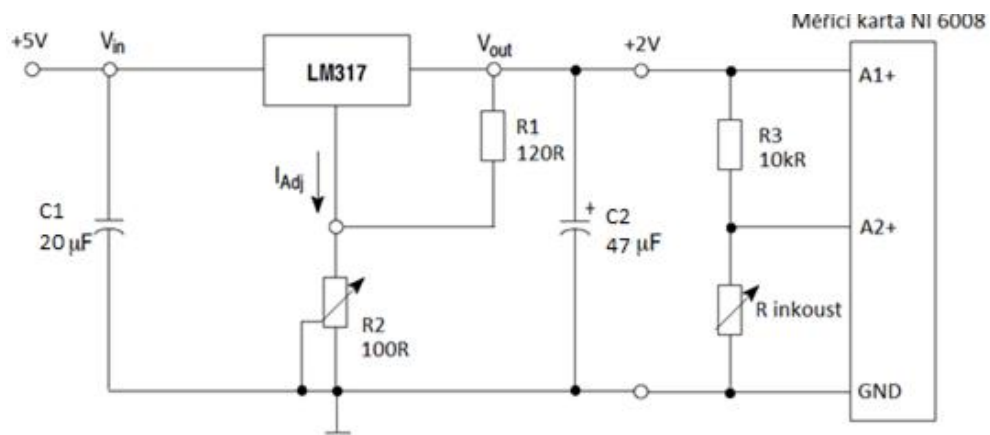


## 5.2.4 Měření elektrického odporu inkoustu

Měřicí obvod byl realizován na nepájivém poli, což umožňovalo snadný výběr konkrétních měřících elektrod pouhým přepojením vodičů připájených na řádky a sloupce elektrodové matice. Schéma měřícího obvodu ukazuje *Obr. 38*. Skládá se ze stabilizovaného obvodu, který napájí napěťový dělič, kde jeden rezistor v děliči je neměnný a druhý rezistor je proměnlivý představující vodivý inkoust. Napájecí obvod obsahoval stabilizátor napětí LM317 umožňující jemnou regulaci výstupního napětí pomocí potenciometru [32]. Stabilizátor byl napájen ze síťového zdroje o velikosti 5 V. Výstupní napětí bylo nastaveno na 2 V. Nízká hodnota napájecího napětí byla zvolena proto, aby obvodem protékaly nízké hodnoty proudu a nedocházelo tak k ohřevu vodivého inkoustu. Hodnota neměnného odporu v děliči je 10 kΩ, pro zajištění co možná nejvíce stabilního proudu v obvodu. Větší rezistor by představoval stabilnější protékající proud, protože by poměr neměnného odporu ku inkoustu byl větší a odpor inkoustu v děliči zanedbatelnější. Ovšem změny napětí na děliči by byly velice malé a obtížněji měřitelné. Elektrický odpor inkoustu byl počítán dle vztahu:

$$R_{inkoust} = \frac{R_{konst} \times U_{inkoust}}{U_{napájecí} - U_{inkoust}} \quad (12)$$

Měření napětí na inkoustu potřebné pro výpočet hodnoty jeho odporu v děliči bylo provedeno pomocí měřící karty NI 6008. Napětí  $U_{inkoust}$  bylo připojeno na analogový vstup karty a měřeno metodou RSE (Reference Single Ended) proti zemi. Na další analogový vstup karty bylo stejně měřeno i výstupní napětí  $U_{napájecí}$  ze stabilizátoru. Výstup měřící karty byl přes USB připojen k PC, kde byla obsluhována programem NI LabView. V prostředí LabView byla vytvořena aplikace, která se starala o výpočet a záznam elektrického odporu dle vztahu (12).

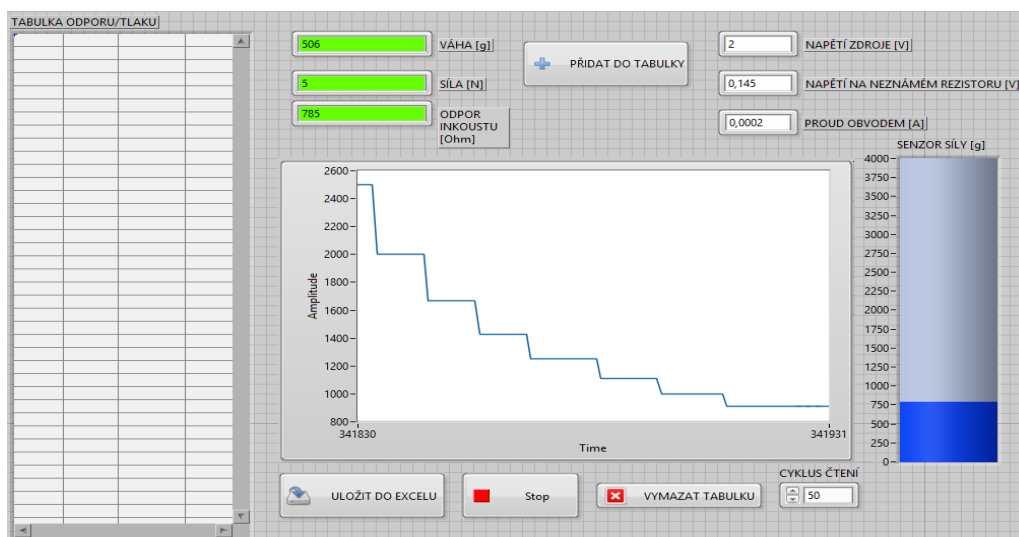


*Obr. 36 Schéma zapojení obvodu měřící odpor vodivého inkoustu*

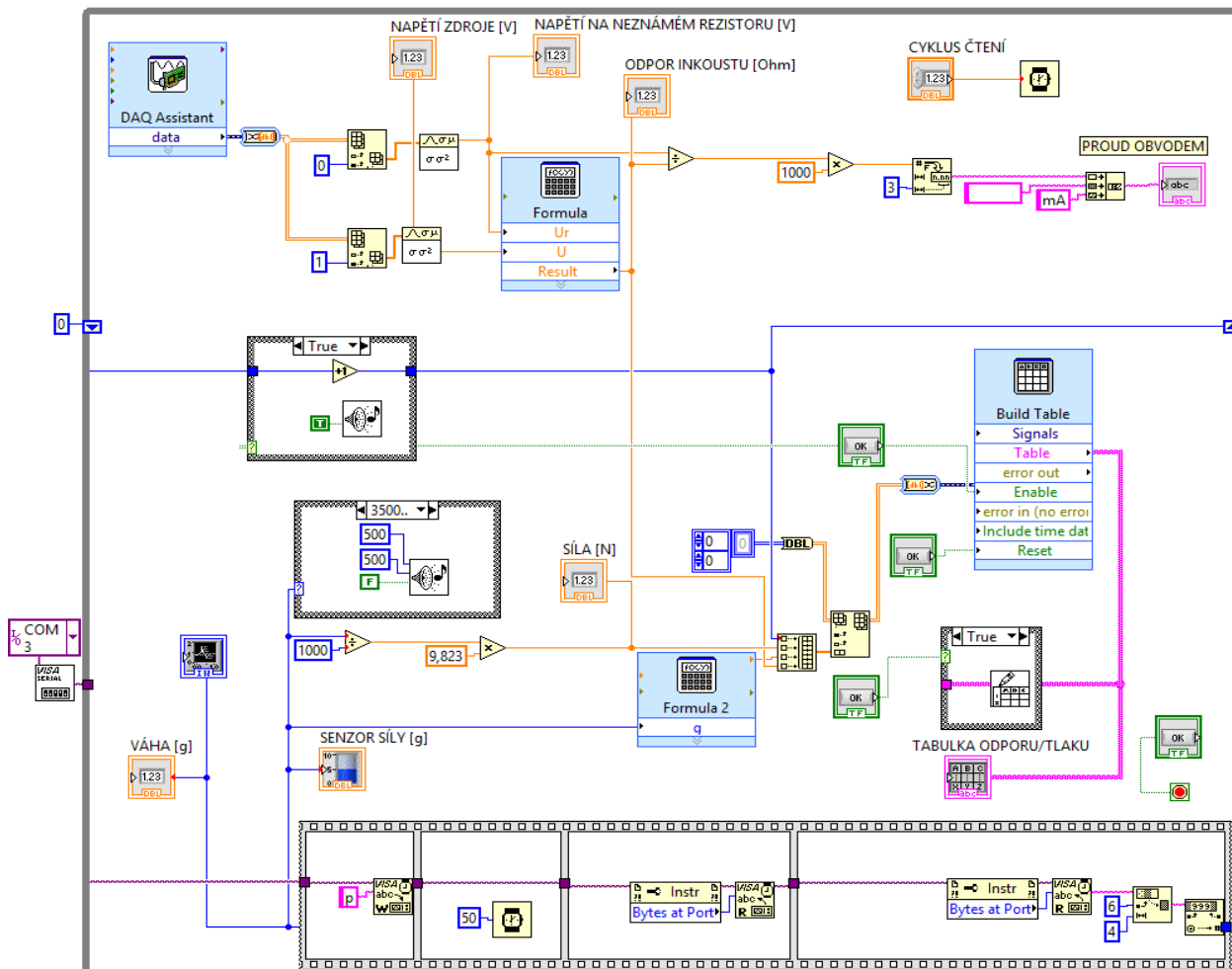
## 5.2.5 Aplikace měřícího systému v LabView

Měřící systém byl vybaven aplikací vytvořenou v programu LabView. Aplikace má za úkol snadnou, rychlou a efektivní práci s naměřenými daty. Hlavní funkce aplikace je vizualizace, zpracování a ukládání naměřených dat. Aplikace byla navržena tak aby přijímala data z měřící karty NI 6008 použité pro účely měření odporu inkoustu, viz. kapitola 5.2.3, a ústředny ALMEMO 2890-9 měřící signál s tenzometrického snímače síly, viz. kapitola 5.2.2. Karta NI 6008 je od stejného výrobce jako je program LabView, tudíž je navržena k snadnému připojení pomocí USB a použití v programu. K instalaci je zapotřebí pouze stáhnout ovladač NI-DAQmx obsluhující kartu. Naistalováním ovladače ústředny je v PC vytvořen virtuální COM port, umožňující sériovou komunikaci s ústřednou. Z dokumentace ústředny byl zjištěn příkaz v ASCII, konkrétně “p”, na jehož základě ústředna pošle aktuální data zobrazující se na displeji. To umožnilo vyčítání dat z ústředny v programu LabView pomocí komponent pro práci se sériovou linkou. Blokový diagram je vidět na obrázku *Obr. 40*.

Aplikace zobrazuje aktuální hodnoty napětí zdroje (stabilizátoru), odpor inkoustu, síly, váhy. Po stisknutí tlačítka “přidat do tabulky” se provede uložení hodnot odporu inkoustu, síly, vypočítaného tlaku, a čísla udávající pořadí měření. Po načtení potřebného množství hodnot se příslušným tlačítkem tabulka uloží do Excelu. Dále aplikace umožňuje vymazat tabulku v průběhu měření, nastavit cyklus čtení, který ale nesmí být menší než 20 ms poté dochází k restartu sériové linky. Graf zobrazující odpor v čase slouží spíše pro informativní charakter a zpětnou kontrolu, že se odpor inkoustu měnil. Aplikace je ošetřena zvukovým alarmem pro případ dojde-li k překročení zatížení přes 3 kg. Uživatelské prostřední aplikace zobrazuje *Obr. 39*.



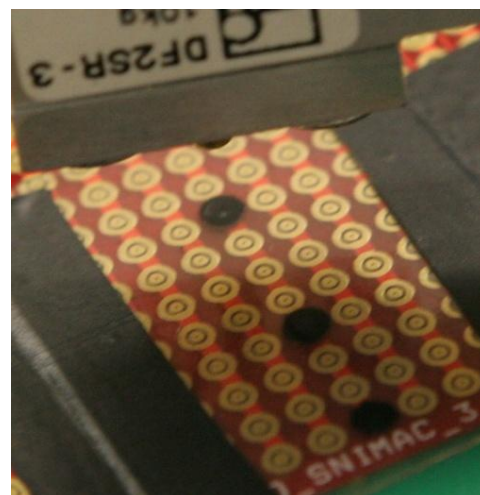
Obr. 37 Uživatelské rozhraní aplikace měřícího systému



Obr. 38 Blokový diagram aplikace měřícího systému v LabView

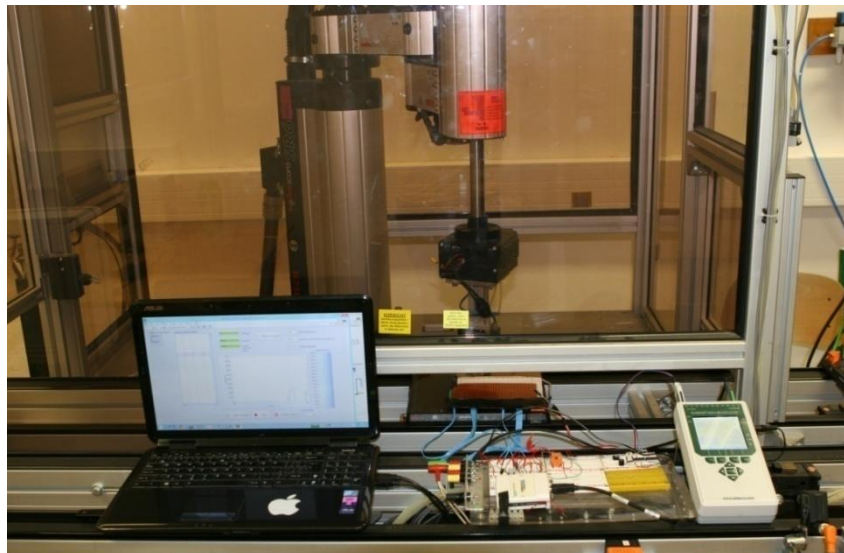
### 5.3 Postup měření

Pomocí speciálního dálkového ovladače byl ovládán pohyb robota. Po zapnutí hlavního vypínače bylo nutné počkat, než se celý systém inicializoval. Přepínačem na přístrojové desce byl nastaven manuální režim. Poté bylo nutné pomocí ovladače nastavit referenční polohy všech os robota. Po této úvodní proceduře bylo možné ovládat osy robota. Do pracovního prostoru bylo na tvrdou plastovou podložku umístěno taktilní pole s přilepenou fólií, na které byl nanesen vodivý inkoust. Fólie obsahovala vždy tři kruhové plochy inkoustu rozdílných tloušťek, viz. Obr. 41. Před umístěním fólie byl vždy povrch elektrod důkladně odmaštěn. Umístění měřícího hrotu



Obr. 39 Detail fólie na elektrodách s naneseným vodivým inkoustem různých tloušťek

nad kruhovou plochu vodivého inkoustu bylo prováděno ručně pomocí ovladače robota a záviselo tedy na subjektivním dojmu, zda hrot zakrývá celou plochu inkoustu. Navedení robota tak, aby hrot zakrýval celou plochu, bylo relativně snadné, protože měřicí hrot má větší průměr než použité kruhové elektrody. Po kontrole zda hrot dosedá na celou plochu elektrod, byly zaznamenány souřadnice X a Z určující polohu hrotu. V nezatíženém stavu byla nastavena nula na ústředně měřící snímač síly. Následovalo postupné vysunování vertikální osy robota pomocí tlačítek + a – na ovladači robota. Pro korektní začátek měření musela být při zatěžování vždy stanovena stabilní hodnota odporu inkoustu, od které se spustil záznam hodnot a další zatěžování. Stabilní hodnota odporu byla vždy jiná v závislosti na tloušťce a druhu elektrod a odpovídala souřadnicím vertikální osy. Souřadnice byly zaznamenány a sloužili jako počáteční hodnota, od které probíhal posun 0,01 mm, což je nejmenší možný posun robota.



*Obr. 40 Pracoviště na měření vlastností vodivého inkoustu*

Po pár zkušebních měřeních byl stanoven maximální posun dolů (zatěžování) ve vertikálním směru o 180  $\mu\text{m}$ , což představovalo osmnáct posunů ramene, jako dostačující pro změření hranic kdy už zatěžující síla nemá vliv na změnu odporu inkoustu a od této hodnoty byl proveden posun nahoru (odlehčování) o stejný počet posunů. Procedura zatěžování a odlehčování měla za úkol změřit hysterezi vodivého inkoustu. Vždy po provedení pohybu o jeden posun byly údaje o hodnotě odporu a tlaku zaznamenány aplikací Lab-View. Jeden měřicí cyklus tedy obsahoval 37 hodnot. Mezi každým cyklem proběhlo odlehčení elektrod a pěti minutová pauza, aby se materiál mohl zrelaxovat. Na každé tloušťce bylo měření provedeno 10x. Každá tloušťka byla změřena na všech čtyřech typech elektrod.

### **Shrnutí hlavních parametrů měření:**

- Použítá fólie č. 1, viz. kapitola 4.4, s tloušťkami inkoustu 7, 15 a 23  $\mu\text{m}$
- Každý cyklus měření byl proveden osmnácti posuny robota o nejmenší dílek (0,01) směrem dolů a osmnácti posuny směrem nahoru (180  $\mu\text{m}$  jedním směrem).
- Použité čtyři druhy elektrod typu LH, PH, LD, PD, viz. kapitola 5.2.1
- Každá elektroda při dané tloušťce byla měřena 10x.
- Mezi cykly 5 minut pauza na zrelaxování fólie.
- Teplota pracoviště 22°C.

## 6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 6.1 Příklad statistického vyhodnocení hodnot

Postupem uvedeným v kapitole. 5.3 byla naměřena data, která byla statisticky vyhodnocena dle [24]. Následující výpočty demonstrují konkrétní příklad vyhodnocení pro působící tlak 26 912,18 Pa na elektrodě PD při nejtenčí tloušťce inkoustu 6  $\mu\text{m}$ . Stejným způsobem byla zpracována všechna další naměřená data.

Tab. 12 Naměřená data při zatěžujícím tlaku 26 912,18 Pa na elektrodě PD

Zatěžování – působící tlak 26 912,18 Pa			
i	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$(R_i - \bar{R}_i)$	$(R_i - \bar{R}_i)^2$
1	1 247,43	22,02	484,74
2	1 166,96	-58,45	3 416,78
3	1 243,71	18,30	334,77
4	1 166,82	-58,59	3 433,17
5	1 259,84	34,43	1 185,20
6	1 258,09	32,68	1 067,77
7	1 252,76	27,35	747,85
8	1 233,47	8,06	64,95
9	1 186,25	-39,17	1 533,94
10	1 238,80	13,39	179,27
n = 10	$\Sigma = 12 254,13$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 12 448,43$

**Vysvětlivky:**  $R_i$  – hodnoty elektrického odporu inkoustu v průběhu deseti měření

$\bar{R}_i$  – aritmetický průměr hodnot odporu ze všech deseti měření

#### Výpočet aritmetického průměru odporu:

$$\bar{R}_i = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{15} R_i}{10} = \frac{12254,13}{10} = 1225,41 \text{ } [\Omega] \quad (13)$$

Výběrový rozptyl:

$$s^2(y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{15} (R_i - \bar{R}_i)^2}{n-1} = \frac{12448,43}{9} = 1383,16 \quad (14)$$

#### Rozptyl výběrových průměrů:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{s^2(y_i)}{n} = \frac{1383,1}{10} = 138,31 \quad (15)$$

### Směrodatná odchylka výběrových průměrů – Standardní nejistota typu A:

Nejistota  $U_a$  představuje hodnotu v jednotkách  $\Omega$ . Následoval přepočítání na procenta z mediánu všech deseti měření při konkrétním tlaku kvůli docílení stejných jednotek s nejistotou  $U_b$ , které byla vyjádřena v procentech.

- střední hodnota odporu z deseti měření: 1 241,26  $\Omega$

$$U_A \equiv s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (R_i - \bar{R}_I)^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{12448,43}{90}} = 11,76 \Omega = \mathbf{0,95\%} \quad (16)$$

### Standardní nejistota typu B:

Tab. 13 Hodnoty pro výpočet nejistoty  $U_b$

j	Název	$z_j$ [%]	$U_{z_j}$ [%]	$U_{z_j}^2$ [%]
1	robot Turbo Scara SR60	0,0125	0,007	0,000052086
2	snímač síly	0,03	0,017	0,000300018
3	měřicí karta NI 6008	0,147	0,085	0,007203423
4	přesnost odporu	1	0,577	0,333352890
5	ústředna ALMEMO	0,001	0,001	0,000000333
$\Sigma=5$		$\Sigma=1,191$	$\Sigma=0,687$	$\Sigma=0,341$

$$U_{z_j} = z_j / m \text{ [m – normální rozdělení 1,732]} \quad (17)$$

$$U_B = \sqrt{\sum_{j=1}^j U_{z_j}^2} = \sqrt{0,341} = \mathbf{0,584\%} \quad (18)$$

### Kombinovaná standardní nejistota typu C:

Nejistota typu C je vypočtena podle vztahu (19) v procentech, z nichž je vypočtena hodnota odporu inkoustu z průměru z deseti měření.

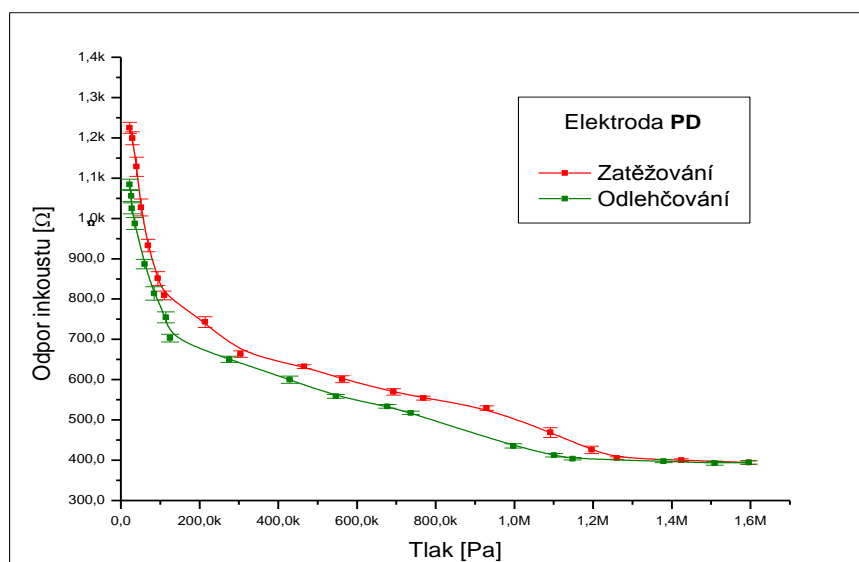
$$\bar{R}_i = 1225,41 \Omega$$

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} = \sqrt{0,95^2 + 0,584^2} = 1,115\% \text{ z } \bar{R}_i = \mathbf{13,66 \Omega} \quad (19)$$

Standardní nejistota typu C je uváděna u každého grafu v tabulce a představuje maximální  $\pm$  odchylku od konkrétní naměřené hodnoty.

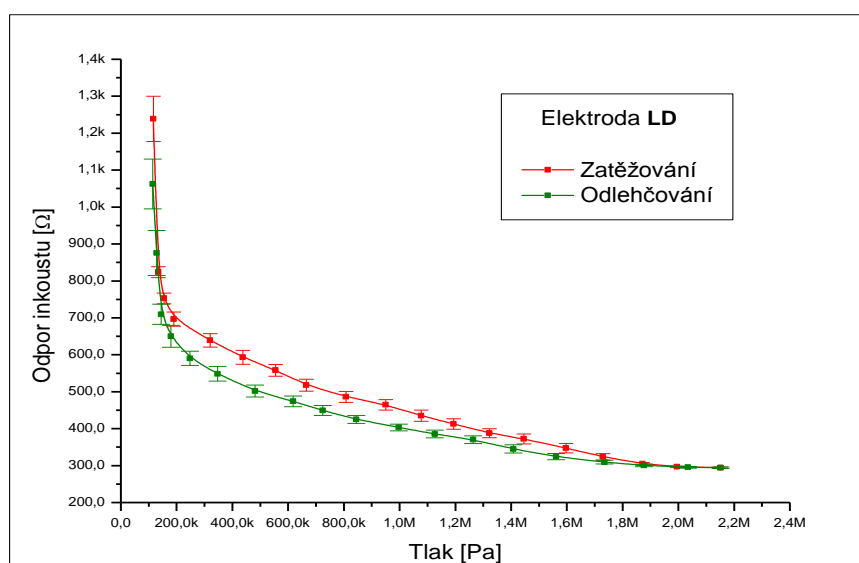
## 6.2 Tloušťka vodivého inkoustu 7 $\mu\text{m}$

Postup měření je popsán v kapitole 5.3. Podrobný výčet všech dat z tohoto měření je uveden v příloze. Měření na elektrodě PD, viz. Graf. 7, při nejtenčí tloušťce inkoustu vykazuje poměrně vysokou citlivost, průměrně od hodnot tlaku 22 kPa, což odpovídá síle 0,16 N. Od hodnot tlaku cca 200 kPa přestane charakteristika strmě klesat a začne mít mírně lineární charakter.



Graf. 7 Závislost odporu inkoustu tl. 7  $\mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PD

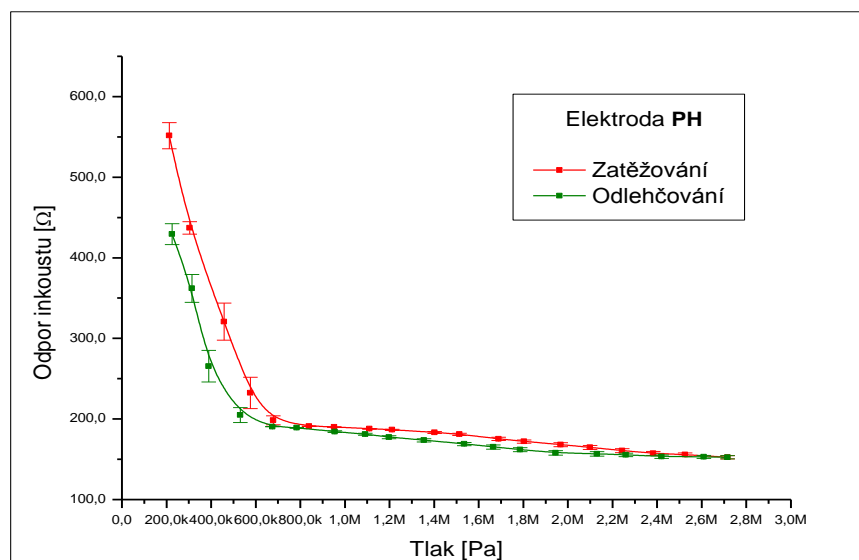
Elektroda LD má průběh podobného charakteru jako elektroda PD, po strmém klesání také vykazuje lineární charakter. Citlivost je nižší. Odpor se začal měnit až od průměrného tlaku 116,3 kPa.



Graf. 8 Závislost odporu inkoustu tl. 7  $\mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LD

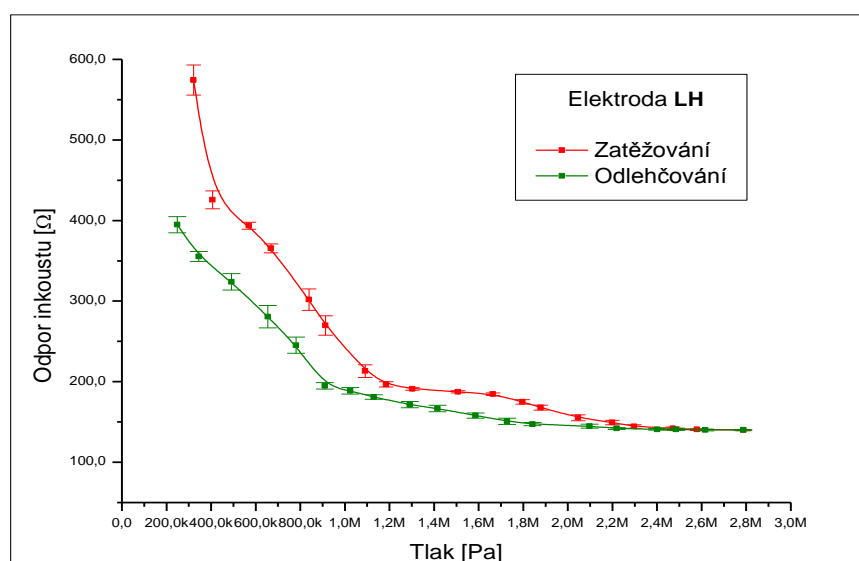


Měření na elektrodě PH ukázalo potřebu vyvinout větší tlak, než vodivý inkoust začal reagovat, citlivost je tedy nižší, viz. *Graf 9*. Odpor se začal měnit až od průměrného tlaku 211,32 kPa. To je způsobené s největší pravděpodobností menší styčnou plochou mezi elektrodami a vodivým inkoustem a je tak zapotřebí většího tlaku. Odpor výrazněji klesá do tlaku 678,4 kPa a od této hodnoty se již mění minimálně.



*Graf. 9 Závislost odporu inkoustu tl. 7 μm na tlaku z měření elektrody PH*

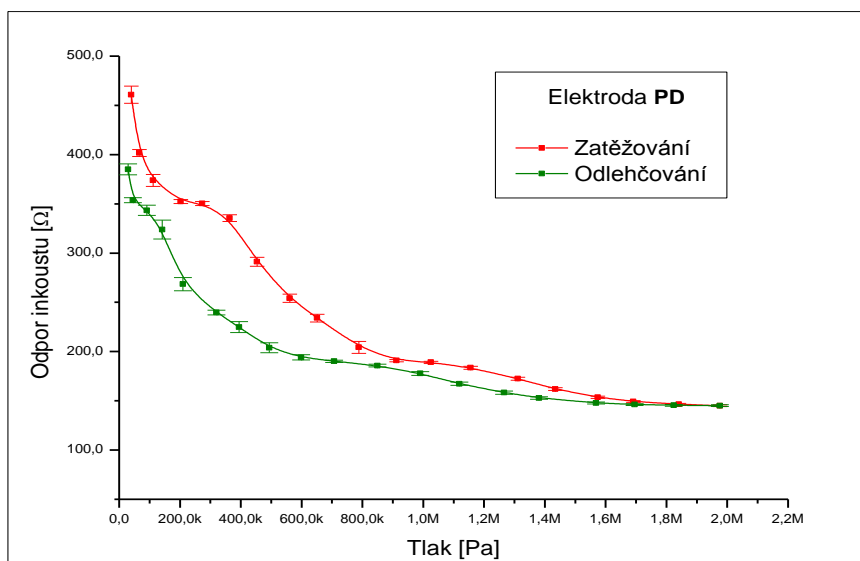
Elektroda LH začíná reagovat až od průměrného tlaku 320,8 kPa. Závislost ukazující *Graf. 10* vykazuje značnou nelineárnost téměř v celém průběhu a hystereze je také velice patrná.



*Graf. 10 Závislost odporu inkoustu tl. 7 μm na tlaku z měření elektrody LH*

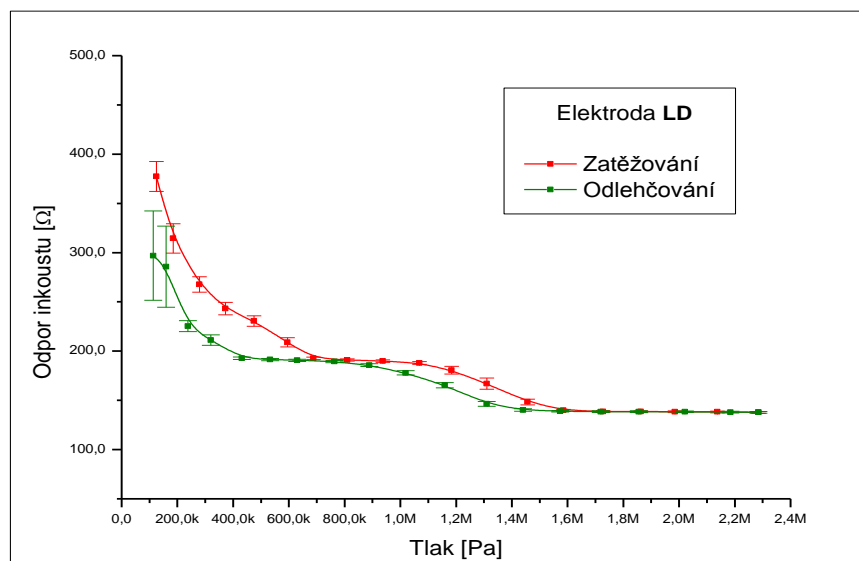
### 6.3 Tloušťka vodivého inkoustu 15 $\mu\text{m}$

Postup měření je popsán v kapitole 5.3. Podrobný výčet všech dat z tohoto měření je uveden v příloze. Měření na elektrodě PD, viz. Graf 11, při střední tloušťce inkoustu vykazuje poměrně vysokou citlivost, průměrně od hodnot tlaku 39,8 kPa, což odpovídá síle 0,28 N. Průběh závislosti, ale vykazuje velmi nelineární charakter v celém rozsahu a značnou hysterezi v první polovině zatěžování.



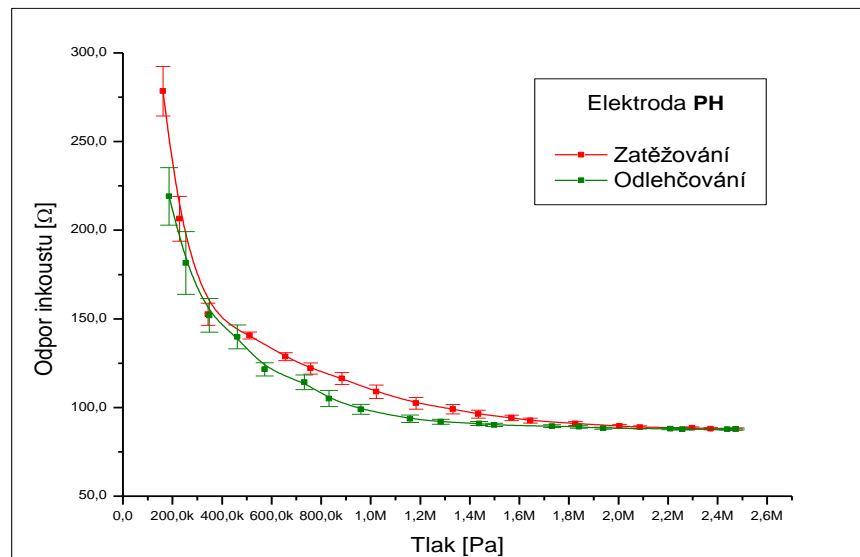
Graf. 11 Závislost odporu inkoustu tl. 15  $\mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PD

Elektroda LD začíná reagovat až od průměrného tlaku 128,86 kPa. Má nižší citlivost než při stejné tloušťce elektrody PH. Závislost ukazující Graf. 12 vykazuje také značnou nelineárnost téměř v celém průběhu a hystereze je také velice patrná.



Graf. 12 Závislost odporu inkoustu tl. 15  $\mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LD

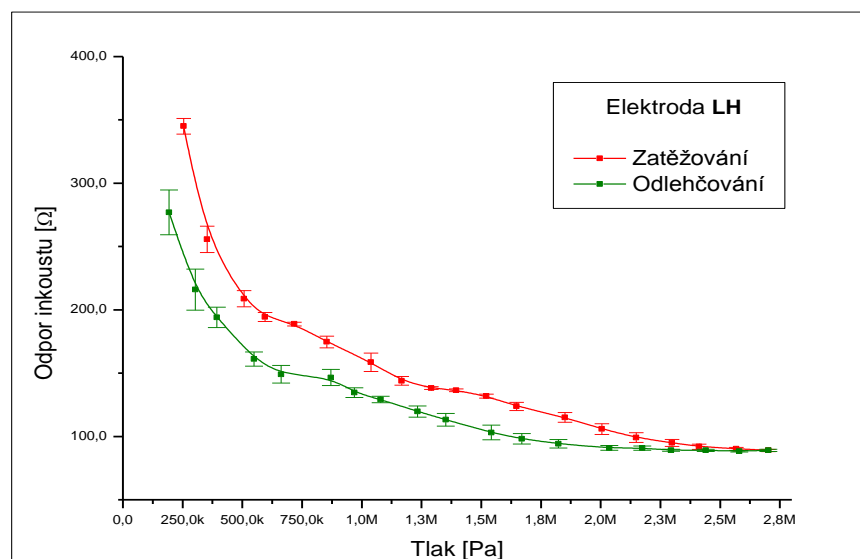
Měření na elektrodě PH ukázalo potřebu vyvinout větší tlak, než vodivý inkoust začal reagovat, citlivost je tedy nižší, viz. *Graf 13*. Odpor se začal měnit až od průměrného tlaku 161,8 kPa. To je způsobené s největší pravděpodobností menší styčnou plochou mezi elektrodami a vodivým inkoustem a je tak zapotřebí většího tlaku. Průběh charakteristiky je nelineární, ale hystereze není tak výrazná a nejvyšší je zhruba uprostřed průběhu.



*Graf. 13 Závislost odporu inkoustu tl. 15 µm na tlaku z měření elektrody PH*

Elektroda LH, viz. *Graf 14*, začíná reagovat až od průměrného tlaku 253,4 kPa. Má nižší citlivost než při stejné tloušťce elektrody PH. Závislost na této elektrodě vykazuje především vysokou hysterezi v celém průběhu.

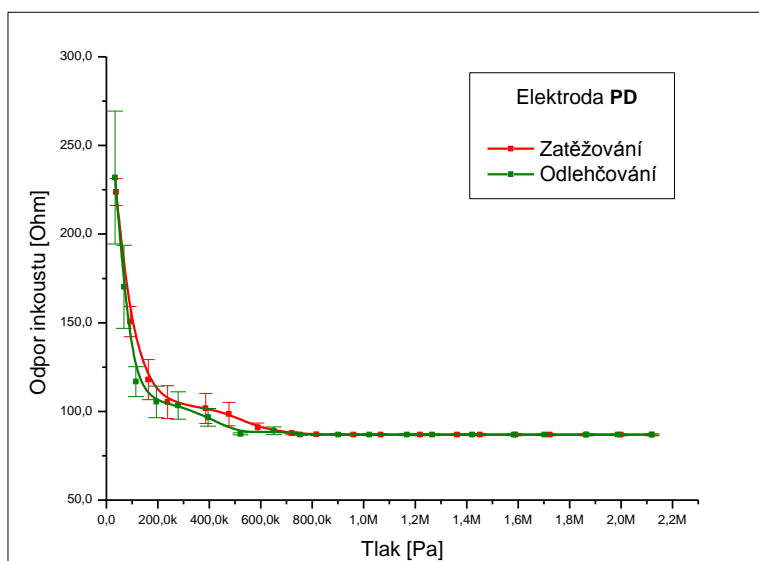
Při střední tloušťce inkoustu 15 µm je výrazný pokles rozsahu odporu na všech typech elektrod oproti tloušťce nejtenčí 7 µm.



*Graf. 14 Závislost odporu inkoustu tl. 15 µm na tlaku z měření elektrody LH*

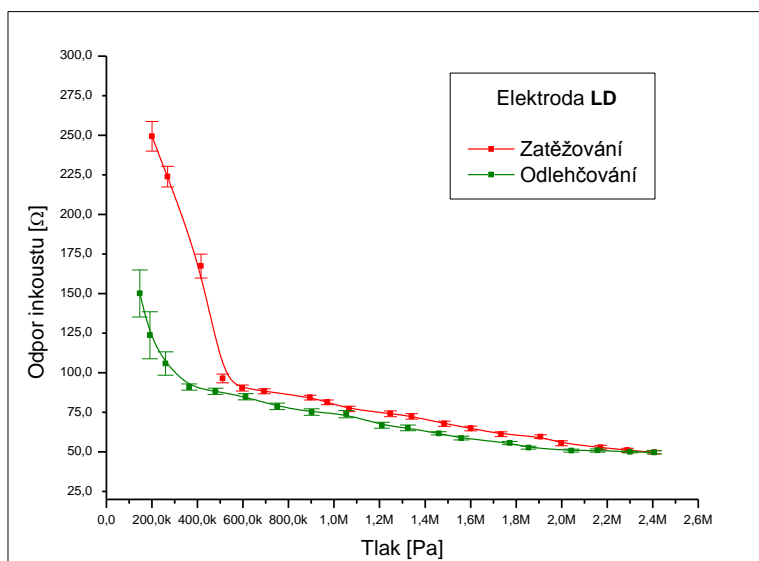
## 6.4 Tloušťka vodivého inkoustu 23 $\mu\text{m}$

Postup měření je popsán v kapitole 5.3. Podrobný výčet všech dat z tohoto měření je uveden v příloze. Měření na elektrodě PD, viz. Graf 15, při největší tloušťce inkoustu vykazuje poměrně vysokou citlivost, průměrně od hodnot tlaku 37,6 kPa, což odpovídá síle 0,27 N. Odpor výrazněji klesá do tlaku 720,25 kPa a od této hodnoty, přestane reagovat na zvyšující se tlak. Lze konstatovat, že inkoust na elektrodě PD, který má nejvyšší tloušťkou téměř nereaguje na velikost tlaku. Celkově je závislost nelineární a hystereze téměř nulová.



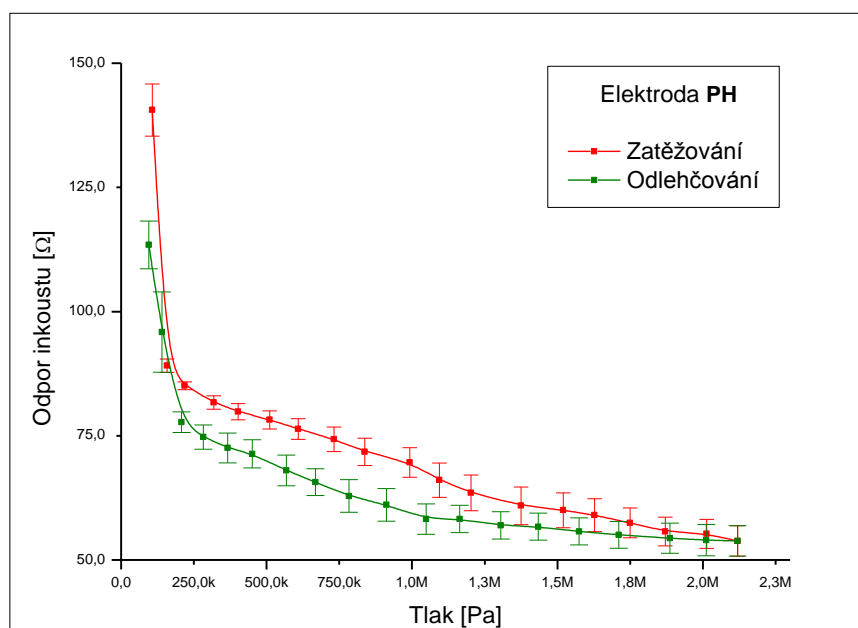
Graf. 15 Závislost odporu inkoustu tl. 23  $\mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PD

Elektroda LD, viz. Graf 16, má průběh podobného charakteru jako elektroda PD. Odpor se začal měnit až od průměrného tlaku 41,7 kPa. A od tlaku 169,4 kPa se změna odporu inkoustu téměř zastavila.



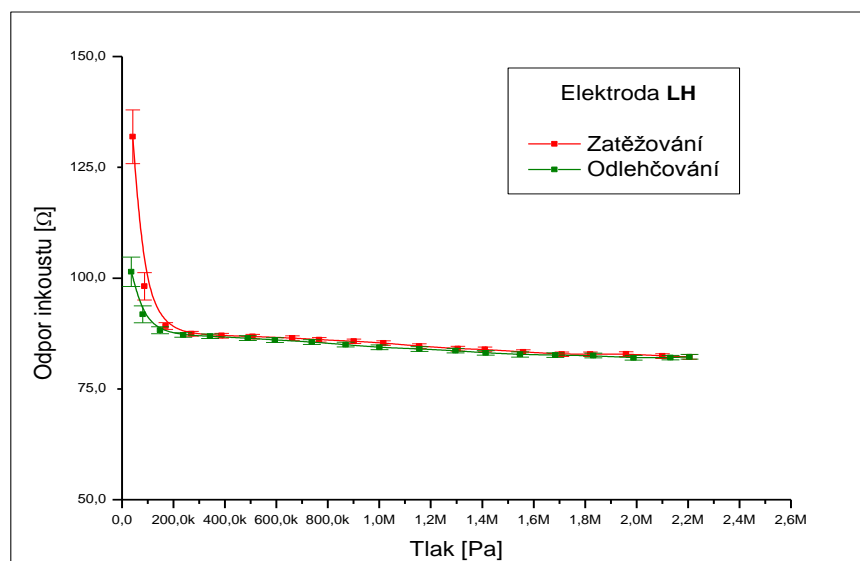
Graf. 16 Závislost odporu inkoustu tl. 23  $\mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LD

Měření na elektrodě PH ukázalo potřebu vyvinout větší tlak, než vodivý inkoust začal reagovat, citlivost je tedy nižší, viz. Graf 17. Odpor se začal měnit až od průměrného tlaku 107,1 kPa. To je způsobené s největší pravděpodobností menší styčnou plochou mezi elektrodami a vodivým inkoustem a je tak zapotřebí většího tlaku. Průběh vykazuje hysterezi a nelineárnost a lze konstatovat jako u předešlé elektrody PD a LD, že na inkoust s nejvyšší tloušťkou na elektrodě PH od tlaku téměř nereaguje na změnu velikosti tlaku.



Graf. 17 Závislost odporu inkoustu tl. 23 µm na tlaku z měření elektrody PH

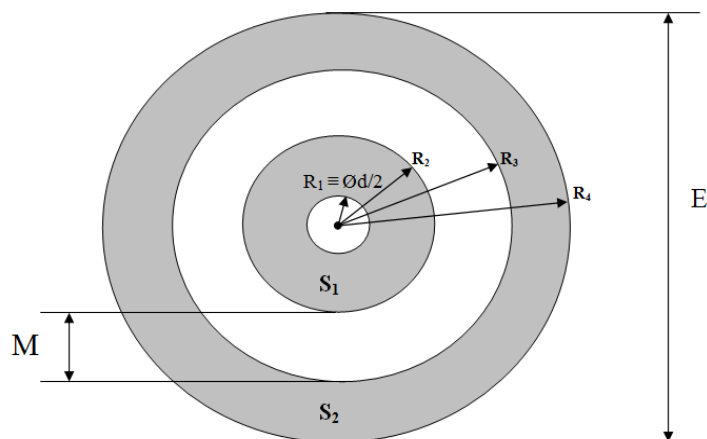
Elektroda LH, viz. Graf 18, má průběh podobného charakteru jako elektroda PH. Odpor se začal měnit až od průměrného tlaku 200,3 kPa. Odpor se nejdříve skokově změní a poté se mění už jen velice minimálně.



Graf. 18 Závislost odporu inkoustu tl. 23 µm na tlaku z měření elektrody LH

## 6.5 Vyhodnocení naměřených dat

Pro vyhodnocení optimální kombinace tloušťky inkoustu a měřící elektrody je zapotřebí uvést velikosti ploch použitých elektrod a jejich výpočty. Rozměry elektrod a výpočty vycházejí z práce [16].



Obr. 41 Rozměry elektrod (šedá barva představuje plochu elektrod)

Tab. 14 Rozměry jednotlivých druhů elektrod a jejich obsahy

typ elektrod	E [mm]	d [mm]	M [mm]	R <sub>1</sub> [mm]	R <sub>2</sub> [mm]	R <sub>3</sub> [mm]	R <sub>4</sub> [mm]	Typ elektrod	S <sub>1</sub> [mm <sup>2</sup> ]	S <sub>2</sub> [mm <sup>2</sup> ]	S [mm <sup>2</sup> ]
LH	2	0,4	0,1	0,2	0,45	0,55	1	LH	0,511	2,191	2,702
PH	2	0,1	0,1	0,05	0,45	0,55	1	PH	0,628	2,191	2,820
LD	2,5	0,4	0,25	0,2	0,5	0,75	1,25	LD	0,660	3,142	3,801
PD	2,5	0,1	0,25	0,05	0,5	0,75	1,25	PD	0,778	3,142	3,919

Výpočet jednotlivých poloměrů vycházející z hodnot Tab. 13. potřebných pro výpočet plochy elektrod.

$$R_1 = \frac{d}{2} \quad (20) \quad S_1 = \pi \cdot (R_2 - R_1)^2 \quad (24)$$

$$R_2 = \frac{E}{4} - \frac{M}{2} \quad (21) \quad S_2 = \pi \cdot (R_4 - R_3)^2 \quad (25)$$

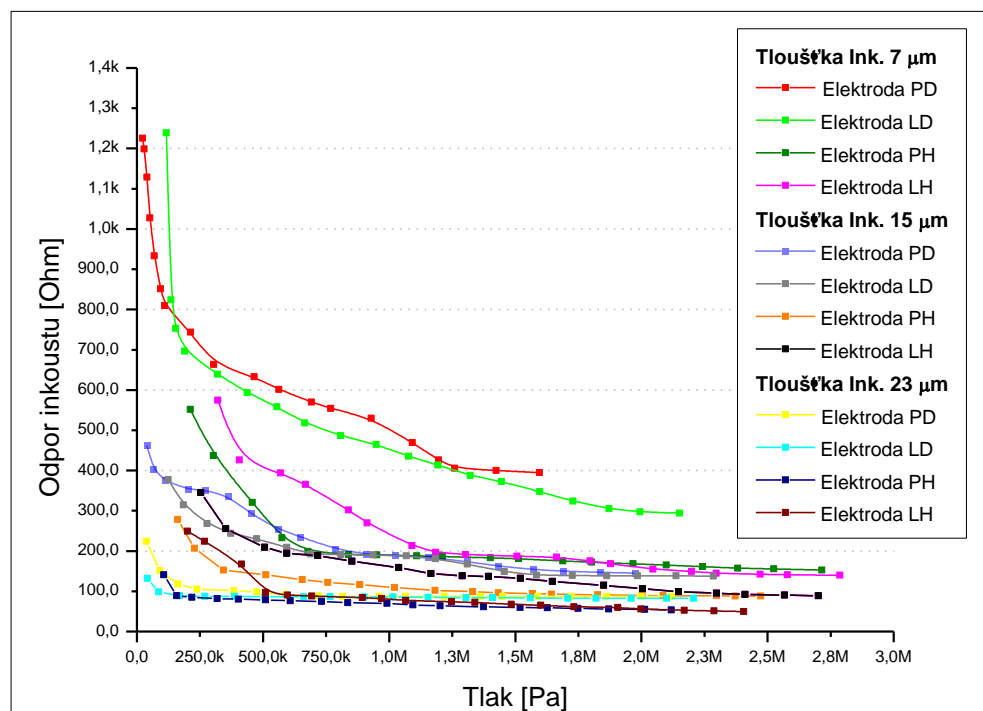
$$R_3 = \frac{E}{4} + \frac{M}{2} \quad (22) \quad S = S_1 + S_2 \quad (26)$$

$$R_4 = \frac{E}{2} \quad (23)$$

## 6.5.1 Vliv tloušťky inkoustu a velikosti plochy elektrod na vlastnosti taktilního snímače

Nejdříve je důležité říci, že použitý vodivý inkoust prokázal piezorezistivní chování. Při zvyšujícím se tlaku se snižuje elektrický odpor, i když v některých případech minimálně. Po provedeném měření na všech typech elektrod lze konstatovat, že jejich rozdílná plocha ovlivňuje práh, od kterého začne odpor klesat při působení tlaku. Menší plocha elektrod tedy v praxi znamená potřebu působit větším tlakem na fólii s vodivým inkoustem. Názorně tuto skutečnost zobrazuje *Graf. 19*. Pokud porovnáme vždy proti sobě křivky elektrod PD/LD, které mají stejný celkový průměr ale rozdílnou plochu a křivky PH/LH, které mají také rozdílnou plochu a stejný průměr ovšem o 0,5 mm menší než PD/LD, tak u kterékoli ze tří tloušťek inkoustu lze pozorovat rozdíl v počátečním tlaku. Například při tloušťce inkoustu 7  $\mu\text{m}$  reaguje elektroda PD na tlak o 94 kPa menší než elektroda LD.

Další vliv, který má rozdílná plocha elektrod je posun charakteristiky směrem dolů do nižších poloh hodnot odporu. Vezměme například elektrody PD/LD kde je změna nejvýraznější a porovnejme jejich charakteristiky z elektrodami PH/LH při tloušťce inkoustu 7  $\mu\text{m}$ . Měření na elektrodách PH/LH které mají cca o 1 mm<sup>2</sup> menší plochu než pár elektrod PD/LD ukázal posun křivek o více než 600  $\Omega$  směrem k nule. Na těchto elektrodách PH/LH se navíc změna odporu inkoustu neděje v celém rozsahu zatěžování.



*Graf. 19* Závislosti el.odporu na tlaku všech druhů elektrod a tloušťek inkoustu

Tento posun charakteristiky lze pravděpodobně přisuzovat malé styčné ploše elektrod s inkoustem. Toto tvrzení lze vysvětlit následovně a vychází z práce [16], kde testovali vliv styčné plochy vodivého elastomeru na elektrický odpor. Inkoust při zatěžování postupně dosedá na plochu elektrod a vytváří tak mezi nimi vodivé spojení. Při dosedání inkoustu na elektrody vlivem zatěžování vzniká větší styčná plocha, kontaktní odpor se snižuje a vytvářejí se tak lepší vodivé podmínky, což se vyznačuje poklesem odporu. Plocha elektrod PH/LH je ale menší než u elektrod PD/LD, což vyžaduje větší působení tlaku, aby se vytvořila dostatečná styčná plocha a odpor začal klesat. Díky větší potřebě působícího tlaku je zaznamenána menší hodnota odporu než u elektrod z větší plochou. Při menší ploše elektrod inkoust v jeden moment dosedne, což představuje počátek křivek měření, ale za působení většího tlaku než u elektrod s větší plochou, proto je viditelný posun počátečních hodnot odporu. Na elektrody s větší plochou inkoust vytvoří vodivé spojení za působení menšího tlaku díky větší styčné ploše. K měřitelné změně odporu dojde tedy dříve, a proto jsou počáteční hodnoty odporu větší.

**Obecně lze o vlivu plochy elektrod na změnu odporu vodivého inkoustu při působení tlaku rozhodnout, že čím je styčná plocha elektrody s vodivým inkoustem větší tím je citlivost měření vyšší.**

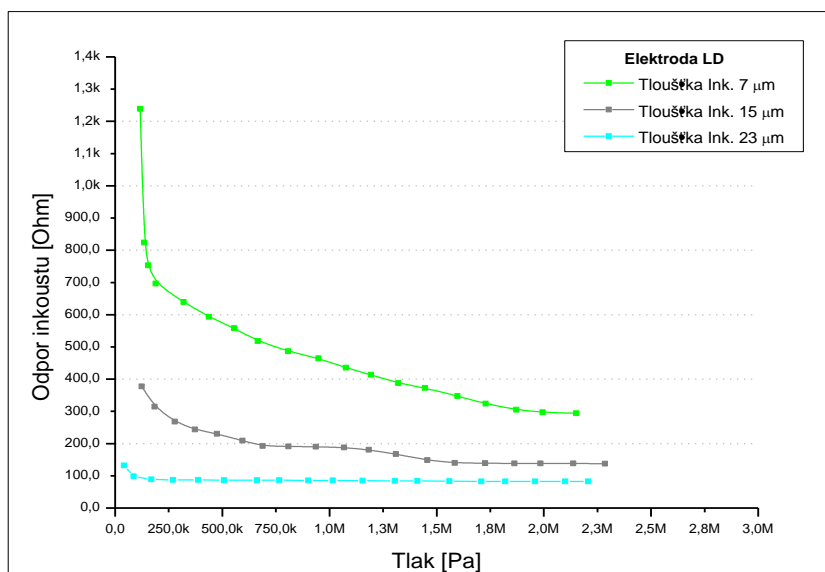
Testovány byly tři tloušťky inkoustu 7  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  a poslední 23  $\mu\text{m}$ . Tudiž rozdíly v tloušťkách inkoustu jsou od sebe stejné vždy o 8  $\mu\text{m}$ . Tloušťka inkoustu výrazně ovlivňuje závislost, viz. *Graf.19*, elektrického odporu inkoustu na tlaku. Větší vrstva vodivého inkoustu na fólii dosedající na povrch elektrod, má za následek výrazný pokles odporu v celém rozsahu a také schopnosti inkoustu měnit svůj elektrický odpor na působící tlak. Toto chování lze pravděpodobně vysvětlit následovně: Silnější vrstva inkoustu obsahuje více vodivých částic a při působení tlaku se vlivem elastorezistivního chování popsaného v kapitole 2.3.2, vytvoří více vodivých drah pro průchod elektrického proudu. Více vodivých drah znamená nižší odpor měřitelný na elektrodách. Díky silnější vrstvě inkoustu se rychleji dostaví mez, od které se již odpor v závislosti na tlaku nemění. Příčinou je vyšší obsah vodivých částic v inkoustu. Pokud je jich méně tak s přibývajícím tlakem se vytvářejí vodivé cesty postupně, ale u větší tloušťky kde je částic více dojde k přiblížení částic a tím k vytvoření vodivých cest při nižším tlaku. Pokud je tlak zvyšován, k většímu přiblížení částic už nedochází. Toto chování vykazuje tloušťka inkoustu 15  $\mu\text{m}$  a nejvíce tloušťka 23  $\mu\text{m}$ . Například měření při tloušťce 23  $\mu\text{m}$  na elektrodě PH viz *Graf. 19*, ukazuje pouze



drobný pokles odporu na začátku zatěžování ale dále je průběh závislosti konstantní přibližně na jedné hodnotě odporu.

**Celkově lze konstatovat, že čím větší vrstva vodivého inkoustu, tím je schopnost inkoustu měnit svůj elektrický odpor při zvětšujícím tlaku menší. Tloušťka inkoustu tedy mění rozlišovací schopnost a vodivost měřícího bodu.**

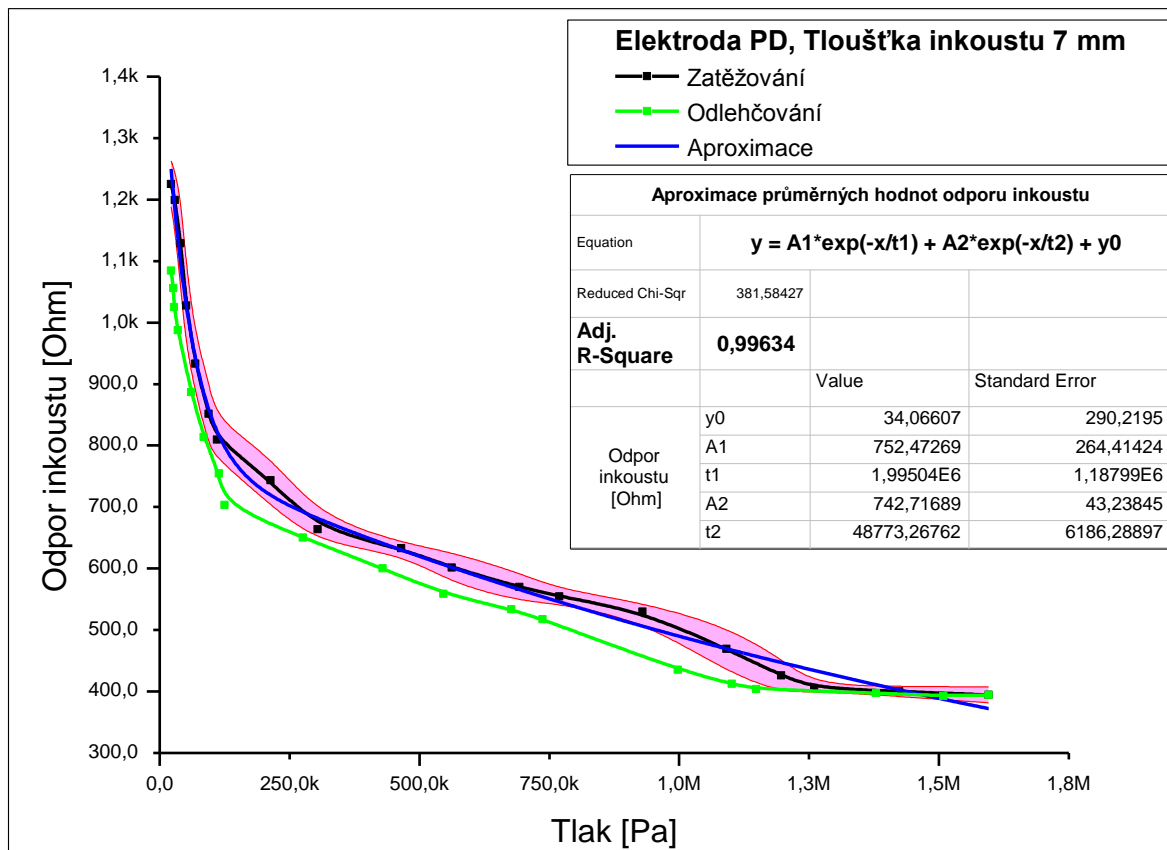
Pro ukázkou vlivu tloušťky inkoustu na průběh změny odporu při zatěžování, viz. Graf. 20, je zde uveden demonstrativní příklad na jedné měřící elektrodě typu LD.



Graf. 20 Příklad vlivu tloušťky inkoustu na změnu odporu na elektrodě PD

### 6.5.2 Nejvhodnější kombinace elektrody a tloušťky vodivého inkoustu

Po porovnání a zhodnocení výsledných závislostí odporu na tlaku z jednotlivých měření, byla zvolena jako nepřijatelnější elektroda PD a LD při nejtenčí tloušťce inkoustu 7 μm. Tato kombinace elektrod a tloušťky inkoustu vykazuje alespoň částečný lineární charakter, nejlepší citlivost a rozlišovací schopnost ze všech měřených kombinací. Elektrody PD a LD mají stejný celkový průměr 2,5 mm. Plocha vnější elektrody je stejná a vnitřní má u elektrody PD oproti LD větší plochu o 0,118 mm<sup>2</sup>. Elektroda PD je v porovnání z LD o něco citlivější ale její křivka při zatěžování, viz. Graf. 20, má mírnou tendenci se vychýlovat od svého trendu. Měření na elektrodě LD má průběh, viz. Graf. 21, podobný jako elektroda PD, na začátku je patrná prudká změna odporu inkoustu, ale dále závislost pokračuje bez větších výchylek. Prudká změna odporu při počátečních zatěžování představuje postupné dosedání vrstvy inkoustu na povrch elektrod. Oba dva typy elektrod byly podrobeny aproximaci s vyznačením oblasti odchylek (růžová oblast grafu), kde se může vyskytovat reálná hodnota odporu. Data byla zpracována v programu Origin 8.5.1.

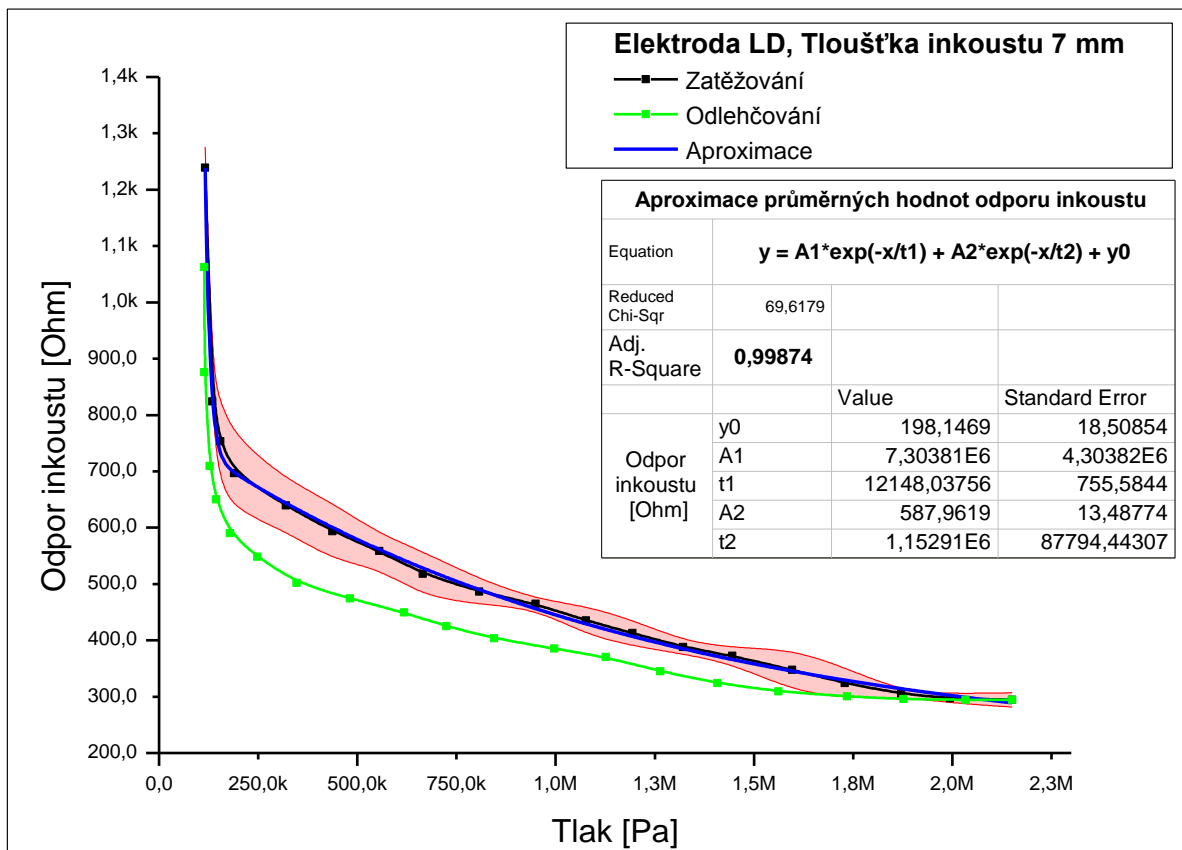


Graf. 21 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě PD s vyznačenou oblastí odchylky

Tab. 15 Průměrné hodnoty z měření elektrody PD při tloušťce inkoustu 7 μm (Ua, Uc - nejistoty)

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,16	22,15	1225,41	11,76	13,64	37,19
0,20	28,92	1199,14	14,77	16,09	46,72
0,28	40,01	1128,56	22,76	23,54	71,97
0,36	51,24	1027,37	20,59	21,08	65,12
0,48	68,66	932,94	14,62	15,58	46,24
0,66	94,03	851,32	16,04	16,81	50,72
0,78	110,18	809,42	9,70	10,91	30,69
1,51	213,62	743,29	12,62	13,27	39,90
2,15	304,19	663,74	7,00	7,93	22,15
3,28	465,13	632,62	2,73	4,60	8,65
3,97	562,73	601,49	8,01	8,74	25,34
4,89	692,59	569,68	7,23	8,01	22,86
5,43	769,01	554,23	3,73	4,94	11,81
6,56	929,51	529,97	4,53	5,51	14,32
7,71	1091,46	469,09	11,58	12,08	36,61
8,45	1196,44	425,90	8,69	9,17	27,48
8,90	1260,27	405,69	1,61	2,86	5,10
10,05	1424,05	400,22	2,53	3,43	8,00
11,26	1595,49	394,53	4,03	4,58	12,75

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,16	22,10	1084,55	11,50	13,04	36,36
0,18	26,00	1055,73	12,49	13,78	39,49
0,19	27,46	1025,16	12,43	13,67	39,31
0,25	35,29	987,29	13,64	14,82	43,12
0,43	60,67	886,80	10,70	11,95	33,84
0,60	84,86	814,02	15,43	16,58	48,80
0,81	114,16	754,64	12,54	13,48	39,66
0,88	125,17	703,19	8,57	9,53	27,10
1,95	275,85	650,43	6,88	7,79	21,74
3,03	429,40	600,05	8,29	9,02	26,22
3,86	546,31	558,59	3,21	4,58	10,16
4,78	677,22	533,75	3,45	4,64	10,91
5,20	736,86	517,51	2,52	3,94	7,98
7,04	997,63	435,51	4,85	5,44	15,34
7,77	1101,00	412,36	3,40	4,20	10,75
8,11	1148,11	403,96	1,84	2,99	5,83
9,74	1378,97	397,81	3,11	3,87	9,84
10,65	1509,02	392,55	4,63	5,14	14,64
11,26	1595,49	394,53	4,03	4,58	12,75



Graf. 22 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě LD s vyznačenou oblastí odchytky

Tab. 15 Průměrné hodnoty z měření elektrody LD při tloušťce inkoustu 7 μm (Ua, Uc - nejistoty)

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,81	116,29	1238,92	59,73	61,245	188,90
0,91	134,84	824,08	14,36	14,900	45,41
1,02	154,39	752,93	13,49	14,462	42,67
1,26	189,24	696,80	19,51	19,381	61,70
1,75	320,11	639,40	17,93	18,217	56,71
2,45	437,25	593,49	18,84	18,719	59,58
3,40	555,10	558,26	15,74	15,878	49,78
4,36	665,44	518,02	16,18	16,353	51,15
5,11	807,08	486,30	14,90	14,732	47,10
5,96	949,29	464,96	14,18	14,156	44,84
7,04	1 076,77	435,42	14,83	15,384	46,90
7,95	1 193,34	413,11	13,69	14,120	43,28
8,92	1 321,95	387,92	12,44	12,166	39,33
9,94	1 445,18	372,61	14,04	13,293	44,39
11,03	1 596,74	347,63	12,98	12,786	41,05
12,25	1 729,32	324,19	8,50	8,848	26,87
13,25	1 871,10	304,86	3,43	3,883	10,83
14,36	1 994,48	296,98	1,43	2,248	4,51
15,19	2 150,99	294,33	1,01	1,990	3,18

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,82	114,73	1062,39	67,55	67,13	213,62
0,95	128,19	875,55	60,30	60,88	190,67
1,09	144,05	709,70	26,96	27,53	85,26
1,34	179,04	650,00	28,65	29,60	90,59
2,26	247,59	590,44	19,18	19,49	60,66
3,09	347,03	548,59	19,09	19,79	60,36
3,92	481,44	501,86	16,17	16,04	51,13
4,70	617,71	474,15	14,74	14,49	46,61
5,70	724,22	449,41	13,24	13,35	41,88
6,70	844,62	425,24	10,29	10,78	32,53
7,60	996,60	403,23	8,75	8,97	27,68
8,43	1126,35	385,34	10,70	10,49	33,85
9,33	1263,60	370,17	10,62	10,51	33,60
10,20	1408,36	345,12	10,66	10,86	33,71
11,27	1561,90	324,10	8,21	8,50	25,96
12,21	1735,27	309,35	4,66	5,04	14,72
13,21	1876,63	300,60	2,93	3,44	9,27
14,08	2034,14	295,38	1,21	2,11	3,84
15,19	2150,99	294,33	1,01	1,99	3,18

## 7 ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ PRO ZLEPŠENÍ

### Metoda aplikace vodivého inkoustu

Pro měření vlivu vodivého inkoustu na taktilní snímač bylo nejdříve zapotřebí zvolit způsob jak inkoust aplikovat na povrch měřících elektrod. Spotřeba vodivého inkoustu přitom musela být při testování nanášení co nejmenší, kvůli jeho vysoké ceně. Důležitý při volbě metody byl požadavek na vytvoření co nejvíce homogenního povrchu inkoustu a také zajištění možnosti vytvoření rozdílných tloušťek nanesené vrstvy. Dalším požadavkem bylo nanášet inkoust pouze na plochu jednotlivých kruhových elektrod.

Byla zvolena metoda využívající stříkácí pistoli určenou pro tzv. "airbrush". Pistole umožňuje velice jemný rozstřík inkoustu, dobrou regulaci intenzity rozstříku a je schopna rozstříkovat velice malé množství média, které má v zásobníku. Jemnost rozstříku lze ovlivnit výměnou jehel různých průměrů uvnitř pistole definující velikost trysky, skrz kterou je rozstříkovan inkoust. Metoda zaručuje vytvoření poměrně dobré homogenity nastříkaného inkoustu. Aplikovat inkoust jenom na určitý povrch zajišťuje šablona s kruhovými otvory. Schopnost vyrobit různé tloušťky inkoustu zajišťuje dávkování určitého počtu malých časově definovaných nástřiků po sobě. Použití této metody ovlivňuje hustota použitého vodivého inkoustu. Příliš hustý inkoust neprojde skrz trysku.

### Volba vodivého inkoustu

Počáteční návrh byl nanést vodivý inkoust přímo na povrch měřících elektrod. To sebou přináší řadu problémů nutných k zohlednění při výběru druhu vodivého inkoustu. Při testování se projevíly jako nevhodné inkousty založené na vodní bázi. Díky jejich složení je lze dobře rozstříkovat, ale tyto inkousty nejsou schopny přilnout k nesavým povrchům. Další testovaný inkoust měl naopak velkou hustotu, tudíž ucpával stříkácí pistoli. Tento problém byl ale úspěšně vyřešen naředěním inkoustu společně s vodou v poměru 1:1. Jeho přilnavost k elektrodám v ředěném i neředěném stavu byla výrazně lepší než u inkoustů založených na vodní bázi. Ovšem jeho integrita po zaschnutí na elektrodě byla stále velice nízká a při sebemenším mechanickém působení měl inkoust tendenci se odlupovat od povrchu elektrod. Díky těmto problémům byl nakonec opuštěn původní záměr nanést inkoust přímo na elektrody a přistoupilo se na alternativní řešení a to použití fólie jako nosný podklad pro inkoust.

Výše popsané problémy ukazují, že výběr vhodného inkoustu, ale také charakter povrchu elektrod je velice důležitý pro úspěšnou aplikaci na jejich povrch. Vodivý inkoust by měl po zaschnutí na povrchu elektrod vytvořit pevný kontakt, aby odolával působení

mechanických vlivů při používání na taktilním snímači. Před vlastním nánosem inkoustu je vhodné povrch upravit tak, aby se co nejvíce zvýšila schopnost přilnutí inkoustu. Každý povrch má totiž svoji specifickou povrchovou energii měnící se v závislosti na materiálu a každý inkoust má své jedinečné vlastnosti, které ovlivňují povrchovou energii daného podkladu. Důležité faktory jsou úhel smáčení a povrchové napětí, které jsou jedním z měřítek pro dobré přilnutí inkoustu na elektrodách. Doporučení pro další experimenty by mohlo být obohacení vodivého inkoustu o nějaký druh lepidla, který by mohl výrazně zlepšit jeho soudržnost s elektrodami a celkovou odolnost. Ovšem přidání další látky do inkoustu může mít negativní dopad na jeho vodivost a piezorezistivní chování. Celkově se jedná o problémy, které spíše spadají do materiálového inženýrství, a při dalším vývoji by bylo vhodné navázat spolupráci s některými pracovišti zabývajícími se např. materiálovým tiskem. Jako vhodnou studii pro další vývoj lze doporučit diplomovou práci [28] zabývající se modifikací povrchů substrátů pro materiálový tisk.

Vodivost inkoustu také hraje velkou roli při jeho výběru. Primárně je vývoj vodivých inkoustů zaměřen na použití jako náhrada za kovové vodivé spoje v elektronice, tudíž obecně je snaha vyrobit inkoust s co nejvyšší vodivostí. Vodivý inkoust, který bude sloužit jako převodník síly na elektrický odpor v taktilním senzoru, by měl vykazovat jen částečnou vodivost a při působení zatěžující síly by ji měl zvyšovat. Například inkoust s vodivými nanočásticemi stříbra použitý v této práci vytvořil mezi měřícími elektrodami v podstatě vodivé spojení s odporem pouze v jednotkách  $\Omega$ . Saturace inkoustu vodivými částicemi hraje velkou roli v jeho vodivosti. Obecně lze doporučit inkousty spíše s menší vodivostí.

### **Měření vlivu vodivého inkoustu na vlastnosti taktilního snímače**

Metoda spočívala v zatěžování vždy jednoho druhu elektrod s určitou tloušťkou vodivého inkoustu naneseného na fólii, která byla přitlačována proti povrchu elektrod. Při zatěžování byla měřena změna elektrického odporu inkoustu na elektrodách. Měření zatížení zajišťoval tenzometrický snímač síly, který byl velice citlivý a lze ho doporučit. Vlastní generování zatěžující síly bylo prováděno ramenem robota BOSCH Turbo Scara SR60. Robot má toleranci polohování 0,025 mm, která se ukázala jako zásadní pro přesné změření hystereze taktilního snímače. Přesnou velikost hystereze lze změřit jen tehdy, jsou-li zajištěny stejné hodnoty tlaku při zatěžování a odlehčování. Vlivem nepřesnosti polohování robota nemohla být tato podmínka splněna, což mělo za následek ne příliš přesné výsledky hystereze. Nepřesnost zatěžování byla v průměru maximálně 0,5 N. Při

použití měřicího hrotu o průměru 3 mm, to představuje tlak 70,8 kPa. Chyba je tedy poměrně markantní, a proto pro přesné měření není tato metoda příliš přesná. Doporučení pro zlepšení je použít robota s přesnějším polohováním nebo zcela jiné metody, jakou jsou pneumatické systémy, kde zatěžování měřících bodů probíhá přes membránu.

Dalším faktorem ovlivňujícím měření změny odporu vodivého inkoustu při zatěžování je zvolení fólie jako nosné podložky pro vodivý inkoust. Fólie má svoji určitou tloušťku, tuhost, drsnost atd. Všechny tyto faktory ovlivňují rozložení zatěžující síly na elektrodách, citlivost, hysterezi díky pružnosti fólie, a mnohé další. Použitá fólie nesmí být moc tenká, aby nedocházelo k příliš velkému ohybu, který by mohl narušit strukturu inkoustu. V této práci byla použita fólie o tloušťce 0,3 mm, na které inkoust spolehlivě držel i po několika týdnech. Použití fólie lze tedy doporučit. Pro budoucí vývoj je tloušťka fólie dalším faktorem ovlivňujícím chování taktilního snímače a otevírá se prostor pro testování dalších materiálů, které by sloužily jako nosný podklad pro vodivý inkoust.

## 8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo změřit vliv vodivého inkoustu na vlastnosti taktilního snímače. Vodivý inkoust umožňuje být díky svému piezorezistivnímu chování použit jako převodník síly na elektrický odpor. Měřicí elektrody pro vodivý inkoust pocházejí z vývoje přístroje Pantograf V12 a mají čtyři různě velké plochy. Cílem bylo také vytvořit odlišně silné vrstvy inkoustu a zjistit jejich vliv v kombinaci s různými plochami elektrod na změnu elektrického odporu inkoustu v závislosti na zatěžující síle.

Původní záměr byl aplikovat vodivý inkoust přímo na povrch kruhových měřících elektrod a vytvořit tak kompaktní neoddělitelný celek. Pro nanášení inkoustu bylo sestrojeno aplikační zařízení se speciální stříkací pistolí, umožňující nanášení vodivého inkoustu skrz kruhovou šablonu na povrch elektrod po malých a relativně přesných dávkách. Tím bylo docíleno vytvoření různých tloušťek inkoustu. Otestovány byly čtyři druhy vodivých inkoustů různých charakterů. Inkousty založené převážně na vodní bázi se ukázaly jako nevhodné, neboť nebyly schopné vytvořit celistvou vrstvu a po zaschnutí zůstaly na povrchu pouze sraženiny vodivých částic, kterými byl inkoustu saturován. Nejvhodnějším inkoustem byl karbonový model DZT-3K. Po aplikaci inkoustu na povrch elektrod ale vykazoval velice malou odolnost při mechanickém namáhání a byla tak zvolena alternativní metoda nanést inkoust na podklad z fólie, který byl přiložen na povrch elektrod.

Měření závislosti změny elektrického odporu inkoustu na velikosti zatížení probíhalo pomocí robotického ramene. Nejlepší výsledky vykazují měřicí elektrody s větší plochou s označením PD a LD, při tloušťce inkoustu 7  $\mu\text{m}$ . Tato kombinace elektrod a tloušťky inkoustu vykazuje nejlepší citlivost, rozlišovací schopnost a částečný lineární charakter. Větší tloušťka inkoustu zvyšuje vodivost měřícího bodu a tím snižuje jeho rozlišovací schopnost. Elektrody s menší plochou reagují až na vyšší hodnoty tlaku a snižují tak citlivost měřícího bodu. Všechny měření vykazují hysterezi způsobenou především nepřesností polohování robota a dále relaxací inkoustu a fólie.

Vodivý inkoust není běžný materiál používaný v taktilních senzorech a neexistuje zatím mnoho studií zabývajících se touto problematikou. Práce tedy měla za úkol podat náhled na chování jednoho typu vodivého inkoustu. Měření bylo prokázáno, že je schopen být převodníkem síly na elektrický odpor, jeho použití ale ovlivňuje mnoho faktorů a zvolení nejvhodnějšího vodivého inkoustu není jednoduché. Velkým problémem je soudržnost inkoustu na povrchu elektrod. Řešení jak nalézt správné složení inkoustu lze vidět v navázání spolupráce s pracovišti z oboru chemie a materiálového inženýrství.

## 9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VOLF, J. *Profesorské přednášky. Taktilní sensory a jejich využití v robotice a biomechanice*. Vydavatelství ČVUT. Praha 2008. ISBN 978-80-01-04082-9
- [2] LEE, M.H., NICHOLLS, H.R. *Review Article Tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey: The Science of Intelligent Machines*. Mechatronics. 1999, vol. 9, issue 1, s. 1-31.
- [3] FRADEN, J. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, 2010, 663 s. ISBN 978-1-4419-6465-6
- [4] SICILIANO, Bruno. *Springer handbook of robotics*. 1st ed. New York, NY: Springer Heidelberg, 2007, Chapter 19: *Force and Tactile Sensors*. ISBN 9783540239574.
- [5] LEE, M.H. *Tactile sensing: New directions, new challenges*. The International Journal of Robotics Research. 2000.vol.19, no.7,s. 636-643
- [6] HARMON, L.D. *Automated Tactile Sensing*. The International Journal of Robotics Research. 1982-06-01, vol. 1, issue 2, s. 3-32.
- [7] R. E. SAAD., et. al. *Tactile Sensing*. 2000 CRC Press LLC
- [8] DĚD, P. *Měření a zpracování biomechanických signálů*. Disertační práce. ČZU, 2010
- [9] GOETHALS, P. *Tactile Feedback for Robot Assisted Minimally Invasive Surgery: an Overview*. 2008 Division PMA Department of Mechanical Engineering K. U. Leuven July, 14, 2008
- [10] KIM, K. *Polymer-based flexible tactile sensor up to 32×32 arrays integrated with interconnection terminals*. Sensors and Actuators A: Physical. 2009, vol. 156, issue 2, s. 284-291. ISSN: 0924-424
- [11] KODER, P. *Snímač pro měření rozložení tlaku v obuvi*. Diplomová práce. ČZU, 2010
- [12] WEISS, K., WORN, H. *The working principle of resistive tactile sensor cells*. 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automations, vol. 1-4, Conference Proceedings, s. 471-476, ISBN: 0-7803-9044-X
- [13] GREENWOOD, J.A., WILLIAMSON, J.B.P. *Contact of nominally flat surfaces*. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 295(1442), s. 300-319, 1966.



- [14] ASTELLANOS-RAMOS, J., NAVAS-GONZÁLEZ, R., et. al. *Tactile sensors based on conductive polymers*. *Microsystem Technologies*. 2010, vol. 16, issue 5, s. 765-776. ISSN: 0946-7076
- [15] CHENG, M.Y., LIN, C.L., LAI, Y.T., YANG Y.J., OCHOTECO, E., VIDAL-VERDÚ., F. *A Polymer-Based Capacitive Sensing Array for Normal and Shear Force Measurement*. *Sensors*. 2010, vol. 10, issue 11, s. 10211-10225
- [16] TRINKL, A. *Optimalizace konstrukce plošných taktilních snímačů*. Disertační práce. ČZU Praha, 2011
- [17] SEMINARA, L., et. al. *Piezoelectric Polymer Transducer Arrays for Flexible Tactile Sensors*. *IEEE Sensors Journal*. 2013, vol. 13, issue 10, s. 4022-4029. ISSN: 1530-437X
- [18] VOLF, J. *Taktilní senzory pro automatizaci*. Automa. 2008.
- [19] RAVINDER, S., et. al. *Tactile Sensing for Robotic Applications*. *Sensors: Focus on Tactile Force and Stress Sensors*. InTech, 2008-12-01, vol. 13, issue 10, s. 4022-4029. ISSN: 1530-437X
- [20] MEI, J., *Formulation and processing of conductive inks for inkjet printing of electrical components*. Doctoral Dissertation. University of Pittsburgh, 2005
- [21] KIPPHAN, H. *Handbook of print media: technologies and production methods*. New York, 2001, s. 1207. ISBN 35-406-7326-1.
- [22] HLADÍK, J. *Zhotovení druhé vodivé vrstvy na jednovrstvé dps*. Bakalářská práce. VUT Brno, 2006
- [23] JANALÍK, J. *Viskozita tekutin a její měření*. VŠB TU Ostrava, 2010
- [24] VOLF, J., JENČÍK, J., a kol. *Technická měření*. Vydavatelství ČVUT, 2003
- [25] SCOTT, Chris E. *Polymer procesing* [online]. 2000 [cit. 2014-02-25]. Overview of Spin Coating. Dostupné z WWW: <<http://www.polymerprocessing.com/feature/past/Y2000x12x01/index.html>>.
- [26] SCHERRER, P. *Spin Coating* [online]. [cit. 2014-02-27]. Dostupné z WWW: <[http://materials.web.psi.ch/Research/Thin\\_Films/Methods/Spin.htm](http://materials.web.psi.ch/Research/Thin_Films/Methods/Spin.htm)>.
- [27] NIMA, K. [online]. [cit. 2011-02-17]. *Dip Coating*. Dostupné z WWW: <<http://www.ksvnima.com/dip-coating>>.
- [28] MAŠLÍK, J. *Modifikace povrchu substrátu pro materiálový tisk*. Diplomová práce. UTB Zlín, 2013
- [29] HODGES, S., et. al. *Instant inkjet circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices*. *Proceedings of the 2013 ACM interna-*

tional joint conference on Pervasive and ubiquitous computing - UbiComp '13. New York, USA: ACM Press, 2013, s. 363-373.

- [30] *Využití technologie inkoustového tisku pro přípravu mikro a nanostruktur I.* Ústav fyziky a měřicí techniky VŠCHT v Praze. Přednáška. [online]. [cit. 2014-03-25] <[http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/12\\_Vyuziti\\_technologie\\_inkoustoveho\\_tisku\\_pro\\_pripravu\\_mikro\\_a\\_nanostruktur1.pdf](http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/12_Vyuziti_technologie_inkoustoveho_tisku_pro_pripravu_mikro_a_nanostruktur1.pdf)>
- [31] TUHH. *Labor Mechatronik SS2008* [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.tuhh.de/ft2/wo/Vorlesungen/MechatronicLabor/MechatronicLaborAufgabenstellung.pdf>>
- [32] DATASHEET, *Stabilizátor napětí LM317*, [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM317.pdf>>
- [33] *Technologie předúpravy*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.tantec.cz/technologie>>
- [34] *Produktový katalog Ahloborn*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.almemo.co.kr/pdf/DATA%20COMMUNICATIONS/Input%20&%20Output.pdf>>
- [35] *Datasheet snímače síly DF2S-3*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.com.pl/arch/b1067.pdf>>

## SEZNAM OBRÁZKŮ:

- Obr. 1 Použití taktilní informace [4]
- Obr. 2 Obecná konfigurace taktilního pole na principu změny odporu [7]
- Obr. 3 Fóliový tenzometr [8]
- Obr. 4 Struktura jednoho snímacího elementu [10]
- Obr. 5 Flexibilní sensorové pole [10]
- Obr. 6 Princip perkolace elastorezistivního materiálu [9]
- Obr. 7 Elektrický obvod elastorezistivního materiálu na radiálních elektrodách [12]
- Obr. 8 Umístění vodivé gumy na radiálních elektrodách [12]
- Obr. 9 Detail změny kontaktní plochy elastorezistivního elementu [12]
- Obr. 10 Kapacitní taktilní pole [15]
- Obr. 11 Ukázka reakce snímače při namáhání normálovou a smykovou silou [15]
- Obr. 12 Konstrukce modulu piezoelektrického taktilního pole [17]
- Obr. 13 a) maticový vsrtvový mikroohybový snímač b) princip mikroohybů. [1]
- Obr. 14 Snímač se vzájemnou optickou vazbou [1]
- Obr. 15 Snímač se změnou vzájemné optické vazby [1]
- Obr. 16 Senzor s deformačním členem mění světelné vlastnosti podle velikosti zatížení [11]
- Obr. 17 optický senzor s pružným členem, vpravo senzor s průsvitným elastomerem [8]
- Obr. 18 vlevo - Špatná povrchová smáčivost; vpravo - Dobrá povrchová smáčivost [33]
- Obr. 19 Proces odstředivého lití [26]
- Obr. 20 Princip kontinuálního tisku [28]
- Obr. 21 Princip termálního inkoustového tisku [28]
- Obr. 22 Jednostranný obvod Arduina vytištěný na transparentní fólii [29]
- Obr. 23 Pásek kapacitního snímače připojený ke vstupu Arduina nano, měřící kapacitu pásku v závislosti na hladině ve sklenici [29]
- Obr. 24 KH WS SWCNT
- Obr. 25 Luxor
- Obr. 26 Nanočástice stříbra
- Obr. 27 Stříkáací airbrush pistole
- Obr. 28 Pistole uchycená do rámu
- Obr. 29 Schéma obvodu pro spínání kompresoru
- Obr. 30 Defekt vznikající na povrchu inkoustu naneseného na elektrodě
- Obr. 31 Ukázka pokusu nanášení vodivého inkoustu na povrch elektrod skr šablonu
- Obr. 32 Ukázka vzorku fólie s naneseným inkoustem různých tloušťek
- Obr. 33 Rozměry měřících elektrod
- Obr. 34 Robotizované pracoviště s robotem BOSCH Turbo Scara SR60. [16]
- Obr. 35 1) vodivý inkoust na fólii 2) měřící hrot 3) tenzometrický snímač síly DF2S-3 4) hlavice robota
- Obr. 36 Schéma vnitřního zapojení konektoru ALMEMO pro měření můstků [34]
- Obr. 37 Rozměry snímače
- Obr. 38 Schéma zapojení obvodu měřící odpor vodivého inkoustu
- Obr. 39 Uživatelské rozhraní aplikace měřícího systému
- Obr. 40 Blokový diagram aplikace měřícího systému v LabView
- Obr. 41 Detail fólie na elektrodách s naneseným vodivým inkoustem různých tloušťek
- Obr. 42 Pracoviště na měření vlastností vodivého inkoustu
- Obr. 43 Rozměry elektrod (šedá barva představuje plochu elektrod) [16]

## SEZNAM GRAFŮ:

- Graf. 1 Příklad hysterezní křivky  
Graf. 2 a) doba náběhu b) doba poklesu  
Graf. 3 Chyba opakovatelnosti, dva různě velké vstupní signály náleží stejnému výstupnímu signálu  
Graf. 4 Závislost rozdílů odporu na aplikované síle, a obnova hodnot odporu.  
Graf. 5 Závislost napětí na tlaku dvou typů elektrod kde je a) kruhová elektroda b) hřebenová elektroda  
Graf. 6 Náboje generované z jednotlivých PVDF taktilních bodů (TX 11,12,4,9) a jejich reakce na sílu s frekvencí ( $f = 6 \text{ Hz}$ )  
Graf. 7 Závislost odporu inkoustu tl.  $7 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PD  
Graf. 8 Závislost odporu inkoustu tl.  $7 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LD  
Graf. 9 Závislost odporu inkoustu tl.  $7 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PH  
Graf. 10 Závislost odporu inkoustu tl.  $7 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LH  
Graf. 11 Závislost odporu inkoustu tl.  $15 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PD  
Graf. 12 Závislost odporu inkoustu tl.  $15 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LD  
Graf. 13 Závislost odporu inkoustu tl.  $15 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PH  
Graf. 14 Závislost odporu inkoustu tl.  $15 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LH  
Graf. 15 Závislost odporu inkoustu tl.  $23 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PD  
Graf. 16 Závislost odporu inkoustu tl.  $23 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LD  
Graf. 17 Závislost odporu inkoustu tl.  $23 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody PH  
Graf. 18 Závislost odporu inkoustu tl.  $23 \mu\text{m}$  na tlaku z měření elektrody LH  
Graf. 19 Závislosti el.odporu na tlaku všech druhů elektrod a tloušťek inkoustu  
Graf. 20 Příklad vlivu tloušťky inkoustu na změnu odporu na elektrodě PD  
Graf. 21 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě PD s vyznačenou oblastí odchylky  
Graf. 21 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě LD s vyznačenou oblastí odchylky

## SEZNAM TABULEK:

- Tab. 1 Rozdílné tvary a plochy jednotlivých elektrod  
Tab. 2 Výhody a nevýhody jednotlivých typů taktilních senzorů  
Tab. 3 Technické parametry inkoustu  
Tab. 4 Technické parametry inkoustu  
Tab. 5 Technické parametry inkoustu  
Tab. 6 Specifikace stříkací pistole  
Tab. 7 Naměřené tloušťky jednotlivých vrstev (modře zvýrazněná měřicí fólie)  
Tab. 8 Technická data ALMEMO konektoru [34]  
Tab. 9 Technická data ústředny ALMEMO 2890 – 9 [34]  
Tab. 10 Technické parametry tenzometrického snímače Hottinger DF2S -3 [34]  
Tab. 11 Naměřená data při zatěžujícím tlaku  $26\,912,18 \text{ Pa}$  na elektrodě PD  
Tab. 12 Hodnoty pro výpočet nejistoty  $U_b$   
Tab. 13 Rozměry jednotlivých druhů elektrod a jejich obsahy  
Tab. 14 Průměrné hodnoty z měření elektrody PD při tloušťce inkoustu  $7 \mu\text{m}$  ( $U_a, U_c$  - nejistoty)  
Tab. 15 Průměrné hodnoty z měření elektrody LD při tloušťce inkoustu  $7 \mu\text{m}$  ( $U_a, U_c$  - nejistoty)



# PŘÍLOHA

## Měření při tloušťce inkoustu 7 μm

**Elektroda PD** Rozměry ØE=2,5mm, Ød=0,1mm, M=0,25mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,16	22,15	1225,41	11,76	13,64	37,19
0,20	28,92	1199,14	14,77	16,09	46,72
0,28	40,01	1128,56	22,76	23,54	71,97
0,36	51,24	1027,37	20,59	21,08	65,12
0,48	68,66	932,94	14,62	15,58	46,24
0,66	94,03	851,32	16,04	16,81	50,72
0,78	110,18	809,42	9,70	10,91	30,69
1,51	213,62	743,29	12,62	13,27	39,90
2,15	304,19	663,74	7,00	7,93	22,15
3,28	465,13	632,62	2,73	4,60	8,65
3,97	562,73	601,49	8,01	8,74	25,34
4,89	692,59	569,68	7,23	8,01	22,86
5,43	769,01	554,23	3,73	4,94	11,81
6,56	929,51	529,97	4,53	5,51	14,32
7,71	1091,46	469,09	11,58	12,08	36,61
8,45	1196,44	425,90	8,69	9,17	27,48
8,90	1260,27	405,69	1,61	2,86	5,10
10,05	1424,05	400,22	2,53	3,43	8,00
11,26	1595,49	394,53	4,03	4,58	12,75

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,16	22,10	1084,55	11,50	13,04	36,36
0,18	26,00	1055,73	12,49	13,78	39,49
0,19	27,46	1025,16	12,43	13,67	39,31
0,25	35,29	987,29	13,64	14,82	43,12
0,43	60,67	886,80	10,70	11,95	33,84
0,60	84,86	814,02	15,43	16,58	48,80
0,81	114,16	754,64	12,54	13,48	39,66
0,88	125,17	703,19	8,57	9,53	27,10
1,95	275,85	650,43	6,88	7,79	21,74
3,03	429,40	600,05	8,29	9,02	26,22
3,86	546,31	558,59	3,21	4,58	10,16
4,78	677,22	533,75	3,45	4,64	10,91
5,20	736,86	517,51	2,52	3,94	7,98
7,04	997,63	435,51	4,85	5,44	15,34
7,77	1101,00	412,36	3,40	4,20	10,75
8,11	1148,11	403,96	1,84	2,99	5,83
9,74	1378,97	397,81	3,11	3,87	9,84
10,65	1509,02	392,55	4,63	5,14	14,64
11,26	1595,49	394,53	4,03	4,58	12,75

**Elektroda LD** Rozměry ØE=2,5mm, Ød=0,4mm, M=0,25mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,81	116,29	1238,9	59,73	61,24	188,9
0,91	134,84	824,08	14,36	14,90	45,41
1,02	154,39	752,93	13,49	14,46	42,67
1,26	189,24	696,80	19,51	19,38	61,70
1,75	320,11	639,40	17,93	18,21	56,71
2,45	437,25	593,49	18,84	18,71	59,58
3,40	555,10	558,26	15,74	15,87	49,78
4,36	665,44	518,02	16,18	16,35	51,15
5,11	807,08	486,30	14,90	14,73	47,10
5,96	949,29	464,96	14,18	14,15	44,84
7,04	1 076,77	435,42	14,83	15,38	46,90
7,95	1 193,34	413,11	13,69	14,12	43,28
8,92	1 321,95	387,92	12,44	12,16	39,33
9,94	1 445,18	372,61	14,04	13,29	44,39
11,03	1 596,74	347,63	12,98	12,78	41,05
12,25	1 729,32	324,19	8,50	8,848	26,87
13,25	1 871,10	304,86	3,43	3,883	10,83
14,36	1 994,48	296,98	1,43	2,248	4,51
15,19	2 150,99	294,33	1,01	1,990	3,18

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,82	114,73	1062,39	67,55	67,13	213,62
0,95	128,19	875,55	60,30	60,88	190,67
1,09	144,05	709,70	26,96	27,53	85,26
1,34	179,04	650,00	28,65	29,60	90,59
2,26	247,59	590,44	19,18	19,49	60,66
3,09	347,03	548,59	19,09	19,79	60,36
3,92	481,44	501,86	16,17	16,04	51,13
4,70	617,71	474,15	14,74	14,49	46,61
5,70	724,22	449,41	13,24	13,35	41,88
6,70	844,62	425,24	10,29	10,78	32,53
7,60	996,60	403,23	8,75	8,97	27,68
8,43	1126,35	385,34	10,70	10,49	33,85
9,33	1263,60	370,17	10,62	10,51	33,60
10,20	1408,36	345,12	10,66	10,86	33,71
11,27	1561,90	324,10	8,21	8,50	25,96
12,21	1735,27	309,35	4,66	5,04	14,72
13,21	1876,63	300,60	2,93	3,44	9,27
14,08	2034,14	295,38	1,21	2,11	3,84
15,19	2150,99	294,33	1,01	1,99	3,18

## Elektroda PH    Rozměry: ØE=2,5 mm, Ød=0,1 mm, M=0,1 mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,49	211,32	551,67	15,68	16,27	49,60
2,15	303,96	437,17	7,72	7,64	24,42
3,23	458,14	320,92	22,23	23,04	70,28
4,07	575,92	232,57	16,87	19,39	53,35
4,79	678,43	198,63	5,40	5,57	17,09
5,92	838,15	191,05	0,26	0,26	0,83
6,72	952,04	190,16	0,40	0,40	1,27
7,83	1108,88	187,93	0,54	0,54	1,71
8,55	1210,85	186,64	0,65	0,66	2,07
9,90	1401,59	183,35	1,15	1,15	3,63
10,69	1513,52	181,08	1,32	1,33	4,19
11,92	1688,09	175,45	1,98	2,01	6,27
12,72	1802,27	172,19	2,03	2,05	6,42
13,89	1967,14	168,28	2,42	2,46	7,65
14,82	2098,84	164,85	2,45	2,48	7,74
15,83	2242,53	160,84	2,54	2,61	8,05
16,82	2382,10	157,34	2,41	2,46	7,62
17,83	2525,41	155,97	2,22	2,24	7,01
19,17	2715,26	152,55	1,95	1,98	6,18

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,58	223,99	429,51	13,47	13,12	42,60
2,21	313,15	362,20	18,91	17,21	59,80
2,74	388,03	265,63	20,93	19,69	66,17
3,74	530,43	205,08	8,70	9,27	27,50
4,76	674,76	190,59	0,21	0,22	0,68
5,53	783,42	189,10	0,33	0,33	1,06
6,73	953,65	184,44	1,03	1,04	3,27
7,70	1090,07	181,26	1,34	1,35	4,23
8,45	1197,47	177,52	1,85	1,88	5,84
9,56	1353,63	173,69	1,94	1,94	6,12
10,83	1534,47	169,03	2,12	2,13	6,69
11,76	1665,22	165,32	2,46	2,50	7,77
12,61	1785,73	162,04	2,52	2,58	7,96
13,73	1944,53	158,15	2,68	2,75	8,48
15,04	2130,21	156,76	2,77	2,84	8,77
15,95	2258,53	155,52	2,18	2,19	6,89
17,08	2419,32	153,39	2,23	2,27	7,06
18,42	2608,58	153,18	1,91	1,93	6,04
19,17	2715,26	152,55	1,95	1,98	6,18

## Elektroda LH    Rozměry: ØE=2,5 mm, Ød=0,4 mm, M=0,1 mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
2,26	320,81	574,52	18,35	18,74	58,04
2,87	406,54	425,84	10,60	11,09	33,52
4,02	569,44	393,74	3,75	4,42	11,87
4,72	668,61	365,72	5,08	5,57	16,05
5,92	838,95	302,05	12,27	13,24	38,80
6,45	913,26	269,91	11,10	12,15	35,09
7,70	1090,45	213,25	7,49	7,94	23,69
8,37	1184,96	196,77	2,91	3,18	9,20
9,20	1302,93	191,03	1,01	1,51	3,19
10,64	1507,49	187,44	0,88	1,40	2,77
11,74	1663,32	184,67	1,03	1,49	3,25
12,68	1796,00	175,02	2,48	2,68	7,84
13,26	1878,04	167,96	2,86	3,06	9,04
14,44	2046,00	155,25	3,64	3,74	11,51
15,53	2199,06	149,43	2,54	2,73	8,04
16,22	2296,77	144,45	1,87	2,08	5,91
17,45	2470,98	141,99	1,61	1,83	5,09
18,20	2578,55	140,74	0,76	1,12	2,41
19,67	2786,62	140,03	0,40	0,91	1,26

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,75	247,74	394,87	9,69	10,09	30,65
2,43	344,66	355,37	5,66	6,12	17,90
3,47	491,86	323,91	10,23	10,11	32,35
4,62	654,20	280,61	13,72	13,86	43,38
5,52	781,50	245,30	9,62	10,05	30,43
6,43	910,41	194,97	3,77	4,00	11,93
7,23	1023,93	188,79	3,79	4,02	11,97
7,97	1129,07	180,97	2,44	2,67	7,72
9,12	1291,74	171,51	3,76	3,85	11,89
10,00	1415,90	166,72	3,75	3,94	11,86
11,20	1586,05	157,94	3,09	3,27	9,76
12,19	1727,30	150,84	3,68	3,90	11,65
13,00	1841,03	147,34	1,82	2,03	5,74
14,80	2096,91	144,74	2,19	2,39	6,92
15,66	2218,59	141,97	0,74	1,11	2,33
16,95	2400,40	140,93	0,70	1,08	2,22
17,55	2485,21	140,88	1,14	1,41	3,60
18,47	2616,31	140,07	0,58	1,00	1,82
19,67	2786,62	140,03	0,40	0,91	1,26

## Měření při tloušťce inkoustu 15 μm

**Elektroda PD** Rozměry ØE=2,5 mm, Ød=0,1 mm, M=0,25 mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,28	39,80	460,94	8,16	8,70	25,82
0,47	66,43	401,70	2,67	3,54	8,46
0,79	111,61	373,93	5,52	6,01	17,44
1,43	202,55	352,50	0,26	2,08	0,83
1,93	272,80	350,46	0,28	2,07	0,88
2,56	362,75	335,63	2,86	3,48	9,03
3,20	452,97	291,31	4,23	4,51	13,37
3,96	560,48	254,26	3,76	4,11	11,88
4,60	651,13	234,07	3,66	3,87	11,58
5,56	787,54	204,37	5,78	6,15	18,28
6,44	911,90	190,90	0,30	1,16	0,96
7,23	1024,65	189,18	0,28	1,14	0,90
8,16	1155,81	183,65	1,03	1,49	3,27
9,25	1310,76	172,55	1,20	1,57	3,81
10,13	1434,28	161,95	1,01	1,38	3,21
11,11	1574,22	153,67	0,57	1,07	1,82
11,93	1690,37	149,30	0,54	1,03	1,71
13,00	1840,79	146,55	0,34	0,92	1,07
13,95	1975,35	145,02	0,27	0,89	0,86

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,21	29,04	385,05	5,00	5,51	15,80
0,32	45,47	353,75	1,43	2,52	4,54
0,64	90,79	343,45	4,95	5,27	15,66
1,00	141,36	323,85	9,69	9,55	30,65
1,48	210,06	268,53	6,44	6,71	20,36
2,26	319,83	239,70	1,93	2,36	6,11
2,78	394,05	224,85	5,61	5,63	17,73
3,49	493,77	203,98	4,77	5,03	15,10
4,22	598,30	194,13	2,30	2,60	7,28
4,99	706,94	190,15	0,29	1,15	0,92
6,00	849,43	185,80	0,91	1,42	2,87
6,99	990,23	177,77	1,50	1,83	4,76
7,90	1119,26	167,27	1,35	1,67	4,28
8,94	1266,01	158,27	1,40	1,69	4,42
9,75	1380,59	152,90	0,92	1,29	2,92
11,07	1568,27	147,76	0,29	0,91	0,91
11,97	1695,61	146,22	0,13	0,86	0,41
12,88	1824,36	145,39	0,29	0,90	0,93
13,95	1975,35	145,02	0,27	0,89	0,86

**Elektroda LD** Rozměry ØE=2,5 mm, Ød=0,4 mm, M=0,25 mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,87	123,86	377,43	13,98	15,09	44,20
1,30	184,77	314,48	13,94	14,87	44,10
1,97	278,49	267,71	7,55	7,80	23,87
2,62	371,80	243,35	6,16	6,30	19,47
3,35	474,58	230,71	5,32	5,34	16,81
4,20	594,23	208,98	4,46	4,63	14,10
4,86	687,99	192,78	0,74	1,35	2,33
5,71	809,10	191,05	0,22	1,14	0,68
6,61	936,41	189,98	0,42	1,18	1,32
7,54	1067,63	188,06	0,69	1,30	2,19
8,36	1183,74	180,74	3,85	3,88	12,17
9,25	1310,03	167,10	5,55	5,60	17,54
10,28	1456,32	148,46	2,69	2,90	8,52
11,19	1584,28	139,94	0,38	0,90	1,19
12,19	1726,77	138,80	0,09	0,82	0,29
13,15	1862,46	138,57	0,07	0,81	0,24
14,01	1985,07	138,54	0,08	0,81	0,24
15,09	2137,20	138,32	0,09	0,81	0,29
16,13	2284,79	137,82	0,10	0,81	0,33

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [Ω]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,80	113,34	296,96	41,85	45,27	132,35
1,13	159,60	285,69	34,77	41,20	109,94
1,68	237,96	225,44	5,55	5,56	17,55
2,26	319,78	211,16	5,15	5,24	16,30
3,04	431,23	192,74	0,65	1,30	2,05
3,76	532,43	191,39	0,21	1,14	0,65
4,44	629,53	190,72	0,12	1,12	0,39
5,39	763,67	189,39	0,36	1,16	1,13
6,28	889,07	185,77	0,79	1,35	2,51
7,20	1019,15	177,86	1,90	2,15	6,00
8,19	1159,52	165,38	2,41	2,61	7,62
9,25	1310,05	146,42	2,31	2,50	7,30
10,17	1440,01	140,28	0,98	1,28	3,08
11,11	1573,82	138,90	0,13	0,82	0,41
12,14	1719,23	138,54	0,05	0,81	0,15
13,10	1854,93	138,53	0,09	0,81	0,28
14,27	2021,15	138,37	0,09	0,81	0,27
15,42	2184,21	138,05	0,12	0,82	0,39
16,13	2284,79	137,82	0,10	0,81	0,33



**Elektroda PH** Rozměry:  $\varnothing E=2$  mm,  $\varnothing d=0,1$  mm,  $M=0,1$  mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,14	161,77	278,49	13,74	13,99	43,44
1,61	227,74	206,46	11,81	12,62	37,34
2,42	343,14	152,65	5,87	6,27	18,56
3,61	510,89	140,66	1,72	1,92	5,43
4,63	655,49	128,80	2,08	2,24	6,58
5,35	757,36	122,13	3,00	3,17	9,49
6,24	883,98	116,45	3,19	3,36	10,07
7,22	1022,14	108,92	3,65	3,80	11,53
8,35	1182,21	102,48	3,13	3,28	9,90
9,40	1330,96	99,15	2,59	2,71	8,20
10,12	1433,53	96,28	2,15	2,24	6,79
11,07	1568,65	94,25	1,44	1,55	4,55
11,61	1644,08	92,68	1,23	1,35	3,89
12,89	1825,99	91,00	0,98	1,12	3,10
14,14	2003,48	89,53	0,85	1,00	2,69
14,73	2086,28	88,88	0,58	0,78	1,84
16,22	2297,50	88,63	0,26	0,58	0,83
16,75	2371,91	88,11	0,27	0,58	0,85
17,46	2473,37	87,91	0,22	0,56	0,71

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,31	185,90	219,13	14,25	16,20	45,06
1,79	253,65	181,56	15,97	17,70	50,50
2,46	348,66	151,97	8,86	9,47	28,03
3,26	461,79	139,82	6,55	6,72	20,72
4,04	571,56	121,53	3,51	3,73	11,09
5,17	732,09	114,22	3,95	4,15	12,49
5,87	831,74	105,06	4,30	4,58	13,60
6,78	960,36	99,00	2,65	2,79	8,37
8,18	1159,17	93,68	2,01	2,12	6,36
9,05	1282,42	91,95	1,24	1,37	3,93
10,15	1438,00	90,99	0,92	1,07	2,91
10,58	1498,62	90,19	0,74	0,91	2,34
12,23	1731,92	89,50	0,55	0,76	1,73
12,99	1840,05	89,17	0,61	0,81	1,94
13,69	1938,61	88,33	0,31	0,60	0,99
15,59	2208,68	88,05	0,30	0,59	0,94
15,94	2257,62	87,82	0,18	0,54	0,56
17,22	2439,03	87,71	0,22	0,56	0,68
17,46	2473,37	87,91	0,22	0,56	0,71

**Elektroda LH** Rozměry:  $\varnothing E=2$  mm,  $\varnothing d=0,4$  mm,  $M=0,1$  mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,79	253,40	345,13	5,75	6,16	18,18
2,48	351,67	255,80	10,89	10,39	34,43
3,58	506,66	208,84	6,18	6,36	19,55
4,20	594,78	194,41	3,31	3,55	10,46
5,06	717,00	188,86	0,90	1,42	2,84
6,02	853,11	174,72	4,49	4,62	14,20
7,33	1037,89	158,61	7,05	7,26	22,31
8,23	1166,33	143,98	3,26	3,46	10,31
9,11	1290,42	138,30	0,73	1,09	2,29
9,84	1394,45	136,56	0,61	1,01	1,94
10,74	1521,29	132,01	1,34	1,54	4,23
11,63	1647,29	123,83	3,21	3,27	10,14
13,06	1850,00	115,05	3,73	3,83	11,80
14,15	2004,27	105,92	4,00	4,22	12,65
15,16	2147,83	99,21	3,62	3,84	11,45
16,22	2297,60	94,99	2,65	2,78	8,37
17,02	2411,03	92,02	1,96	2,09	6,20
18,12	2567,24	90,31	1,09	1,22	3,44
19,07	2701,38	89,02	0,64	0,83	2,02

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,36	192,70	277,05	17,59	17,70	55,62
2,14	303,12	216,04	14,30	16,22	45,21
2,78	393,11	194,05	7,69	8,12	24,31
3,87	548,37	161,14	5,43	5,59	17,17
4,67	662,16	149,14	6,40	6,91	20,25
6,15	870,54	146,57	5,98	6,43	18,92
6,84	968,63	134,62	3,66	3,84	11,58
7,61	1078,34	129,20	2,44	2,53	7,70
8,71	1233,71	119,69	4,53	4,42	14,33
9,54	1351,05	113,21	4,83	4,97	15,29
10,89	1541,88	103,14	5,50	5,80	17,38
11,79	1670,11	98,14	3,81	4,05	12,05
12,87	1822,99	94,14	3,15	3,33	9,95
14,37	2035,90	90,95	1,69	1,81	5,34
15,35	2174,18	90,82	1,60	1,72	5,05
16,20	2294,02	89,10	0,66	0,85	2,09
17,22	2439,33	89,05	0,77	0,94	2,43
18,22	2580,34	88,38	0,31	0,60	0,97
19,07	2701,38	89,02	0,64	0,83	2,02

## Měření při tloušťce inkoustu 23 μm

**Elektroda PD** Rozměry  $\varnothing E=2,5$  mm,  $\varnothing d=0,1$  mm,  $M=0,25$  mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,27	37,68	223,80	7,41	7,57	23,44
0,65	91,93	150,68	7,76	8,47	24,54
1,15	162,89	117,99	9,89	11,31	31,28
1,68	237,68	105,31	7,80	9,25	24,68
2,72	385,41	101,76	7,28	8,50	23,03
3,36	475,92	98,59	5,82	6,61	18,41
4,16	588,67	91,03	2,32	2,48	7,33
5,09	720,25	87,76	0,66	0,84	2,10
5,76	815,72	87,02	0,04	0,51	0,12
6,78	959,92	86,95	0,02	0,51	0,06
7,52	1065,58	86,98	0,03	0,51	0,09
8,60	1218,70	86,93	0,02	0,51	0,08
9,62	1362,89	86,94	0,02	0,51	0,07
10,24	1450,85	86,93	0,01	0,51	0,04
11,22	1589,80	86,92	0,01	0,51	0,04
12,17	1723,09	86,89	0,02	0,51	0,08
13,15	1862,75	86,89	0,03	0,51	0,08
14,12	1999,29	86,89	0,04	0,51	0,12
14,96	2119,41	86,87	0,03	0,51	0,10

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,24	33,57	231,92	34,68	37,53	109,67
0,48	67,85	170,34	21,07	23,45	66,61
0,81	114,59	116,80	8,22	8,39	25,98
1,37	194,33	105,38	7,50	8,88	23,72
1,97	278,47	103,34	6,79	7,67	21,47
2,79	395,18	96,70	4,45	4,95	14,07
3,68	521,25	87,38	0,22	0,56	0,70
4,59	649,58	89,11	2,08	2,20	6,59
5,31	752,41	86,96	0,02	0,51	0,08
6,36	900,85	86,97	0,02	0,51	0,06
7,21	1021,53	86,93	0,02	0,51	0,07
8,24	1167,42	86,93	0,03	0,51	0,10
8,94	1266,29	86,88	0,02	0,51	0,08
10,04	1421,95	86,92	0,02	0,51	0,07
11,18	1583,85	86,90	0,01	0,51	0,03
12,02	1701,98	86,88	0,04	0,51	0,12
13,18	1866,71	86,87	0,03	0,51	0,09
14,04	1987,96	86,88	0,02	0,51	0,07
14,96	2119,41	86,87	0,03	0,51	0,10

**Elektroda LD** Rozměry  $\varnothing E=2,5$  mm,  $\varnothing d=0,4$  mm,  $M=0,25$  mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,30	41,78	131,92	5,78	6,05	18,26
0,61	86,83	98,17	2,95	3,08	9,33
1,20	169,41	89,21	0,57	0,77	1,80
1,91	269,97	87,48	0,15	0,53	0,48
2,73	386,83	87,03	0,07	0,51	0,22
3,58	507,65	86,81	0,05	0,51	0,15
4,67	662,04	86,50	0,08	0,51	0,24
5,41	766,15	86,12	0,10	0,51	0,33
6,36	900,85	85,76	0,13	0,52	0,41
7,17	1015,86	85,38	0,12	0,51	0,38
8,15	1154,96	84,67	0,20	0,53	0,63
9,21	1304,82	84,09	0,19	0,53	0,60
9,95	1409,92	83,94	0,14	0,51	0,44
11,01	1559,49	83,34	0,24	0,54	0,76
12,07	1708,92	82,86	0,15	0,51	0,48
12,85	1819,97	82,82	0,15	0,51	0,49
13,83	1959,07	82,88	0,25	0,55	0,81
14,83	2100,42	82,44	0,25	0,54	0,80
15,57	2205,95	82,24	0,24	0,54	0,75

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,25	35,69	101,43	3,23	3,32	10,21
0,57	80,45	91,82	1,79	1,90	5,67
1,05	148,02	88,24	0,60	0,80	1,90
1,68	238,24	87,17	0,10	0,52	0,31
2,42	342,49	86,87	0,04	0,51	0,14
3,45	488,53	86,46	0,11	0,52	0,36
4,19	593,91	86,02	0,19	0,54	0,61
5,21	738,24	85,57	0,15	0,52	0,48
6,13	868,70	85,00	0,20	0,53	0,62
7,07	1001,13	84,38	0,16	0,52	0,50
8,16	1156,23	84,02	0,22	0,54	0,69
9,15	1296,60	83,63	0,16	0,51	0,52
9,98	1413,60	83,13	0,19	0,52	0,61
10,92	1547,31	82,79	0,33	0,59	1,05
11,89	1683,57	82,63	0,19	0,52	0,60
12,93	1831,87	82,52	0,23	0,53	0,71
14,04	1988,81	82,03	0,23	0,53	0,71
15,05	2131,30	82,07	0,17	0,51	0,55
15,57	2205,95	82,24	0,24	0,54	0,75

**Elektroda PH** Rozměry:  $\varnothing E=2$  mm,  $\varnothing d=0,1$  mm,  $M=0,1$  mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,76	107,06	140,61	5,11	5,23	16,15
1,11	157,73	89,14	1,23	1,36	3,89
1,54	218,00	85,08	0,60	0,78	1,91
2,25	318,57	81,71	1,24	1,35	3,94
2,84	402,19	79,87	1,52	1,61	4,82
3,60	510,10	78,22	1,71	1,84	5,42
4,30	608,59	76,39	1,97	2,09	6,22
5,17	731,89	74,32	2,31	2,45	7,32
5,91	836,70	71,80	2,55	2,76	8,07
7,00	991,44	69,65	2,78	2,97	8,79
7,72	1093,94	66,10	3,14	3,45	9,92
8,49	1202,80	63,53	3,26	3,59	10,31
9,70	1374,33	60,92	3,40	3,77	10,75
10,73	1519,55	60,03	3,20	3,53	10,12
11,49	1626,86	59,03	3,00	3,31	9,48
12,35	1749,18	57,50	2,73	2,99	8,65
13,21	1870,68	55,75	2,66	2,90	8,42
14,21	2013,08	55,28	2,69	2,94	8,50
14,96	2119,02	53,84	2,81	3,06	8,89

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
0,67	95,42	113,42	5,08	4,82	16,06
0,99	140,17	95,88	7,20	8,10	22,76
1,46	207,20	77,75	1,98	2,07	6,25
2,00	282,92	74,75	2,36	2,46	7,47
2,59	366,31	72,55	2,83	3,01	8,94
3,18	450,42	71,36	2,69	2,82	8,50
4,01	567,78	68,02	2,94	3,10	9,30
4,72	667,87	65,66	2,56	2,69	8,11
5,53	783,63	62,88	3,11	3,27	9,84
6,44	912,07	61,09	3,08	3,29	9,73
7,40	1048,80	58,23	2,78	3,04	8,78
8,22	1163,92	58,24	2,51	2,75	7,95
9,21	1304,97	56,97	2,57	2,76	8,13
10,13	1434,24	56,71	2,52	2,75	7,97
11,12	1574,47	55,75	2,56	2,73	8,09
12,08	1710,98	55,04	2,49	2,71	7,89
13,32	1887,10	54,36	2,80	3,03	8,86
14,20	2011,77	53,98	2,88	3,14	9,11
14,96	2119,02	53,84	2,81	3,06	8,89

**Elektroda LH** Rozměry:  $\varnothing E=2$  mm,  $\varnothing d=0,4$  mm,  $M=0,1$  mm

Zatěžování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,41	200,34	249,40	9,09	9,35	28,75
1,89	267,83	223,94	6,33	6,51	20,01
2,93	414,81	167,43	7,51	7,51	23,75
3,60	510,19	96,47	2,64	2,77	8,34
4,21	596,28	90,49	1,77	1,88	5,61
4,90	693,63	88,38	1,46	1,57	4,61
6,31	893,93	84,38	1,46	1,55	4,62
6,85	970,02	81,43	1,37	1,47	4,33
7,53	1065,89	77,25	1,66	1,76	5,24
8,81	1247,22	74,21	1,68	1,79	5,31
9,46	1340,56	72,58	1,62	1,73	5,13
10,48	1483,96	67,89	1,51	1,60	4,79
11,30	1600,53	64,89	1,45	1,53	4,57
12,23	1732,50	61,26	1,39	1,49	4,41
13,46	1906,84	59,68	1,17	1,24	3,71
14,11	1998,17	55,51	1,47	1,54	4,66
15,32	2170,51	52,85	1,29	1,36	4,08
16,15	2287,98	51,12	1,21	1,28	3,83
16,99	2406,22	49,78	0,91	0,98	2,89

Odlehčování					
Síla [N]	Tlak [kPa]	Odpor [ $\Omega$ ]	Ua	Uc	Výběr. směr. Odch
1,04	146,73	150,14	14,23	14,89	45,01
1,35	191,67	123,69	12,52	14,79	39,59
1,83	259,17	105,89	6,68	7,37	21,13
2,57	364,19	90,98	1,82	1,90	5,76
3,38	478,74	88,33	1,93	2,01	6,11
4,32	611,86	84,84	1,93	1,99	6,09
5,30	751,05	78,83	2,00	2,03	6,32
6,37	902,22	75,15	2,04	2,06	6,44
7,44	1054,28	73,91	2,18	2,28	6,90
8,55	1210,84	66,90	1,88	1,90	5,94
9,35	1324,49	65,14	1,76	1,81	5,55
10,31	1460,66	61,71	0,97	1,03	3,06
11,01	1558,87	58,74	1,11	1,18	3,52
12,51	1771,79	55,65	0,97	1,03	3,08
13,09	1854,70	52,69	0,89	0,96	2,81
14,42	2043,03	50,81	0,91	0,97	2,87
15,23	2157,74	50,93	0,92	0,98	2,91
16,24	2300,21	49,99	0,46	0,54	1,45
16,99	2406,22	49,78	0,91	0,98	2,89