

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace

**Závislost vlastností taktilního snímače
na vlastnostech vodivého inkoustu a
rozměru elektrod**

Diplomová práce

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

Autor práce: Bc. Marek Škeřík

PRAHA 2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Marek Škeřík

Zemědělské inženýrství

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Závislost vlastností taktilního snímače na vlastnostech vodivého inkoustu a rozměru elektrod

Název anglicky

Dependence of Properties of Tactile Transducer on Properties of Conductive Ink and Electrodes Dimensions

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 principy taktilních senzorů a snímačů, hlavní pozornost věnujte senzorům s vodivými odporovými materiály. Zaměřte se na zjištění vlastností taktilních senzorů s vodivým inkoustem jako převodníku síla – elektrický odpor. Zjistěte závislost na různých velikostech elektrod a tloušťce naneseného inkoustu.

Doporučený rozsah práce

30-50

Klíčová slova

taktilní senzor, taktilní snímač, piezoresistivní materiály a polymery

Doporučené zdroje informací

Turán, J. Petřík, S.: Optické vláknové senzory. ALFA Bratislava 1990. ISBN 80-05-00655-1

[1] S. Barman & S. K. Guha, "Analysis of a new combined stretch and pressure sensor for internal nodule palpation", SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL 125 (2), pp. 210-216, 2006.

[12] J. Volf, A. Trinkl, M. Novák, J. Bílek, P. Prikner, P. Neuberger, "Plantograf V12 with Optimal Size Determination Sensor Electrodes and its Using for Pressure Distribution Between Tire and Road", XX World Congress IMEKO, pp. 1-4, Busan, 2012. ISBN 978-89-950000-5-295400.

[2] F.G. Souza, R.C. Michel, B.G Soares, "A methodology for studying the dependence of electrical resistivity with pressure in conducting composites", POLYMER TESTING 24 (8), pp. 998-1004, 2005.

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 23. 3. 2020

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 3. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2020

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Závislost vlastností taktilního snímače na vlastnostech vodivého inkoustu a rozměru elektrod* vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 08.4.2020

.....

Marek Škeřík

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce, prof. Ing. Jaromíru Volfovi, DrSc., za ochotu a pomoc při jejím zpracování, odborné vedení a cenné rady. Dále děkuji panu Vladimíru Ryženkovi, Dh.D., za zapůjčení pomůcek k měření. V neposlední řadě patří poděkování rodině, blízkým přátelům, pracovním kolegům a Ing. Jitce Kubíkové, která mě po celou dobu zpracování práce podporovala.

Abstrakt:

Použití inkoustu s vodivými částicemi je jednou z variant, jak realizovat převodník síla – elektrický odpor u taktilních senzorů. Diplomová práce se věnuje vlastnostem taktilního senzoru a vlivu tloušťky vrstev vodivého inkoustu a velikosti plochy elektrod na jeho vlastnostech. Teoretická část práce definuje taktilní senzor a jeho základní parametry, dále je popsáno rozdělení taktilních senzorů podle fyzikálního principu a příklady jejich konstrukcí. Praktická část je zaměřena na výrobu tří vrstev inkoustu o rozdílné celkové tloušťce a jejich měření. Jednotlivé tloušťky vrstev byly měřeny na snímací matici, skládající se ze čtyř typů elektrod s rozdílnou velikostí snímací plochy. Byla měřena závislost změny elektrického odporu vrstvy inkoustu na působící síle. Z naměřených hodnot na jednotlivých tloušťkách inkoustu bylo zjištěno, že čím větší je tloušťka vrstvy, tím má větší vodivost a schopnost vrstvy změnit svůj elektrický odpor je menší. Hodnoty naměřené na rozdílných elektrodách ukázaly, že čím má elektroda větší snímací plochu, tím dokáže zaznamenat změnu odporu při nižším tlaku. Nakonec byla vybrána optimální kombinace, jejíž měření vykazovalo největší citlivost a rozlišovací schopnost. Jednalo se o kombinaci elektrody s největší snímací plochou a nejtěsnější vrstvy inkoustu.

Klíčová slova: taktilní senzor, taktilní snímač, piezorezistivní materiály a polymery

Dependence of Properties of Tactile Transducer on Properties of Conductive Ink and Electrodes Dimensions

Summary:

The usage of ink with conductive particles is one possibility of creating a converter power – electrical resistance of tactile sensors. This thesis deals with properties of a tactile sensor focusing on the influence of the conductive ink layer thickness and electrode dimensions on tactile sensor properties. In the theoretical part, the tactile sensor and its basic parameters are defined. Several types according to their physical principle are described, as well as their construction. The practical part of the thesis is focused on the production of three layers of ink of different thickness and their measurements. The individual thicknesses of layers were measured using a sensing array consisted of four types of electrodes with different sizes of sensing area. Particularly, the dependence of the change in the electrical resistance of the ink layer on the load force was measured. The measured values of each ink thickness revealed that the greater the layer thickness is, the greater conductivity it has and therefore the ability of the layer to change its electrical resistance is smaller. The values measured on different electrodes indicated that the bigger electrode sensing area is, the more it could detect a change in resistance at a lower pressure. In the end the measurement that showed the highest sensitivity and resolution was selected as the optimal combination. It was a combination of the electrode with the largest sensing area and the thinnest layer of ink.

Key words: tactile sensor, tactile transducer, piezoresistive materials and polymers

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Cíl práce..... | 3 |
| 3 | Metodika práce | 4 |
| 4 | Taktilní senzory a snímače | 5 |
| 4.1 | Definice taktilního senzoru | 5 |
| 4.2 | Základní vlastnosti taktilních senzorů | 6 |
| 4.2.1 | Statické vlastnosti..... | 6 |
| 4.2.2 | Dynamické vlastnosti..... | 7 |
| 4.3 | Taktilní snímače s piezorezistivními materiály (s elastomery)..... | 8 |
| 4.3.1 | Senzor FSR | 9 |
| 4.3.2 | Senzory s odporovou vrstvou..... | 10 |
| 4.3.3 | senzor s odporovou tenkou vrstvou..... | 11 |
| 4.3.4 | senzor s odporovou tlustou vrstvou..... | 12 |
| 4.3.5 | Flexibilní dotykový senzor s piezorezistory NiCr na bázi polymeru | 12 |
| 4.4 | Taktilní snímače s tenzometry..... | 15 |
| 4.4.1 | Kovový tenzometr | 15 |
| 4.4.2 | Polovodičový tenzometr | 16 |
| 4.4.3 | Snímač DOTS | 17 |
| 4.5 | Kapacitní taktilní senzory | 17 |
| 4.5.1 | Senzor se změnou účinné plochy kondenzátorů..... | 18 |
| 4.5.2 | Senzor se změnou vzdálenosti mezi deskami | 18 |
| 4.5.3 | Kapacitní dotykové snímací pole s pohyblivými elektrodami | 19 |
| 4.6 | Magnetické taktilní senzory | 21 |
| 4.6.1 | Snímač na principu magnetostrikce | 22 |
| 4.6.2 | Senzor na principu magnetoanizotropie | 23 |
| 4.6.3 | Měkký magnetický prachový senzor pro taktilní snímání | 24 |
| 4.7 | Optické taktilní senzory..... | 25 |
| 4.7.1 | Optický senzor s Braggovou mřížkou | 27 |
| 4.7.2 | Senzor TacTip | 27 |
| 4.8 | Taktilní senzory s piezoelektrickými materiály | 29 |
| 4.8.1 | Flexibilní sensorové pole pro měření dynamické síly..... | 30 |
| 5 | Praktická část práce..... | 36 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1 | Nanášení inkoustu..... | 36 |
| 5.1.1 | Vodivý inkoust | 37 |
| 5.1.2 | Stříkáčím metoda | 37 |
| 5.1.3 | Postup aplikace inkoustu..... | 39 |
| 5.1.4 | Měření tloušťky vrstev inkoustu | 41 |
| 5.2 | Vlastní měření vlastností taktilního senzoru s vodivým inkoustem..... | 42 |
| 5.2.1 | Snímací matice měřících elektrod | 43 |
| 5.2.2 | Plocha elektrod..... | 44 |
| 5.2.3 | Generování zatěžující síly | 45 |
| 5.2.4 | Měření tlaku | 46 |
| 5.2.5 | Měření elektrického odporu inkoustu | 47 |
| 5.3 | Postup měření | 49 |
| 5.4 | Statistické vyhodnocení hodnot..... | 52 |
| 6 | Výsledky měření | 54 |
| 6.1 | Elektroda LH | 54 |
| 6.2 | Elektroda PH..... | 55 |
| 6.3 | Elektroda LD | 55 |
| 6.4 | Elektroda PD..... | 56 |
| 6.5 | Vyhodnocení naměřených dat | 57 |
| 6.5.1 | Optimální kombinace elektrody a tloušťky | 59 |
| 6.6 | Diskuze | 62 |
| 7 | Závěr..... | 65 |
| 8 | Seznam použitých zdrojů | 66 |
| | Seznam obrázků: | 70 |
| | Seznam tabulek: | 71 |
| | Přílohy | I |

1 Úvod

S vývojem prvních robotů a robotických ramen vznikla potřeba zajistit jejich manipulační a uchopovací schopnosti. Po vzoru lidského hmatu vznikl taktilní senzor, který je schopný snímat dotykovou informaci vyvolanou vnějším prostředím a převést ji na elektrický signál. S příchodem nových technologií se vyvíjely i taktilní senzory, a proto dnes rozeznáváme několik různých principů, konstrukcí a široké spektrum jejich využití. Jeden z principů využívá piezorezistivního jevu, kterého jsou schopny určité typy materiálů. Mezi tyto materiály řadíme skupinu tzv. elastorezistivních materiálů, která se vyznačuje svou flexibilitou a schopností vést elektrický proud. Nejznámějším představitelem jsou polymerní látky obohacené o vodivé částice stříbra, železa nebo uhlíku. Jejich princip je založen na zmenšování vzdálenosti mezi vodivými částicemi v závislosti na působící síle. Snížením vzdálenosti mezi částicemi vznikají nové vodivé cesty, které zvýší celkovou vodivost materiálu, a to je doprovázeno poklesem elektrického odporu materiálu. V současnosti jsou hodně rozšířené vodivé polymery, jako je např. silikonová pryž, která má pro využití v taktilních senzorech vhodné vlastnosti. Její nevýhodou je relativně velká hystereze. Jako vhodná alternativa se může jevit vodivý inkoust, který rovněž obsahuje vodivé částice. Inkoust je primárně využíván k nanesení na nevodivé materiály, aby mezi nimi mohl být veden elektrický proud. Většinou se vyrábí jako kapalina s vysokou viskozitou, která je aplikována v několika vrstvách. Díky schopnosti inkoustu vést elektrický proud se nabízí jeho využití jako převodníku síly na elektrický odpor.

První část práce je tvořena literární rešerší, která se věnuje obecné definici taktilního senzoru a jeho základním parametrům. Dále jsou taktilní senzory rozděleny podle fyzikálních principů, na kterých jsou založeny. Principy jsou popsány a doplněny o příklady senzorů, které daný jev využívají.

Druhá, praktická část, se věnuje měření vlastností vodivého inkoustu na taktilním senzoru. Nejprve je uvedena metoda nanášení vodivého inkoustu, při které jsou vytvořeny tři vrstvy o různé tloušťce. Dále je popsána výroba měřicího obvodu a poté samotné měření. Měření se zabývá piezorezistivním chováním inkoustu, kdy je měřena závislost změny jeho odporu na působící síle. Zatížení je generováno hmotností kapaliny v nádobě, která přes tenkou tyčku tlačí na vrstvu inkoustu překrývající dvojici snímacích elektrod.

Poslední část práce tvoří vyhodnocení naměřených hodnot a diskuze výsledků. Ze zjištěných hodnot jsou stanoveny vlastnosti inkoustu a je vybrána nejvhodnější kombinace velikosti plochy elektrody a tloušťky vrstvy vodivého inkoustu.

2 Cíl práce

Cílem práce je zjištění vlastností taktilních senzorů s vodivým inkoustem jako převodníku síla – elektrický odpor. Dále bude studována jeho závislost na různých velikostech elektrod s využitím rozdílných tloušťek vrstev vodivého inkoustu.

3 Metodika práce

Seznamte se s principy taktilních senzorů a snímačů, hlavní pozornost věnujte senzorům s vodivými odporovými materiály. Zaměřte se na zjištění vlastností taktilních senzorů s vodivým inkoustem jako převodníku síla – elektrický odpor. Zjistěte závislost na různých velikostech elektrod a tloušťce naneseného inkoustu.

4 Taktilní senzory a snímače

Teoretická část se věnuje problematice taktilních senzorů. Definiuje taktilní senzor a jeho základní vlastnosti. Jednotlivé kapitoly popisují rozdělení taktilních senzorů podle fyzikálního principu. Dále jsou popsány typy senzorů využívající daný princip.

4.1 Definice taktilního senzoru

Senzor (čidlo nebo detektor) je obecně definován jako převodník jedné veličiny na jinou veličinu. [1] V praxi je poté senzor chápán jako zařízení, které snímá danou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu, kterou dále transformuje na měřicí veličinu podle určitého definovaného principu. Výstupní informace ze senzoru jsou kvantitativní. Obvykle se jedná o hodnoty elektrického signálu, které lze dále zpracovat. Slovo taktilní má ekvivalent ve slově dotykový či hmatový. [2] Taktilní senzor je tedy prvek schopný snímat informaci o dotyku s prvkem okolního prostředí a následovně ji převést na elektrický signál. Patří do tzv. 3. generace snímačů (mikroelektronické –inteligentní). Taktilní senzory našly uplatnění v mnoha oborech, jako např. robotika, biomedicína, stomatologie, automatizace, zabezpečovací systémy či výpočetní hardware. [3] Taktilním snímačem je obvykle myšleno uspořádané seskupení taktilních senzorů do jednotlivých útvarů, nejčastěji maticové. V průmyslu se nyní přikládá značný význam systémům pro získání a zpracování obrazové informace. [4]

Taktilní senzory a snímače lze rozdělit na zařízení podle použitého fyzikálního principu:

- 1) S piezorezistivními materiály (s elastomery),
- 2) s tenzometry,
- 3) kapacitní,
- 4) magnetické,
- 5) optické,
- 6) s piezoelektrickými materiály.

4.2 Základní vlastnosti taktilních senzorů

Výběr nejvhodnějšího typu senzoru pro použití v dané aplikaci závisí na jeho vlastnostech. Základními parametry a charakteristikami lze popsat statické a dynamické vlastnosti senzoru. [5]

4.2.1 Statické vlastnosti

Statické vlastnosti senzoru vyjadřují jeho chování v ustáleném stavu. Těmito vlastnostmi jsou:

Statická převodní charakteristika – udává vztah mezi výstupní veličinou y a měřenou veličinou x .

Citlivost – je popisována jako sklon statické převodní charakteristiky.

Dynamický rozsah – je omezen dolní a horní hranicí měřicího rozsahu, přičemž udává interval přípustných hodnot měřené veličiny.

Linearita – přesnost shody reálné kalibrační křivky s ideální statickou převodní charakteristikou. Udává se v procentech horní hranice měřicího rozsahu. Je definována jako maximální odchylka kteréhokoliv kalibračního bodu od odpovídajícího bodu na ideální statické převodní charakteristice.

Rozlišení – je schopnost senzoru rozlišit nejmenší inkrement výstupu senzoru, který senzor zaznamená při změně vstupu.

Přesnost senzoru – je odchylka mezi ideálním výstupním a reálným signálem. Vyjadřuje se relativní chybou δ vztaženou k horní hranici měřeného rozsahu.

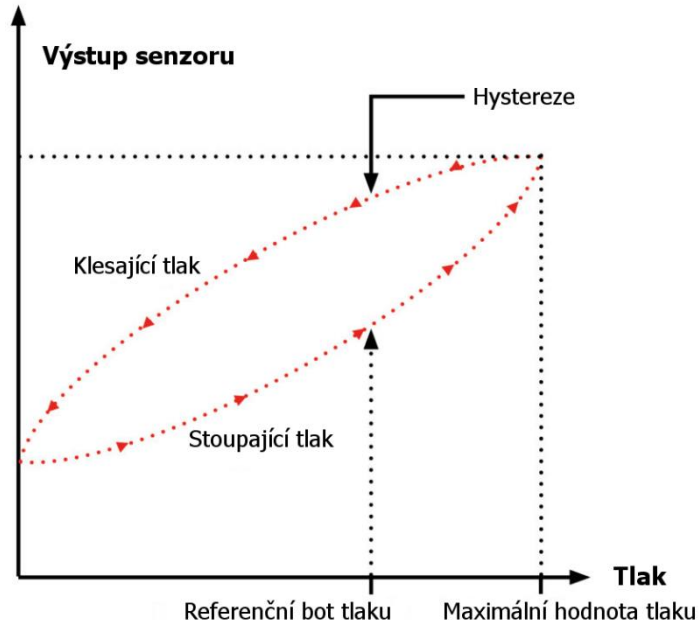
Opakovatelnost měření (reprodukovatelnost) – je dána odchylkou naměřených hodnot za stálé velikosti vstupní veličiny a rušivých vlivů okolí při krátkodobém časovém sledu měření. Také se popisuje jako největší rozdíl na výstupu mezi dvěma kalibračními křivkami. Obvykle se udává v procentech z celkového rozsahu, viz. rovnice (1).

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

Hystereze – udává maximální rozdíl ve výstupu při jakékoliv hodnotě měřeného rozsahu, kdy hodnota je měřena nejdříve při zvyšování a poté při snižování měřené veličiny. V případě taktilních senzorů lze hysterezi pozorovat při zatížení cyklickou silou, kdy dochází k odchylce

výstupní veličiny, viz obr. 1. Hystereze u taktilních senzorů představuje negativní parametr, proto je kladen důraz, aby hodnota hystereze byla co nejmenší. [5] [7]

Obr. 1 Příklad hysterezní křivky [6]

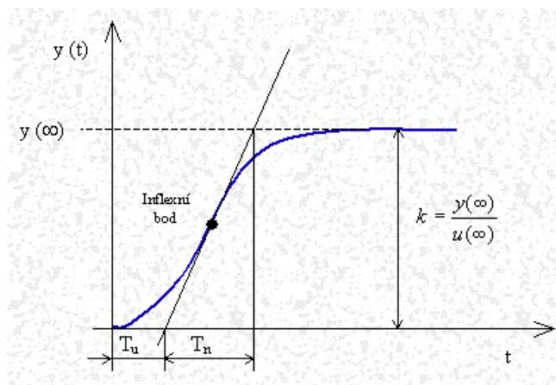


4.2.2 Dynamické vlastnosti

Dynamické vlastnosti senzoru vyjadřují jeho chování v přechodném stavu (v čase se mění). Jsou popsány lineárními diferenciálními rovnicemi a znázorněny pomocí dynamických charakteristik (přechodová, rychlostní, impulzní, frekvenční):

Doba odezvy – je časový interval, za který senzor ustálí výstupní signál při skokové změně vstupního signálu, viz. obr. 2. Tento jev je patrný i při záporné změně vstupního signálu a nazývá se doba poklesu.

Obr. 2 Přechodová charakteristika [5]

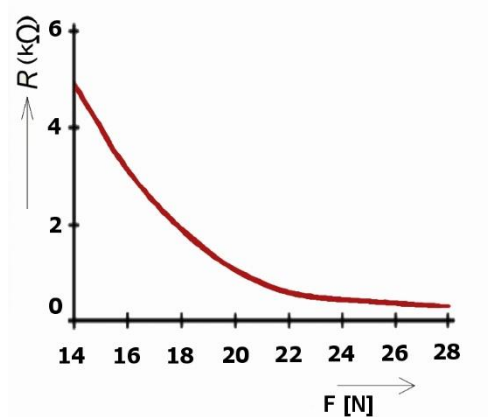


Mezi další udávané vlastnosti taktilních sensorů se řadí posun nuly (drift), selektivita, životnost, odolnost, velikost, odolnost vůči rušení, hmotnost a také cena. Hodnoty zmíněných parametrů mohou v různých aplikacích limitovat použití sensorů, a proto je třeba hodnotit vhodnost každého typu senzoru samostatně pro danou aplikaci. [5] [7]

4.3 Taktilní snímače s piezorezistivními materiály (s elastomery)

Tento typ snímače využívá pro převedení síly na elektrický signál vodivý elastomer. Princip snímače využívá změnu odporu elastomeru v závislosti na působící síle. Elastomer je hmota na bázi kaučuku, jde o silikonovou pryž sycenou grafitem nebo železným prachem. Při stlačování nebo uvolňování tohoto poddajného materiálu se mění jeho hustota, a tím i výsledný odpor senzoru. Odpor je měřen mezi dvojicí elektrod, mezi které je nanесena vrstva vodivého elastomeru. [4]

Obr. 3 Typická závislost odporu senzoru s elastomerem na působící síle [8]



Na obr. 3 je závislost odporu R taktilního snímače s vodivým elastomerem na působící síle F , která je nelineární v celém rozsahu. Z hlediska stability je vhodné používat druhou část charakteristiky od 20 do 22 N. [8]

Existuje mnoho úprav těchto sensorů a snímačů. Příkladem je plošný snímač, realizovaný s celistvým vodivým elastomerem nebo s jednotlivými senzory. Konstrukce snímačů se od sebe liší umístěním elektrod a elastického materiálu. Ten leží buď mezi elektrodami, nebo je umístěn na dvojici speciálně tvarovaných elektrod. Snímače se mohou lišit počtem a typem jednotlivých vrstev, které slouží k úpravě měřicího rozsahu nebo k ochraně vodivého elastomeru před poškozením při velkém rázovém přetížení. Snímač s vodivým elastomerem poskytuje informaci nejen o prostém kontaktu, ale i kvantitativní a kvalitativní informaci. Prostřednictvím matice sensorů snímá vlastní povrch objektu, který

s ním přichází do kontaktu. Tyto senzory, zhotovené z vodivého elastomeru, umožní měřit spojitě velikost tlaku. [8]

Pro měření rozložení statických a dynamických tlaků byl na ČZU vyvinut snímač nazývaný Plantograf V05. Je využíván k analýze chůze člověka, rozložení tlaků na spodní ploše chodidla, sedu a k indikaci stavu velkých kloubů. Snímač je vytvořen z 7 500 senzorů o rozměrech 2×2 mm, rozmístěných rovnoměrně na ploše 300×400 mm. [4]

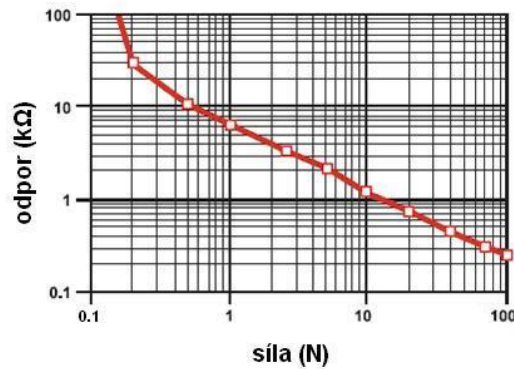
4.3.1 Senzor FSR

Zkratka je odvozena z anglického názvu Force Sensitive Resistor. Jedná se o odporový senzor s vrstvou citlivého polymerního materiálu. Senzor je založen na změně odporu polymerové vrstvy při změně působící síly. Základní částí senzoru je odporová vrstva, která je vyrobena technikou tlustých vodivých polymerových vrstev (Polymer Thick Film – PTF). Vrstvu tvoří elektricky vodivé a nevodivé částice o velmi malých rozměrech. Pokud bude vrstva zatížena silou, dojde ke vzájemnému dotyku jednotlivých částic. Tím se mezi částicemi vytvoří vodivé dráhy a odpor vrstvy se sníží v závislosti na velikosti působící síly. [4]

Senzor FSR se obvykle skládá ze tří vrstev: odporové polymerové vrstvy, kontaktních vodičů a plošek, případně dále ze čtvrté vrstvy – distanční vložky. Distanční vložka je využívána u spínacích senzorů, aby změna odporu při sepnutí byla více patrná. V rozepnutém stavu se kontaktní plošky nedotýkají a odpor senzoru je řádově v $M\Omega$. Po sepnutí klesne odpor na hodnotu. [10]

Na obr. 4 je vidět závislost odporu na působící síle. Z charakteristiky je patrné, že průběh můžeme rozdělit na dvě části. Počáteční strmý průběh platí pro malé síly (do 1 N), kde se odpor velmi rychle mění o desítky $k\Omega$ při velmi malé změně síly. Následující lineární část, se vyznačuje naopak pomalým poklesem odporu s rostoucí silou. Senzor se obvykle zatěžuje silou do 10 N, maximálně až do 100 N, kde dojde k saturaci síly. Při dalším zatěžování se hodnota odporu nemění, zde končí lineární část. Maximální tlak, při kterém dokáže senzor ještě pracovat, je v rozmezí 100 až 200 Pa. Rozlišovací schopnost senzoru je lepší než 0,5 %. Senzory nejsou vhodné pro přesné laboratorní měření; důvodem je tolerance převodní charakteristiky mezi jednotlivými senzory, která se pohybuje v rozmezí 15-25 %. [4]

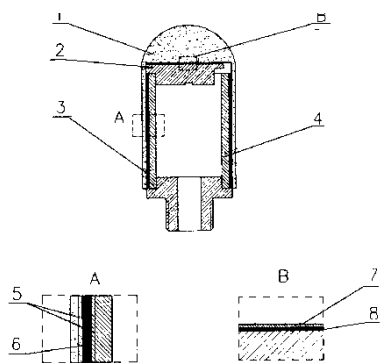
Obr. 4 Závislost odporu FSR senzoru na působící síle [4]



FSR senzor se používá pro konstrukci dotykových klávesnic v různých zařízeních, popř. ke zjištění polohy předmětů. Lineární část převodní charakteristiky lze využít k měření zatížení. Senzory se vyrábí v různých tvarech – proužky nebo snímače, složené z jednotlivých senzorů. [11]

Senzor FSR byl použit při konstrukci tříprsté ruky vyvinuté v německém leteckém ústavu DLR. Každý prst se skládá ze tří článků a ohebných kloubů. Senzor tvoří poslední článek prstu, viz. obr. 5. Je umístěn na špičce článku a jeho obvodu. Díky pružným vrstvám (5 a 7) se působící síla na článek prstu promítá na jednotlivé části senzorů FSR (6 a 8). Senzory snímají tuto sílu ve třech souřadnicích (x, y, z). [10]

Obr. 5 Konstrukce článku tříprsté ruky se senzorem FSR [10]



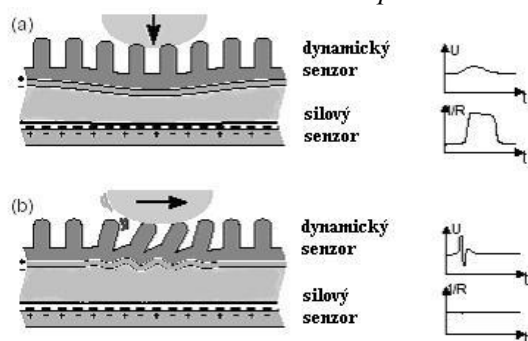
- | | |
|-------------------------|------------------|
| 1. krycí gumová vrstva | 5. pružná vrstva |
| 2. vrchní podpěra | 6. FSR materiál |
| 3. připojovací konektor | 7. pružná vrstva |
| 4. vnitřní podpěra | 8. FSR materiál |

4.3.2 Senzory s odporovou vrstvou

Existují konstrukce senzoru, které reagují nejen na normálovou silovou složku (kolmou), ale také na složku smykovou (tečnou složku síly). Princip senzoru ukazuje obr. 6. Jedná se o spojení dvou vrstev senzorů. První senzor je tvořen klky na odporové vrstvě, tzv. dynamický senzor. Vlivem působení smykové složky dochází k dynamické změně polohy klků (obr. 6b). Tomu odpovídá dynamická změna napětí v první vrstvě, zatímco spodní

odporová vrstva nereaguje. Naopak působením normálové (kolmé) síly se tato síla přenesla na spodní vrstvu, která reaguje změnou odporu (obr. 6a). [4]

Obr. 6 Řez konstrukcí senzoru s odporovou vrstvou [4]

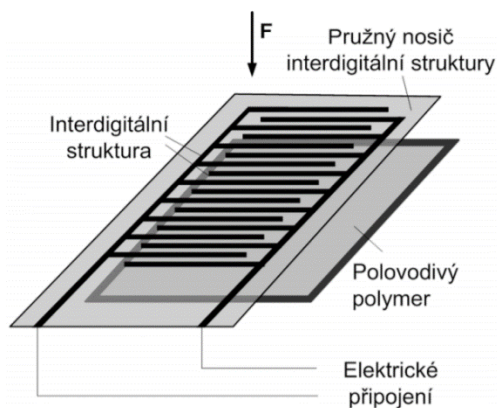


Použitím jiné konstrukce senzoru lze měřit i smykovou sílu, viz. Snímač MTS (maticový taktilní snímač), který je rozdělen na dvě části, mezi kterými zaznamenává zatížení v závislosti na změně dotykových ploch. Důležitou částí senzoru je vrstva malých tlačítek, která se stlačují proti rovné ploše. Jejich dotyková plocha se mění přibližně s druhou mocninou síly a lze ji měřit např. odporovou vrstvou. Právě kruhový tvar dotykové plochy umožní měřit současně smykovou složku síly, při níž se tvar změní na eliptický. [12]

4.3.3 senzor s odporovou tenkou vrstvou

Pro realizaci senzoru s odporovou tenkou vrstvou jsou použity polovodivé polymery, které, jako u předchozího typu, mění elektrický odpor v důsledku působení síly nebo tlaku. Senzor se vyrábí jako membránový spínač se dvěma vrstvami, viz obr. 7. První vrstva využívá prstové (interdigitální) struktury a druhou vrstvu představuje polovodivý polymer. Díky tomuto složení má senzor velký dynamický rozsah, avšak ten je vykoupen velmi malou přesností kolem 10 %. Další výhodou je velmi nízká cena. Standartní tloušťka senzoru je 250 μm . [13]

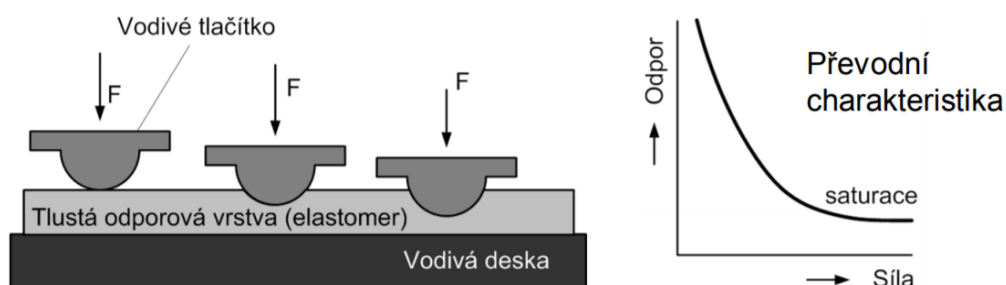
Obr. 7 Konstrukce senzoru s odporovou tenkou vrstvou [14]



4.3.4 senzor s odporovou tlustou vrstvou

Tento senzor se realizuje pomocí materiálů, které mění svůj elektrický odpor v závislosti na působení síly (mechanické deformace). Těmito materiály jsou například vodivé elastomery vyrobené z křemíkové pryže, polyuretanu a dalších látek. Funkce senzoru závisí na změně velikosti kontaktní plochy nebo tloušťky. Citlivost namáhání senzoru je dána převodní charakteristikou. Při měření lze použít maximální tlak, při kterém se křivka dostává do saturace. To je tehdy, když se citlivost blíží nule. Nevýhodou konstrukce senzoru je jeho relativně velká tloušťka (cca 1 mm). Principiální schéma a průběh převodní charakteristiky je uveden na obr. 8. [13]

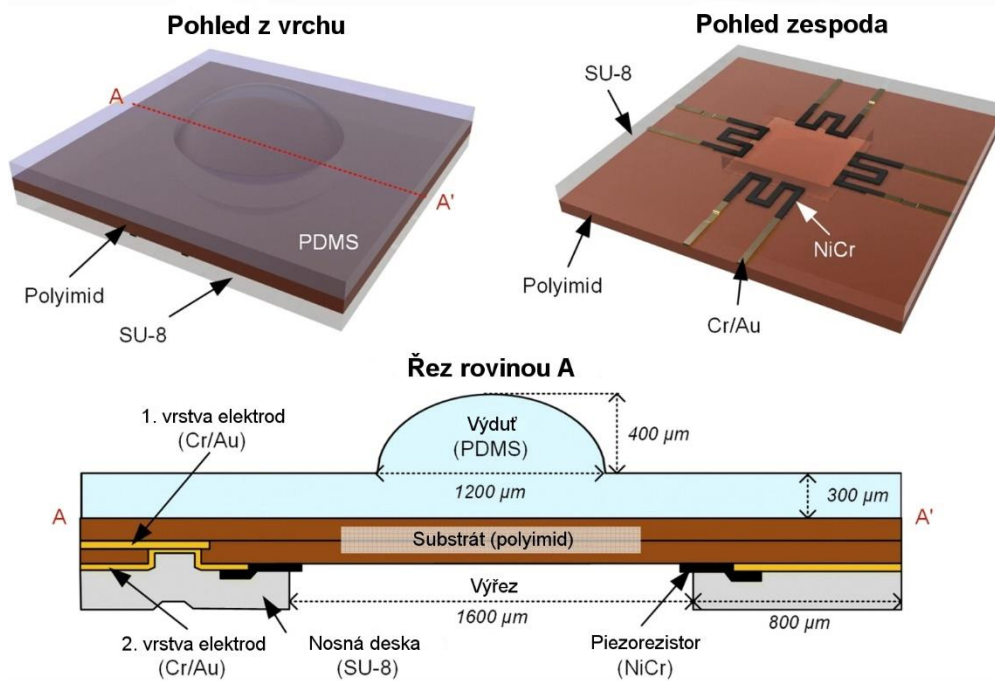
Obr. 8 Schéma a převodní charakteristika senzoru s odporovou tlustou vrstvou [14]



4.3.5 Flexibilní dotykový senzor s piezorezistory NiCr na bázi polymeru

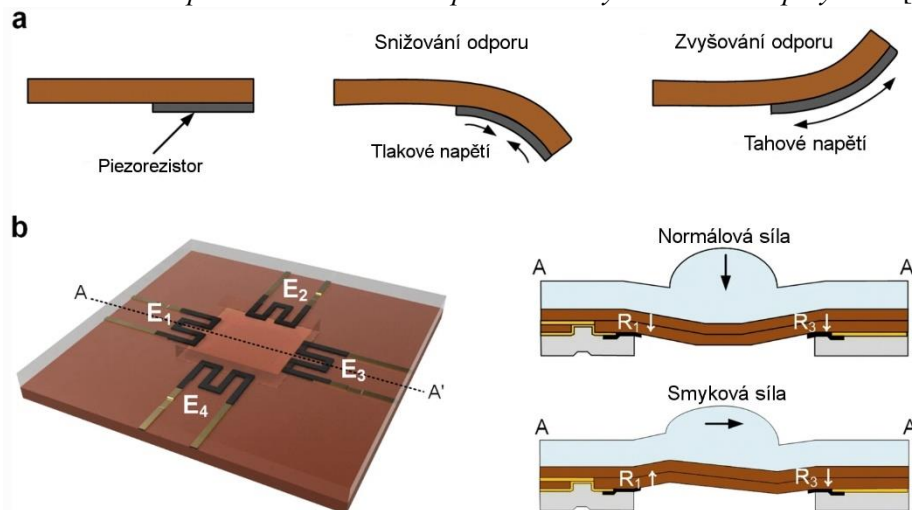
Soonjae Pyo, Jae-Ik Lee a kol. (2019) představili polymerový více směrový taktilní senzor s NiCr piezorezistory. Schéma navrženého senzoru je na obr. 9. Horní část senzoru s vydutím je vyrobena z polydimethylsiloxanu (PDMS), spodní vrstva je tvořena podpůrnou deskou SU-8 a mezi nimi je nanášena vrstva substrátu z polyimidu (PI). Vydutá část efektivně přenáší působící síly z různých směrů na piezorezistory. Nosná část desky SU-8 s výřezem funguje jako membrána. Na substrát jsou připojeny čtyři NiCr piezorezistory a dvě vrstvy Cr/Au elektrod. Jako spínací prvek byla vybrána slitina Ni a Cr kvůli jejímu nízkému teplotnímu koeficientu odporu, který minimalizuje teplotní účinky při silovém namáhání. [15]

Obr. 9 Schéma konstrukce senzoru s piezorezistory NiCr na bázi polymeru [15]



Následující obr. 10 ukazuje princip senzoru. Princip je založen na piezorezistivním jevu, kdy se odpor piezorezistorů mění s mechanickým zatížením. Při působení síly na vydutou část, umístěnou uprostřed mezi čtyřmi snímacími prvky, je každý prvek deformován jinak, podle velikosti a směru působící síly. Tím pádem normálová síla vyvolá ve všech piezorezistorech stejný pokles odporu, zatímco při působení smykové síly ve směru osy x dojde k působení tahového a tlakového napětí na piezorezistorech E_1 a E_3 , což se projeví v nárůstu odporu na E_1 a jeho poklesu v E_3 . Na základě těchto vlastností lze rozlišit velikost a směr síly porovnáním odporu na každém piezorezistoru. [15]

Obr. 10 Princip namáhání senzoru s piezorezistory NiCr na bázi polymeru [15]

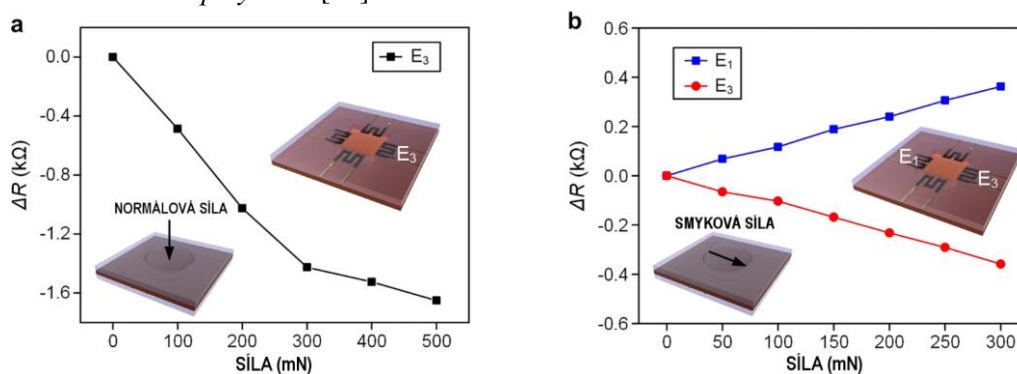


Naměřené hodnoty při zatížení normálovou silou byly zpracovány a vyneseny do grafu na obr. 11(a). Měřený rozsah byl od 0 do 500 mN, takové zatížení je vhodné při použití v lékařských aplikacích, např. operační systém podporovaný robotem. Počáteční naměřený odpor byl přibližně 8 k Ω a dále se snižoval s působící silou na E3. Z charakteristiky je vidět, že se klesající průběh rozděluje do dvou oblastí. Pro síly v rozmezí 0-300 mN byl vypočten pokles odporu o $-4,9 \Omega \cdot m^{-1} N^{-1}$ a v rozmezí 300-500 mN byl o $-3,6 \Omega \cdot m^{-1} N^{-1}$. Soonjae Pyo měření toto přičítá skutečnosti, že PI vrstva začíná přicházet do styku se zemí (podložkou), pokud aplikována síla přesáhne 300 mN. Tato nedokonalost by se podle autora dala omezit zvětšením tloušťky nosné desky SU-8, čímž by se zvýšil měřitelný rozsah. [15]

Další měření se zaměřilo na změnu odporu piezorezistoru E₁ a E₃, na které působila smyková síla ve směru osy x. Odpor na E₁ se zvýšil o $1,2 \Omega \cdot m^{-1} N^{-1}$, zatímco odpor na E₃ se snížil o $-1,2 \Omega \cdot m^{-1} N^{-1}$. Výsledky měření ukazují, že tahová a tlaková napětí o stejné velikosti, která jsou aplikována na E₁ a E₃, vytvoří symetrickou charakteristiku ve směru smykové síly, viz obr. 11(b). Tímto byl předveden způsob, kterým dokáže senzor detekovat velikost a směr působící síly z různých směrů. [15]

Experimentální výsledky potvrdily více směrovou schopnost snímání senzoru na základě piezorezistivních charakteristik. Senzor na bázi polymeru může být použit pro levné aplikace taktilních senzorů, které vyžadují více směrné snímání a mechanickou flexibilitu. [15]

Obr. 11 Průběh působení normálové (a) a smykové (b) síly na senzoru s piezorezistory NiCr na bázi polymeru [15]



4.4 Taktilní snímače s tenzometry

Tenzometry jsou velmi využívanými snímači v automatizaci. Jsou přesné, spolehlivé, mají dlouhou životnost, malou hmotnost a velikost. [16]

Tenzometry se dělí na:

- Kovové – drátkové, fóliové a vrstevné
- Polovodičové – monokrystalické, polykrystalické

Jsou to pasivní čidla nalepená na povrchu součásti nebo spojená s měřeným tělesem. Na povrch jsou fixována pomocí lepidla, které minimálně ovlivňuje tenzometr svou teplotní roztažností. Jejich princip spočívá ve změně elektrického odporu při namáhání snímače silou. Hlavní částí tenzometru je elektrický vodič, který podléhá deformaci. Působením síly mění svou délku a průřez, a tím se mění i jeho odpor. Změnu odporu lze určit podle vzorce:

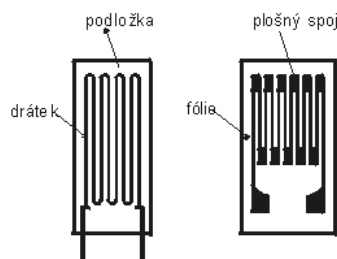
$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

Kde R (Ω) je odpor, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) je rezistivita a l (m) je délka vodiče. [16]

4.4.1 Kovový tenzometr

Kovový tenzometr se skládá z drátku o průměru cca 0,01 mm. Drátek je formován do specifického tvaru a přilepen na nevodivé podložce, jeho konce jsou spojeny s přívodními vodiči, viz. obr. 12. Kromě drátku se jako vodič používá také fólie tloušťky cca 0,001 mm. Je připevněna na nosné izolační podložce. [10]

Obr. 12 Drátový a fóliový tenzometr [17]



Tenzometr má více rovnoběžných úseků vodiče, spojených příčnými úseky. Tím je zvýšen jeho odpor při zachování přijatelné délky. Krátké příčné úseky s větším průřezem jsou málo citlivé na deformaci kolmou na podélnou osu měření. Pro fóliové a drátkové tenzometry

lze vypočítat relativní změnu odporu tenzometru $\Delta R/R$ vzhledem k relativnímu prodloužení ε ($=\Delta l/l$) ze známého vztahu:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K_\varepsilon \quad (3)$$

Kde R (Ω) je odpor tenzometru při výchozím mechanickém zatížení, ΔR (Ω) je přírůstek odporu tenzometru, K (-) je součinitel deformační citlivosti ($K \sim 2$) a ε (-) je poměrné prodloužení ($\varepsilon \sim 10^{-3}$). [17]

4.4.2 Polovodičový tenzometr

Polovodičový tenzometr je tvořen páskem vyříznutým z monokrystalu polovodiče (křemíku, germania aj.) znečištěného difuzí jiného materiálu. Rozšířenějším typem jsou monokrystalické, které jsou vytvořené difuzní technologií na Si substrátu. Pro masovou výrobu se využívají levné tenzometry s polovodičovou polykrystalickou vrstvou. Deformační citlivost polovodičového tenzometru je až stokrát větší než citlivost kovového tenzometru. U polovodičového tenzometru je závislost poměrné změny odporu na prodloužení vyjádřena rovnicí:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k_1 \varepsilon + k_2 \varepsilon^2 \quad (4)$$

Kde k_1, k_2 (-) jsou konstanty vyjadřující vlastnosti tenzometru (jeho citlivost). [17]

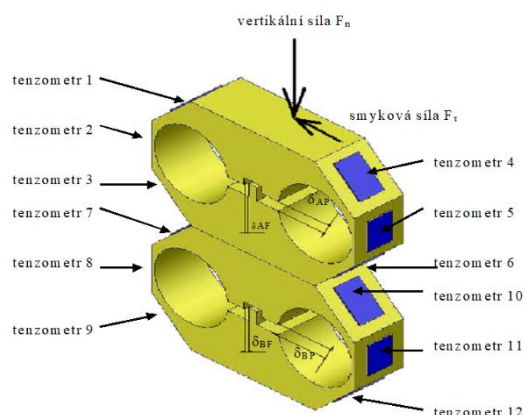
Ze vzorce je vidět, že u polovodičových tenzometrů je závislost změny odporu na deformaci nelineární (kvadratická). Typické hodnoty pro konstanty jsou $k_1 = +130$, $k_2 = +2500$ (při znečištění borem). [17]

Typický odpor pro kovové a polovodičové tenzometry v nezátíženém stavu je 120, 350 a 1000 Ω . Obecně lze vyvodit, že polovodičové tenzometry jsou mnohem citlivější na teplotní změny než kovové. Tenzometry se zapojují do Wheatstonova půlmůstku nebo plného můstku, kde při shodných tenzometrech dochází k jejich vzájemné teplotní kompenzaci. Rovněž se musí dbát na správné namáhání tenzometrů. Některé tenzometry v můstku lze nahradit pevnými odpory (tzv. půlmůstek). [17]

4.4.3 Snímač DOTS

Snímač DOTS (Double Octagon Tactile Sensor) je vícesložkový tenzometrický snímač, který dokáže současně měřit úchopnou normálovou a smykovou sílu. Byl vytvořen pro použití v robotice. Konstrukci snímače znázorňuje obr. 13. [4]

Obr. 13 Uspořádání tenzometrů na snímači DOTS [4]



Snímačem lze měřit i velké hodnoty síly s vysokou citlivostí. Jeho závislost mezi působící silou a výstupem je lineární. Základní těleso snímače má osmihranný tvar. Na těle jsou přilepeny tenzometry, které měří zatěžující normálové F_n i tangenciální (smykové) F_t síly. Jednotlivé složky síly může senzor změřit nezávisle na sobě, i za současného působení. Snímač lze dále zdvojit, čímž získáme ještě větší citlivost. Poloha tenzometrů na těle mění jejich vlastnosti měření, kdy některé skupiny tenzometrů lépe zachytí menší síly a jiné zachytí jen ty větší. [18]

4.5 Kapacitní taktilní senzory

Funkce senzoru je dána jeho základním prvkem. Kondenzátor je sestaven ze dvou kovových desek, které jsou od sebe odděleny dielektrikem (nevodivým materiálem). Kapacitní senzor využívá schopnost dielektrika shromažďovat elektrický náboj. Tuto schopnost určuje vzdálenost mezi deskami. Pokud nějaký objekt vstoupí do elektrického pole, dojde ke změně hodnoty kapacity kondenzátoru. [10] Princip kapacitních senzorů vychází ze známého vztahu (5) pro deskový kondenzátor nebo vztahu (6) pro válcový kondenzátor:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (5)$$

Kde C (F) je kapacita senzoru, ε_0 (Fm^{-1}) je permitivita vakua, ε_r (-) je relativní permitivita S (m^2) je plocha společných elektrod, d (m) je vzdálenost elektrod od sebe. [5]

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \quad (6)$$

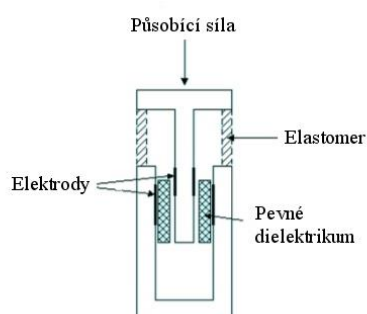
Kde l (m) je délka překrytí válců, r_1 (m) je poloměr vnitřního válce, r_2 (m) je poloměr vnějšího válce. [5]

Kapacitní dotykový senzor se mění podle způsobu použití. Buď dochází ke změně vzdálenosti mezi deskami (elektrodami), nebo ke změně účinné plochy kondenzátoru. [5]

4.5.1 Senzor se změnou účinné plochy kondenzátorů

Na obr. 14 je zobrazen průřez kapacitního dotykového senzoru. Kondenzátor se skládá ze dvou elektrod (desek), z nichž jedna je pohyblivá a druhá je pevná. Samotná elektroda se skládá ze tří částí: tenký pružný materiál, vlastní hliníková elektroda a dielektrikum. Mezi elektrodami je využit vysoce dielektrický polymer, který maximalizuje změnu kapacity. Díky koaxiální konstrukci má kapacita senzoru větší nárůst při zatěžování silou než v případě konstrukce paralelních desek. Popsaný senzor je využíván buď samostatně, nebo ve skupině jako maticový snímač. [10]

Obr. 14 Průřez kapacitního taktilního senzoru [10]



Za předpokladu, že d =konstanta, ϵ_r =konstanta a plocha překrývajících se elektrod je obdélníková o stranách b a l , přičemž strana b =konstanta, lze pro kapacitu snímače napsat vztah:

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_r bl}{d} \quad (7)$$

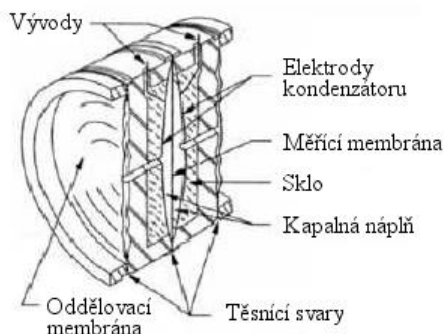
Kde b (m) je délka strany obdélníkové elektrody. [5]

4.5.2 Senzor se změnou vzdálenosti mezi deskami

Senzor na obr. 15 se skládá ze tří elektrod. Po stranách štěrbině se nachází dvě pevné elektrody a mezi nimi je jedna pohyblivá membrána (elektroda). Tímto složením vznikly dva snímací kondenzátory. Tento senzor využívá jako dielektrikum vzduch nebo kapalnou náplň

(olej). Působením síly na membránu dojde k jejímu vychýlení a ke změně vzdálenosti mezi elektrodami. Tím se změní velikost dielektrika a následovně výsledná kapacita senzoru. [10]

Obr. 15 Senzor se změnou vzdálenosti desek [10]



Pokud uvažujeme, že S =konstanta a ϵ_r =konstanta, platí při změně vzdálenosti elektrod o vzdálenost Δd pro kapacitu vztah:

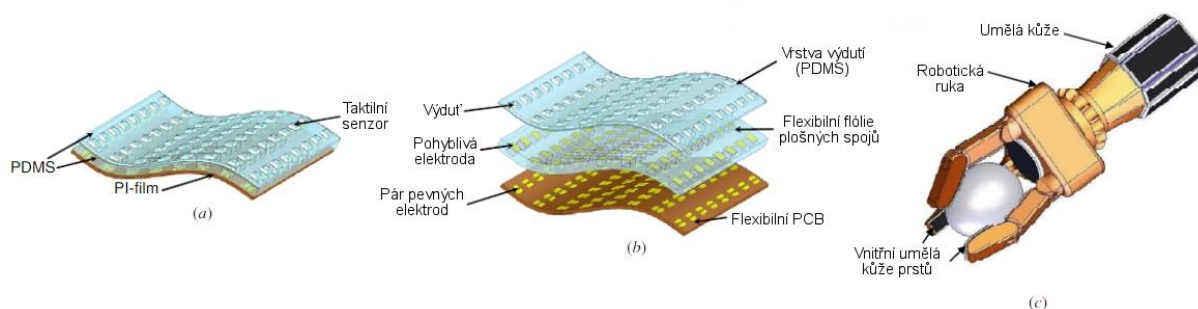
$$C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d_1} + (-\epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d_2}) \quad (8)$$

4.5.3 Kapacitní dotykové snímací pole s pohyblivými elektrodami

Taktilní snímací pole lze také realizovat pomocí kapacitních senzorů. Ve srovnání s přístupy, založenými na vodivých polymerech, je kapacitní snímání odolné vůči změnám teploty. Ačkoli je kapacitní snímací pole ovlivňováno vnějšími vlivy rušení (např. elektromagnetické vlny), má výhodu v lineární odezvě a detekci různých druhů materiálu. [19]

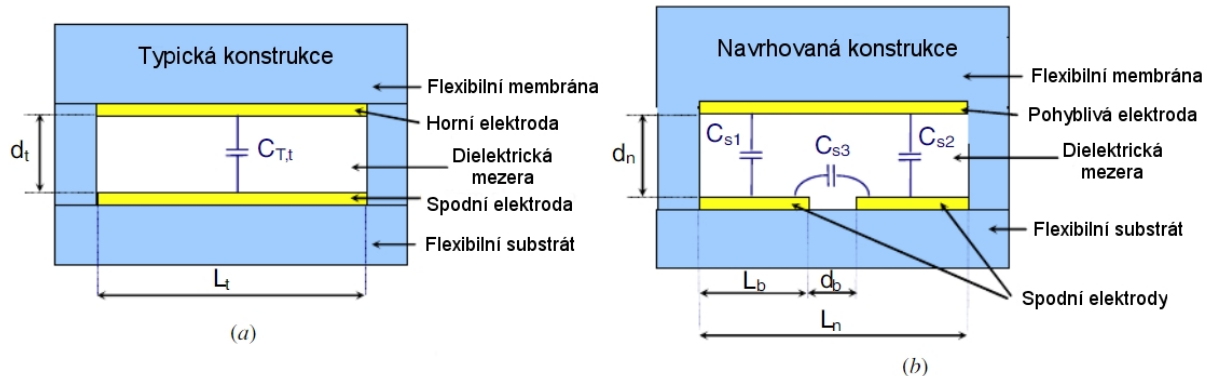
Pole je realizováno pomocí výrobní technologie MEMS a technologie pružné fólie plošných spojů (FPCB). MEMS (Micro-electromechanical Systems) je technika používaná k výrobě miniaturizovaných mechanických a elektromechanických součástí za pomoci polovodičových výrobních procesů, jako je iontová implantace, difúze, oxidace či rozprašování. Obr. 16(a) ukazuje schéma kapacitního sensorového pole, rozložený výkres zařízení obr. 16(b) a aplikaci na robotickou ruku obr. 16(c). [19]

Obr. 16 Konstrukce kapacitního dotykového snímacího pole s pohyblivými elektrodami [19]



Senzorové pole je vyrobeno ze dvou mikromachinovaných polydimethylsiloxanových (PDMS) vrstev a fólie plošných spojů. FPCB z anglického Flexible Printed Circuit Board je nazývána technologie výroby plně flexibilních plošných spojů, která využívá technologii 3D tisku. 3D tiskárka vyrábí kompletní plošný spoj, nejčastěji se používají kombinace nevodivého foto-polymeru a vodivého inkoustu. Oba materiály jsou nanášeny ve vrstvách, dokud nevznikne konečný výrobek. Díky použití flexibilních materiálů je finální spoj ohebný. [20] Jednotlivé kapacitní senzory se skládají ze dvou snímacích elektrod a jedné společné pohyblivé elektrody. Snímací elektrody jsou společně s vodivými cestami plošných spojů implementovány na pružnou folii, zatímco pohyblivá elektroda je součástí jedné z vrstev PDMS. Využitím této speciální konstrukce bylo docíleno zjednodušení složitosti ve snímací struktuře pole, což vedlo ke snazší výrobě samotného zařízení. Dotykové snímací pole bylo použito např. jako umělá kůže pro robotické aplikace. [19]

Obr. 17 Schéma typického kapacitního snímacího mechanismu [19]



Na obr. 17 je uveden rozdíl mezi klasickou (a) a popisovanou konstrukcí (b) kapacitního snímacího mechanismu. V obou případech platí, že pokud je snímací prvek zatížen silou, snižuje se dielektrická mezera mezi elektrodami. Tím se zvýší kapacita snímacího prvku a dojde k detekci zatěžující síly. [19]

Celková kapacita mezi horní a spodní elektrodou pro klasické provedení (obr. 17(a)) je popsána vzorcem (9). V případě navrhované konstrukce (obr. 17(b)) je spodní elektroda rozdělena na dvě části. Pokud je splněna podmínka, která se týká rovnosti délek obou částí spodní elektrody, pak celková kapacita ($C_{T,n}$) měřená mezi dvěma snímacími elektrodami může být odvozena jako:

$$C_{T,n} = \frac{1}{\frac{1}{C_{s1}} + \frac{1}{C_{s2}}} = \frac{\epsilon_0 S d}{2 d_n} \quad (9)$$

Kde: c_{s1} , c_{s2} (F) jsou kapacity mezi pohyblivou hodní elektrodou a dvěma spodními elektrodami, $S_d = L_b L_n \cong L_n^2/2$ (m²) je plocha elektrod. [19]

Za předpokladu, že rozměry obou uvažovaných konstrukcí jsou stejné ($L_n = L_t$ a $d_n = d_t$), potom vztah mezi celkovou kapacitou těchto dvou návrhů je:

$$C_{T,n} = \frac{1}{4} C_{T,t} \quad (10)$$

Z uvedeného vztahu (10) lze vyvodit, že při působení stejně velké síly na oba typy senzoru vyvolá u popisované konstrukce čtyřikrát větší změnu kapacity. Jsou lépe rozpoznány malé přírůstky síly, tudíž je tato konstrukce senzoru citlivější, než klasická. [19]

4.6 Magnetické taktilní senzory

Magnetické senzory slouží k bezdotykové detekci polohy, při níž nedochází k opotřebení senzoru. Využívají se tam, kde nestačí indukční senzory z hlediska spínacích vzdáleností. Mají delší spínací vzdálenosti při stejných nebo i značně menších rozměrech snímače. Další výhoda spočívá v samotném magnetismu, neboť magnetické pole dokáže projít všemi nemagnetickými materiály. [21]

Magnetický senzor má několik možných funkčních provedení, které mají odlišný princip a mohou mít i rozdílné vlastnosti. Magnetické senzory lze tedy rozdělit do těchto skupin:

- 1) Magneto-mechanický Reedův senzor
- 2) Magnetoindukční senzory (senzory s nasycovaným jádrem cívky)
- 3) Senzory s Halloovou sondou
- 4) Magnetorezistivní sondy

U taktilních senzorů založených na magnetickém přenosu rozeznáváme více metod. První metoda využívá změnu hustoty toku při působení síly na magnet. Tento jev je znám jako magnetoanizotropie. Druhá metoda je založena na magnetoelastickém materiálu, který se pod tlakem deformuje a způsobuje proměnnou magnetickou vazbu mezi vinutím transformátoru. [21]

Principy senzorů se zakládají na změně permeability feromagnetických těles, která je závislá na působení okolních vlivů. Při změně permeability dochází v magnetickém obvodu ke změnám magnetické impedance a indukčnosti. Následuje změna impedance cívky přítomné v magnetickém obvodu. [21]

4.6.1 Snímač na principu magnetostrikce

Magnetostrikční jev vychází ze dvou dalších jevů, a to z Wiedemannova a Villariho (magneto-elastického) jevu. Wiedemannův jev říká, že pokud prochází proud dlouhou a tenkou tyčí z feromagnetického materiálu, která je umístěna v podélném magnetickém poli, tyč je pak namáhána krutem. Villariho jev popisuje změnu magnetických vlastností, které jsou vyvolány její deformací v podélném směru. [22]

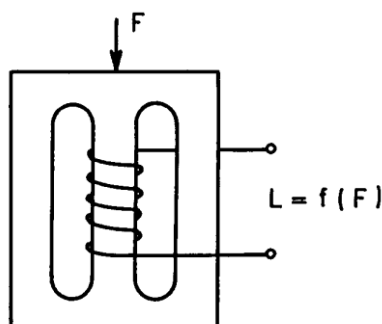
Samotná magnetostrikce představuje fyzikální jev, kdy se mění rozměry feromagnetických materiálů pod vlivem magnetického pole, nebo se naopak mění permeabilita při působení vnějších sil. Jev lze popsat rovnicí:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2\lambda_s\mu^2\sigma}{B_{2s}} = K \frac{\Delta l}{l} \quad (11)$$

Kde λ_s (T^{-2}) je číselný koeficient magnetostrikce při nasycení, B_s (T) je magnetická indukce při nasycení, $\mu = \mu_0\mu_r$ ($H\cdot m^{-1}$) je permeabilita, σ ($N\cdot m^{-2}$) je mechanické napětí a K (-) je konstanta. [22]

Principiální schéma senzoru znázorňuje obr. 18. V základu je senzor tvořen uzavřeným magnetickým obvodem s minimálně jedním vinutím. Vlivem působení síly F na jádro obvodu se mění permeabilita μ feromagnetického materiálu. Tím se mění reluktance magnetického obvodu R_m a následně indukčnost L měřicí cívky, a tedy i její impedance. [23]

Obr. 18 Schématický princip magnetostrikce [23]



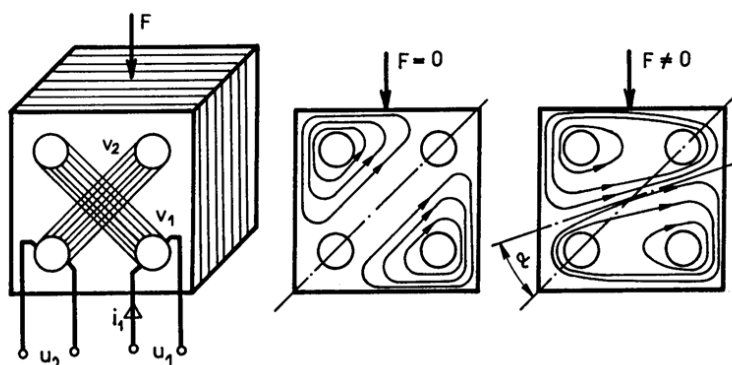
Tyto snímače se vyznačují jednoduchostí a spolehlivostí a jsou určeny pro velké síly. Ve snímačích se využívají materiály s vysokou hodnotou permeability a malou hodnotou magnetické indukce B_s při sycení, viz uvedený vztah. Proto se často používá permalloyová slitina (niklu, železa a molybdenu) nebo obyčejná měkká ocel. Aby nedocházelo ke změně magnetického odporu vlivem parazitních vzduchových mezer, vyrábí se feromagnetický obvod se zabroušenými stykovými plochami. Z důvodu teplotní kompenzace se k primárnímu

vinutí mnohdy přidává teploměrné vinutí. Pro snímače se testuje vhodnost nových materiálů. V úvahu přicházejí amorfní magnetické materiály jako je např. kovové sklo z důvodu větší tvrdosti, vyšší citlivosti, lepší stability a vyšší hodnoty napětí. [24]

4.6.2 Senzor na principu magnetoanizotropie

Senzory využívají princip magnetoanizotropie. Působením na feromagnetické jádro silou dojde k deformaci magnetické pole senzoru. Konstrukce a princip snímače je patrný z obr. 19. [23]

Obr. 19 Princip magnetoanizotropního senzoru [23]



Jádro snímače je vyrobeno z plného feromagnetického materiálu nebo složeno z plechů. V jádru jsou čtyři otvory ve stejné vzdálenosti od středu. Skrze otvory jsou provlečena primární V_1 a sekundární V_2 vinutí, která jsou na sebe kolmá. Pokud není snímač zatížen žádnou silou, pak se na jeho sekundárním vinutí V_2 nebude indukovat žádné napětí. V případě, že bude na snímač působit síla, dojde k anizotropnímu rozšíření oblasti se zvýšenou permeabilitou pod úhlem α od hlavní úhlopříčky jádra. Důsledkem toho část magnetického toku z primárního vinutí V_1 ovlivní sekundární vinutí V_2 , ve kterém se bude následovně indukovat napětí U_2 , jehož velikost je úměrná působící síle. Daný jev je popsán vztahem níže:

$$u_2 = -M_{12} \frac{di_1}{dt} = k * \sin \alpha \quad (12)$$

Kde U_2 (V) je výstupní napětí, M_{12} (H) je vzájemná indukčnost mezi vinutími V_1 a V_2 a I_1 (A) je proud primární budící vinutím. [16]

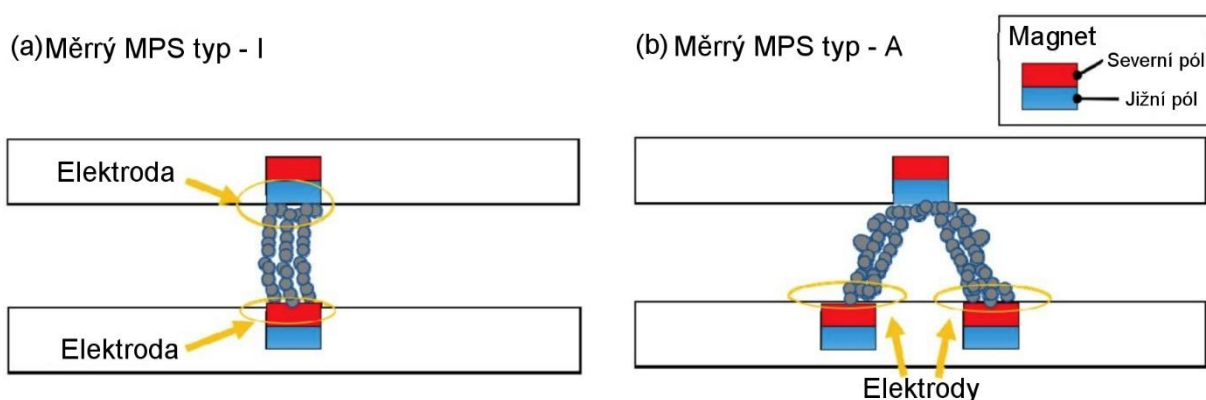
Snímače jsou nasazovány v aplikacích, kde ostatní metody nevyhoví, a to díky jejich velké robustnosti. Jsou používány v extrémních podmínkách, kde se dosahuje vysokého tlaku (až 35 MPa), v prostředí se zvýšenou prašností či vlhkostí. [16]

4.6.3 Měkký magnetický prachový senzor pro taktilní snímání

Měkké odporové dotykové senzory jsou všestranná zařízení, která se využívají v moderní pružné elektronice nové generace. Shunsuke Nagahama a kol. (2019) vyvinuli na WASEDA University nový typ měkkého odporového taktilního senzoru. Nazvali ho „měkký magnetický práškový senzor“ (soft-MPS). Po sestavení senzoru na něm provedli měření a vyhodnotili charakteristiky odezvy senzoru. Měkký senzor využívá feromagnetický prášek, který se rozprostře v závislosti působení magnetického pole, a následovně je imobilizován v membráně na bázi silikonového kaučuku, jako je polydimethylsiloxan (PDMS). Při zatížení senzoru vnější silou se změní vzdálenost mezi částicemi prášku a to ovlivní jeho odpor. Vnitřní část senzoru lze vyrobit v jakémkoli tvaru podle rozložení řídicího magnetického pole. Bylo vyrobeno více měkkých MPS s různými tvrdostmi, které dokázaly detekovat různé rozsahy malých sil. Senzor byl využit k detekci kolizí u robotických rukou nebo v ultracitlivých dotykových obrazovkách. [25]

Uvnitř magnetického senzoru může být magnetické pole orientováno různými způsoby. Obecné odporové senzory obvykle používají uspořádání znázorněné na obrázku 20(a). Elektroda je u tohoto typu umístěna na namáhané ploše, čímž dochází k opotřebování senzoru a snížení jeho životnosti. U navrhovaného typu měkkého MPS jsou elektrody umístěny na spodní desce, jak je znázorněno na obrázku 20(b). [25]

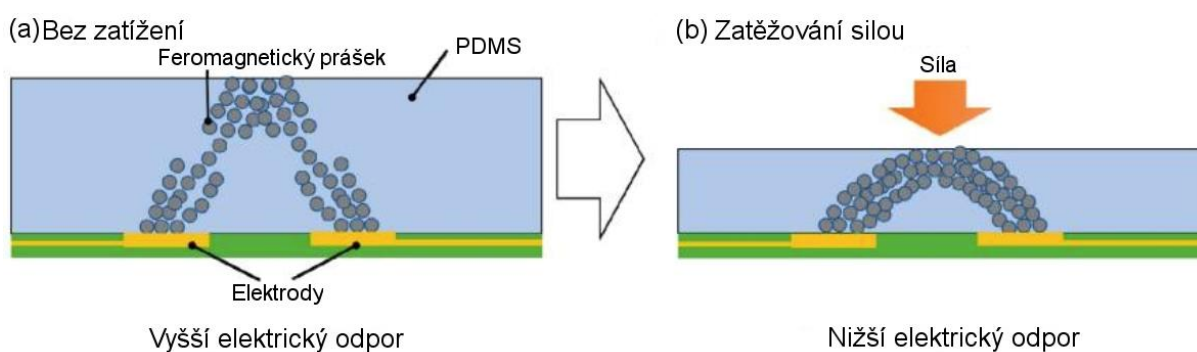
Obr. 20 Orientace magnetického pole feromagnetického prášku pro dva různé typy senzorů [25]



Následující obr. 21 ukazuje princip měření odporu měkkého-MPS typu A. Při působení vnější síly na senzor se mění intergranulární vzdálenost částic feromagnetického prášku. Dojde ke změně hustoty magnetického toku, která je doprovázena změnou odporu. Z těchto změn lze určit posuv a sílu. Během výrobního procesu dochází k uspořádání feromagnetického prášku podle magnetických siločar permanentních magnetů fixovaných na rovnoběžných deskách. Protože je zatím prášek zachycen pouze v magnetickém poli, mohlo

by dojít při vibracích nebo nárazu k jeho posunu. Proto je prášek dále znehybněn pomocí měkkého gelu z PDMS. Kromě znehybnění je pružnost silikonového gelu používána i jako obnovovací síla, která obnoví počáteční vzdálenost mezi deskami před působením vnější síly. Díky fixaci feromagnetických částic gelem má měkký MPS konečný elektrický odpor i při nepřítomnosti vnější síly. Předpokládá se, že pokud je feromagnetický prášek vyrovnán podél magnetického pole, bude změna odporu způsobená aplikovanou silou malá. Po výrobě se odpor změní v důsledku změny vzdálenosti částic prášku, protože nedochází k omezení magnetickým polem. Kromě toho MPS měří změny odporu v relativně velké mezeře (až 3 mm). [25]

Obr. 21 Působení síly na měkký MPS [25]



Tento senzor kombinuje vysokou citlivost feromagnetického prášku se stabilitou a trvanlivostí působení magnetického pole. Měření senzorů potvrdilo detekování malých sil. Bylo vyhodnoceno výstupní napětí v závislosti na vstupní síle a mezi vstupem a výstupem bylo pozorováno krátké časové zpoždění. Do budoucna chtějí autoři provést modelování měkkého-MPS ke studiu metod minimalizování problematiky hystereze, která vzniká při použití flexibilních materiálů. [25]

4.7 Optické taktilní senzory

V optických senzorech jsou optická vlákna využívána jako médium pro přenos světla. Uvnitř vlákna dochází k modulaci procházejícího světla vlivem vnějších podmínek. U procházejícího světla lze měnit jeho amplitudu, fázi, polarizaci nebo intenzitu. Na vstupu optického senzoru je umístěn zdroj světla (nejčastěji laser, laserová dioda, popř. LED), který generuje signál do optického vlákna. Na výstupu senzoru je naopak fotodetektor (fotodioda, fototranzistor, fotorezistor), který zachycuje modulovaný optický signál. [4] Mezi výhody optických senzorů patří nízká hmotnost, fyzická flexibilita, chemická inertnost, rychlá odezva a malá velikost. Dále jsou imunní vůči vnějšímu elektromagnetickému rušení, této vlastnosti se využívá v lékařství při magnetické rezonanci. Senzory umožňují přenášet

informaci mezi objekty s rozdílnými potenciály a mohou ji přenášet ve velkém kmitočtovém intervalu na dlouhé vzdálenosti. Pokud je více optických senzorů zapojeno do jednoho pole, pak mezi jednotlivými optickými vlákny nedochází k žádnému propojení a vzájemnému rušení, protože se jedná o pasivní elektrické prvky. To přináší výhodu oproti kapacitním a piezoelektrickým senzorům. [26]

Optické senzory lze dělit podle typu použitých optických vláken na:

- 1) Jednovidové senzory – u kterých se využívá jednobodového optického vlákna a koherentního zdroje záření.
- 2) Mnohovidové senzory – ty využívají mnohovidového optického vlákna a nekoherentního zdroje záření.

Mezi principy, na kterých optické senzory pracují, patří modulace intenzity světla, technologie vláknové Braggovy mřížky (FBG) a detekce interferometrie, přičemž první dva principy jsou využívány nejčastěji. [27]

Podle způsobu modulace intenzity světla dělíme senzory na:

- 1) Amplitudové
- 2) Fázové
- 3) Polarizační
- 4) Frekvenční
- 5) Senzory se spektrálními vlastnostmi světla

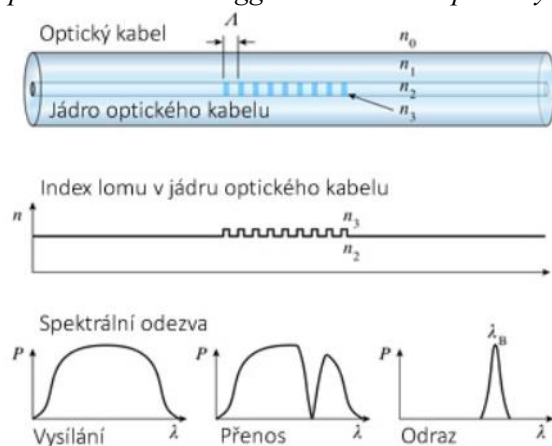
Pro taktilní čidla se nejvíce používá změna amplitudy procházejícího světla. Tu můžeme ovlivnit několika způsoby:

- 1) Změnou okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí
- 2) Změnou vzájemné optické vazby
- 3) Změnou tlumení
- 4) Změnou přechodu a odrazu světla [27]

4.7.1 Optický senzor s Braggovou mřížkou

Skrze vláknový snímač se přenáší světlo pomocí tzv. totálního odrazu, ke kterému dochází na hranici jádra s obalem uvnitř optického vlákna. Totální odraz světla vzniká při změně indexu lomu, kdy jádro má vyšší index lomu, než jeho obal. Tento princip odrazu světla využívá i optický senzor s Braggovou mřížkou (fiber Bragg senzor, FBG). Mřížku uvnitř optického vlákna tvoří skupina poruch indexu lomu, která se vytvoří lokálně v místě měření deformace, viz obr. 22. Při průchodu širokopásmového světla dojde k odrazení pouze části světelného toku od Braggovy mřížky. Perioda mřížky určí odraženou část světla s určitou vlnovou délkou. Při působení síly na optické vlákno dochází k jeho deformaci, a tím ke změně periody mřížky a indexu lomu, což zapříčiní změnu vlnové délky odraženého světla. [28]

Obr. 22 Optické vlákno s Braggovou mřížkou a průběhy signálů [29]



Vlnová délka odraženého světla je dána vztahem:

$$\lambda_b = 2n_e \Lambda \quad (13)$$

Kde λ_b (m) je vlnová délka odraženého světla n_e , n_e (-) je index lomu světla ve vláknu,

Λ (m) je perioda mřížky.

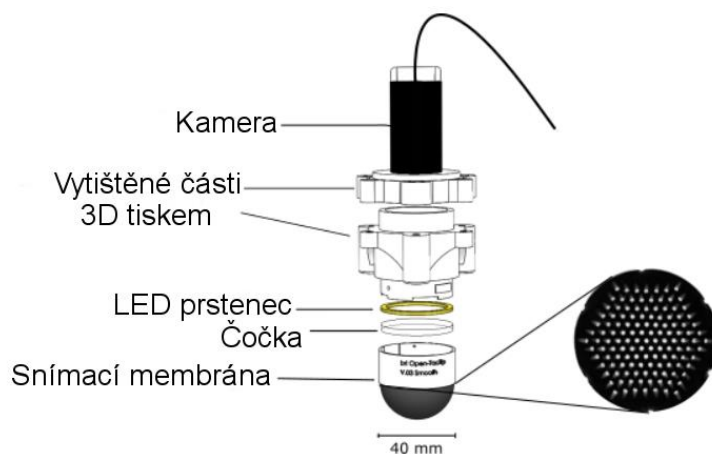
Tento optický senzor se využívá například pro indikaci dílčích pohybů mostních konstrukcí. [28]

4.7.2 Senzor TacTip

TacTip je optický měkký dotykový senzor, vyvinutý a vyrobený pomocí 3D tisku v Bristol Robotics Laboratory. Senzor byl vyvinut s cílem splnit potřebu levného, robustního, všestranného taktálního senzoru, který lze instalovat na průmyslová ramena robotů, a zaměřit

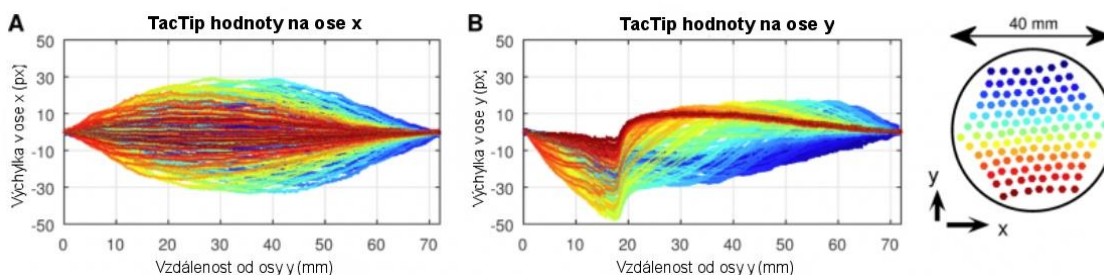
se na případnou integraci do robotických rukou za účelem manipulace. Jednotlivé části senzoru jsou vidět na obr. 23. [30]

Obr. 23 Konstrukce senzoru TacTip [30]



Dotykovou plochu senzoru tvoří měkký hemisférický polštářek (membrána), vyrobený z lisované silikonové pryže (Vytaflex 60). Zevnitř je polštářek vyplněn opticky čirým silikonovým gelem (RTV27905). Vnitřek polštářku je osazen skupinou pinů s bílou špičkou uspořádaných do šestihranné trojúhelníkové matice. Tato struktura se inspiroje chováním lidské kůže, kdy při dotyku vnitřní strany prstu s předmětem nebo povrchem dochází k deformaci v epidermálních vrstvách kůže. Tato změna je detekována a přenášena skrz mechanoreceptory. [30]

Obr. 24 Naměřená hodnoty při dotyku pinů senzoru TacTip [30]



Piny se při kontaktu s jiným objektem také deformují. Jejich deformace je snímána pomocí integrované kamery (Microsoft Lifecam Cinema). Vzory vzniklé z posunutých pinů mohou poskytovat informace o tvaru objektu, poloze objektu, dotykové síle, točivém momentu a stříhu. Pozice pinů jsou detekovány pomocí algoritmů rozpoznání obrazu (OpenCV). Jejich x a y výchylky do os x a y jsou považovány za nezávislé taxely (senzory se schopností rozpoznat sílu dotyku s jiným objektem). Obr. 24 vyobrazuje soubor dat získaný při kontaktu senzoru s válcem podél jeho vodorovné plochy. Jednotlivé barvy

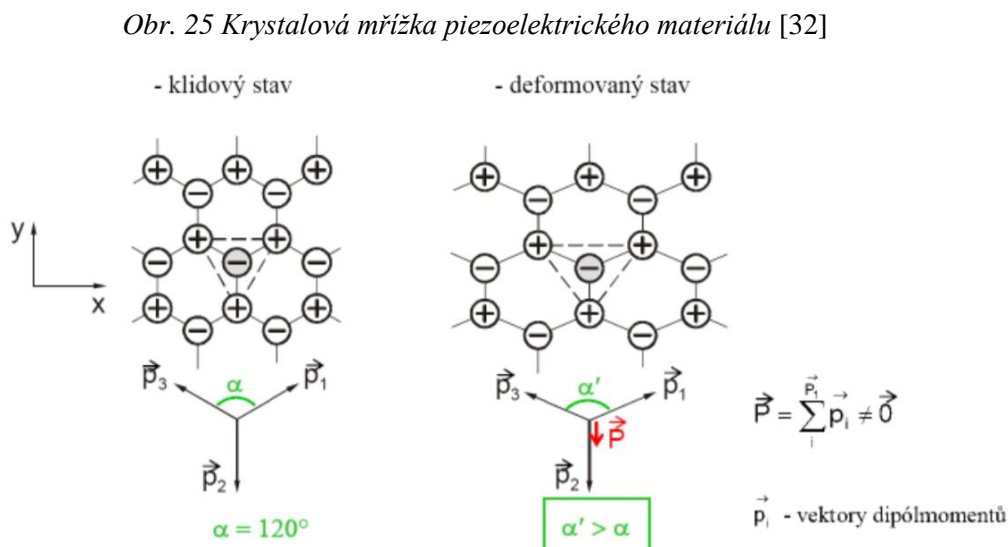
průběhů v grafech A a B odpovídají pinům senzoru, jak je znázorněno v pravé části obrázku. [30]

Původní koncept senzoru TacTip je robustní, dosahuje vysoké citlivosti a přesné rozlišovací schopnosti v mikrometrech. Avšak pokroky v multimateriálnímu 3D tisku umožňují vědcům vyrábět rychle prototypy robotických rukou a přizpůsobitelné senzory s integrovanými měkkými povrchy. Nové modely senzorů se proto rychle měn v závislosti na jejich praktickém využití. I na senzoru TacTip se provádí řada úprav, aby se zvýšila jeho funkčnost. Cílem je nadále snižovat náklady, minimalizovat rozměry senzoru, optimalizovat přesnost senzoru a ulehčovat jeho používání. Vylepšením původního senzoru vznikli další typy: TacTip-GR2, TacTip-M2, a TacCylinder. [31]

4.8 Taktilní senzory s piezoelektrickými materiály

Tyto senzory využívají tzv. přímý piezoelektrický jev. Jedná se o schopnost krystalů některých dielektrických látek vytvářet elektrické napětí při jejich mechanické deformaci. Je znám i opačný jev (nepřímý piezoelektrický jev), kdy se krystal v elektrickém poli deformuje. Piezoelektrický jev se vyskytuje pouze u krystalických látek s nesymetrií středu v krystalové mřížce. [4]

U takových typů mřížek dochází při deformaci k posunu iontů opačných nábojů. Jak je vidět na obr. 25, elektrická těžiště záporných a kladných iontů zaujímají v klidovém stavu určitou vzdálenost, která se deformací změní a ionty se od sebe vzdálí. Tím se vytvoří na některých plochách krystalu elektrický náboj, který následně vyvolá vnitřní elektrické pole. [32]



Vzniklý elektrický náboj je přímo úměrný působící síle a konstantě piezoelektrického jevu. Napětí, které odpovídá vzniklému náboji, se odebírá z elektrod vyvedených přímo na krystalu. [32]

$$Q = dF_x \quad (14)$$

Kde Q (C) je náboj na elektrodách, d (CN^{-1}) je piezoelektrická konstanta – pro SiO_2 je $d = 2,3 \times 10^{-12}$ (CN^{-1}) a F_x (N) je síla působící na výbrus krystalu. [33]

Používaný piezoelektrický materiál v senzorech rozlišujeme podle struktury:

- 1) krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly): oxid křemičitý SiO_2 (křemen), lithium niobát LiNbO_3 , lithium tantalát LiTaO_3 , germanium bizmut $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, triglycin sulfát TGS
- 2) polykrystalické piezoelektrické látky (piezoelektrická keramika): titani čitan barnatý BaTiO_3 , zirkoničitan olovnatý PbZrO_3 , titaničitan olovnatý PbTiO_3 , PZT – olovozirkonát titanát
- 3) organické polymery (piezoelektrické polymery): polyvinylchlorid (PVC), polyvinylfluorid (PVF), difluorpolyetylén (PVF) nebo polyvinylidenfluorid (PVDF) [32]

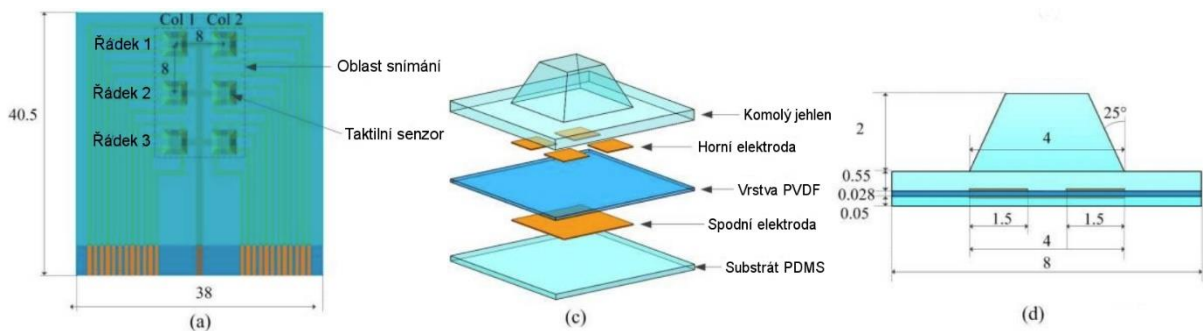
Piezoelektrické senzory se používají pro snímání dynamických sil nebo vibrací. Jejich výhodou je jednoduchá konstrukce, malé rozměry a velkým měřitelný frekvenční rozsah (do 100 kHz). Generují měřicí signál s chybou blízké 1 %. Nevýhodou je velký vnitřní odpor, který vyžaduje vstupní odpor vyhodnocovacích obvodů (řádově $10^{12} \Omega$). Dále velmi špatně snímají statické síly, protože indukovaný náboj v piezoelektrických materiálech se velmi rychle rozptýlí. Musí být použit zesilovač náboje, který sebou přináší ve většině případů další problémy. Nakonec není konstrukce senzoru příliš odolná, tj. má malou robustnost. Senzory se uplatňují zejména při měření tlaku, tlakové síly, zrychlení, výchylky a mechanického napětí. [33]

4.8.1 Flexibilní sensorové pole pro měření dynamické síly

Pro měření prostorového dynamického rozložení síly byl navržen nový typ flexibilního piezoelektrického sensorového pole, které je založeno na polyvinylidenfluoridové (PVDF) vrstvě (filmu). Na obr. 26(a) je vidět sensorové pole, které se skládá ze šesti taktilních sensorů uspořádaných do matice 3×2 s rozstupem 8 mm mezi jednotlivými senzory. Pohled

na rozložený taktilní senzor ukazuje obr. 26(c). Skládá se z pěti vrstev: nárazová vrstva PDMS, horní hliníková (Al) elektroda, vrstva PVDF filmu, spodní Al elektroda a vrstva substrátu PDMS. Elektrody o tloušťce 200 nm se vyrábí mokřým leptáním oboustranného metalizovaného filmu PVDF. PVDF fólie se vkládá mezi čtyři horní a jednu dolní elektrodu, čímž dojde ke vzniku čtyř piezoelektrických kondenzátorů. Každý kondenzátor má plochu desek o velikosti $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$. Nad horními elektrodami je umístěn komolý jehlan z PDMS o rozměrech $4 \times 4 \times 2 \text{ mm}$. Je upevněn ve středu senzoru, přičemž rohy jeho základny jsou zarovnané s rohy horních elektrod, viz obr. 26(d). Jehlan slouží k lepšímu přenosu síly na elektrody. [34]

Obr. 26 Konceptuální schéma tříosého dotykového sensorového pole [34]



PVDF je piezoelektrický fluoplast, který při mechanické deformaci generuje náboj. Obecný vztah mezi vzniklým nábojem, elektrickým polem a mechanickým napětím je vyjádřen v následující rovnici:

$$Q_i = \sum_{q=1}^6 k_{ip} F_q + \sum_{k=1}^3 \varepsilon_{ik}^F E_k, i = 1,2,3 \quad (15)$$

Kde Q_i (C) je vzniklý elektrický náboj ve směru i , F_q (N) je mechanické napětí ve směru q , E_k (N.C⁻¹) je elektrické pole ve směru k , k_{ip} (C.N⁻¹) je piezoelektrická konstanta a ε_{ik}^F (Fm⁻¹) je permitivita (dielektrická konstanta) při konstantním napětí. [34]

V případě navrhovaného senzoru se fólie PVDF deformuje axiálně bez působení vnějšího elektrického pole. Proto lze vztah (15) upravit do této podoby:

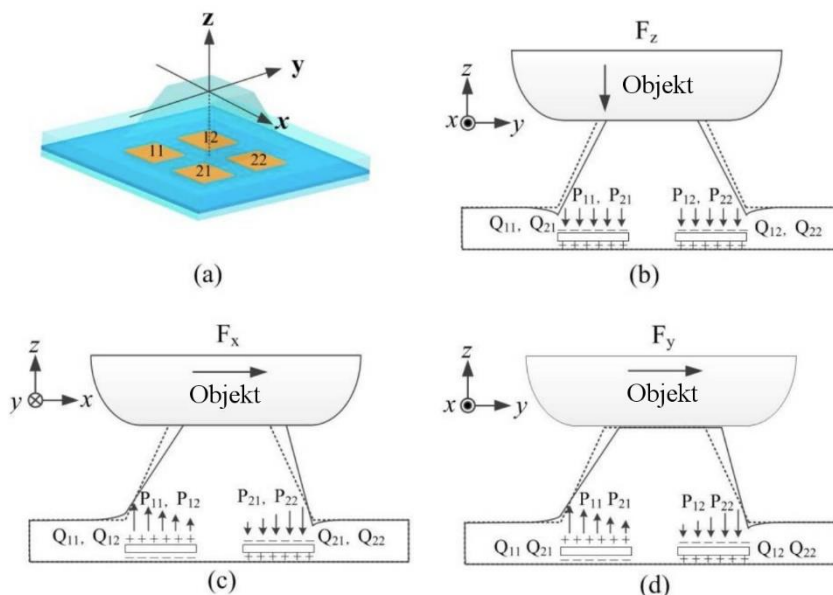
$$Q = k_p F_a \quad (16)$$

Kde k_p (C.N⁻¹) je piezoelektrická konstanta, F_a (N) je axiální mechanická síla. [34]

Obr. 27 ukazuje princip snímání tříosé síly taktilním senzorem. Působící tříosou sílu na komolý jehlan je možné rozdělit na jednotlivé složky, které jsou na sebe navzájem kolmé.

Jedná se o jednu složku normálové síly (F_z) a dvě složky smykové síly (F_x a F_y). Směry jednotlivých složek jsou určeny na obr. 27(a), přičemž normálová složka má axiální směr. Pod zatížením silou v ose z se komolý jehlan stlačuje a přenáší tlak rovnoměrně na čtyři piezoelektrické kondenzátory o stejné velikosti (P_{11} , P_{12} , P_{21} a P_{22}). Deformací filmu PVDF se na horních elektrodách generují náboje (Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} a Q_{22}) se stejnou velikostí a zápornou polaritou, zatímco na spodních elektrodách se generují ekvivalentní kladné náboje. Při použití smykové síly se na upevněné základně jehlanu vytváří kroutící moment. Díky tomu jsou kondenzátory na levé straně namáhány tahovým napětím a kondenzátory na pravé straně tlakovým napětím, jak je znázorněno na obr. 27(c, d). Výsledkem je vznik nábojů s opačnou polaritou u elektrod na levé a pravé straně. Z toho vyplývá, že F_z se vypočítá pomocí průměrných hodnot Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} a Q_{22} a F_x a F_y se počítá z rozdílů mezi Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} a Q_{22} . [34]

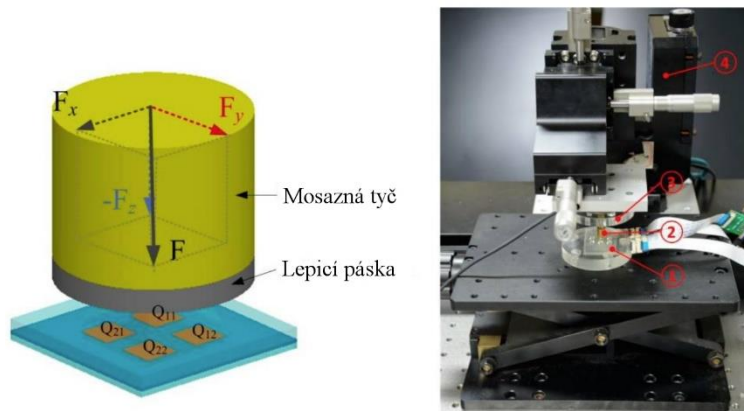
Obr. 27 Princip namáhání piezoelektrických kondenzátorů taktilního senzoru [34]



Při kalibračních zkouškách byla vnější síla aplikována samostatně ve třech osách. Ve skutečnosti, při obratné manipulaci, jsou složky síly ve třech osách vždy aplikovány současně, což vytváří výslednou sílu. Bylo provedeno dynamické měření tříosé síly, které mělo za cíl ověřit vyvinutý datový model. Schéma a fotografie měření jsou znázorněny na obr. 28. Skrze mosaznou tyč je aplikována dynamická tříosá síla na každý taktilní senzor. Na hrotu mosazné tyče je nanášena lepidlová folie, která se při dotyku přilepí k vrcholu komolého jehlanu. Poté následuje automatický pohyb tyče v ose x , y a z , tím je na taktilní senzor aplikována dynamická síla F a její složky F_x , F_y a F_z . Samotná mosazná tyč je upevněna v šestiosé

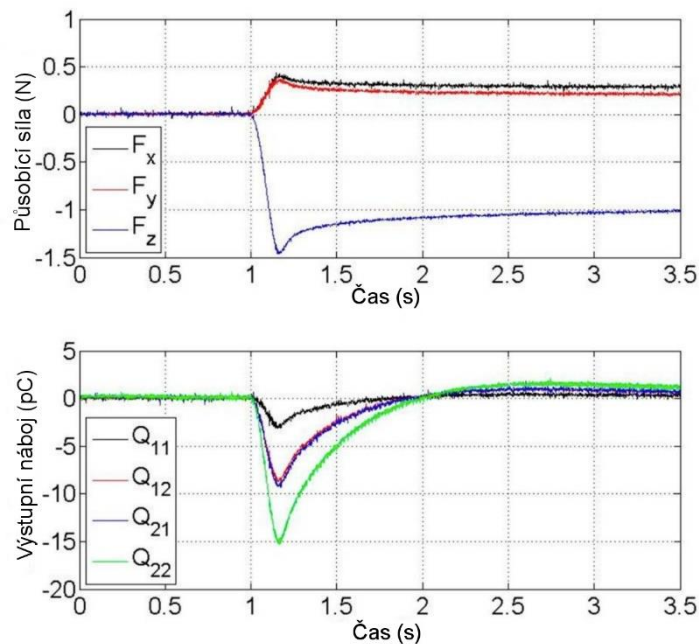
snímací hlavici, která je instalována na elektrické třísové pohybové plošině (M-VP-25XL-XYZ). [34]

Obr. 28 Působení síly na jehlan sensorového pole



Při měření byla na senzor U_{ij} (senzor umístěný v i -té řadě a j -tém sloupci, viditelné v obr. 26(a), $i = 1, 2, 3, j = 1, 2$) aplikována dynamická síla s rozdílnou velikostí jednotlivých složek. Aplikované složky o velikosti $F_x = 0,4 \text{ N}$, $F_y = 0,36 \text{ N}$ a $F_z = -1,45 \text{ N}$ na taktilní senzor (U_{12}) vytvořily charakteristickou odezvu, jejíž průběh zachycuje obr. 29. První charakteristika zobrazuje průběh aplikované síly v čase, zaznamenaný pomocí siloměru. Druhá charakteristika ukazuje reakci čtyř piezoelektrických kondenzátorů. Z průběhu je zřejmé, že pokud dojde ke změně aplikované síly, výstupní náboje Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} a Q_{22} reagují okamžitou změnou své velikosti odpovídajícím způsobem. [34]

Obr. 29 Průběh odezvy senzoru na působící sílu v čase [34]



V následující tabulce 1 jsou zaznamenány hodnoty aplikované a vypočtené síly na jednotlivé senzory. Dále je v tabulce uvedena relativní chyba měření, která je vypočtena podle vzorce:

$$d_x = \left(\frac{F_{calc} - F_{appl}}{F_{appl}} \right) * 100 \quad (17)$$

Kde d_x (%) je relativní chyba měření, F_{calc} (N) je vypočtená složka síly a F_{appl} (N) je naměřená složka síly. [34]

Z uvedených hodnot je patrné, že vypočtené hodnoty se číselně blíží skutečně naměřeným hodnotám. Bylo zjištěno, že při použití malých sil vzniká relativně velká chyba měření. Největší chyba byla pozorována u síly na ose x při 0,08 N, a to 37,5 %. Chybu měření dále ovlivňují vnější vlivy (rušení). Tedy, když je aplikovaná síla malá, je větší pravděpodobnost, že velikost aplikované síly se přiblíží velikosti chyby vzniklé součtem chyb měření a chyb zapříčiněných vnějšími vlivy. Celkově je průměrná chyba rovna 10,68 % se směrodatnou odchylkou 6,84 %. Taková velikost chyby je přijatelná v aplikacích zaměřených na napodobení lidského hmatu. [34]

Uváděná hodnota JND (nejmenší postřehnutelný rozdíl) z pocitu působení tlaku na lidský prst se pohybuje v desítkách procent při doteku kůže s dalším objektem, když se síla dotyku mění z 20 na 200 g (0,2 až 2 N). [34]

Tabulka 1 Naměřené a vypočtené hodnoty síly na senzory pole [34]

| Senzor | F_x | | | F_y | | | F_z | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|-------|
| | Appl. | Calc. | Err. | Appl. | Calc. | Err. | Appl. | Calc. | Err. |
| | [N] | [N] | [%] | [N] | [N] | [%] | [N] | [N] | [%] |
| U ₁₁ | 0,16 | 0,15 | 6,25 | 0,22 | 0,19 | 13,64 | -0,595 | -0,55 | 7,56 |
| U ₁₁ | 0,34 | 0,29 | 14,71 | 0,33 | 0,3 | 9,09 | -0,95 | -0,0885 | 6,84 |
| U ₁₂ | 0,08 | 0,11 | 37,5 | 0,32 | 0,3 | 6,25 | -0,695 | -0,655 | 5,76 |
| U ₁₂ | 0,4 | 0,42 | 5 | 0,36 | 0,39 | 8,33 | -1,45 | -1,35 | 6,9 |
| U ₂₁ | 0,23 | 0,19 | 17,39 | 0,08 | 0,05 | 37,5 | -0,545 | -0,495 | 9,17 |
| U ₂₁ | 0,12 | 0,14 | 16,67 | 0,45 | 0,49 | 8,89 | -1,02 | -0,92 | 9,8 |
| U ₂₂ | 0,43 | 0,46 | 6,98 | 0,41 | 0,43 | 4,88 | -1,32 | -1,2 | 9,09 |
| U ₂₂ | 0,34 | 0,3 | 11,76 | 0,12 | 0,14 | 16,67 | -0,745 | -0,63 | 15,44 |
| U ₃₁ | 0,15 | 0,16 | 6,67 | 0,19 | 0,17 | 10,53 | -0,475 | -0,38 | 20 |
| U ₃₁ | 0,21 | 0,22 | 4,76 | 0,44 | 0,39 | 11,36 | -0,99 | -1,05 | 6,06 |
| U ₃₂ | 0,44 | 0,45 | 2,27 | 0,16 | 0,15 | 6,25 | -0,96 | -0,89 | 7,29 |
| U ₃₂ | 0,2 | 0,19 | 5 | 0,29 | 0,3 | 3,45 | -0,73 | -0,665 | 8,9 |

Byla provedena analýza poměru signálu a šumu, pro odhalení míry vlivu šumu na přesnost měření. Byla měřena odezva piezoelektrického kondenzátoru v klidovém stavu (bez zatížení) a při zatížení silou se sinusovým průběhem o amplitudě 20 Hz. Síla se aplikovala na plochu senzoru v ose z za použití experimentálního nastavení a procesu. Výsledný poměr mezi signálem a šumem byl vypočten pomocí rovnice 18. Jeho hodnota byla 40,35 dB. [34]

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (18)$$

Kde SNR (dB) je poměr signálu a šumu (z ang. signal-to-noise ratio), P_s (dB) je síla signálu a P_n (dB) je síla šumu. [34]

Výsledky kalibračních testů byly měřeny zvláště při aplikaci sinusových sil s amplitudami v rozsahu 0–0,5 N v ose x, 0–0,5 N v ose y a 0–1,5 N v ose z. V rámci měření bylo sensorové pole připojeno na vibrační přístroj (LDS V455), který generoval normálové a smykové síly s konstantní frekvencí (20 Hz) a proměnnou amplitudou. Všechny testy byly provedeny při udržované teplotě 20 °C. Pro vyhodnocení linearity byla použita metoda lineární regrese nejmenších čtverců, aby se dosáhlo průměrné hodnoty tří opakovaných testů. Všechny vykazaly dobrou linearitu a nelinearita při měření sil byla 2,45 % ve směru x, 2,37 % ve směru y a 1,74 % směru z. Ze sklonů jednotlivých průběhů, které představují citlivost sensorového pole, byly vypočítány výsledné hodnoty. Výsledná citlivost byla rovna 14,93, 14,92 a 6,62 pCN⁻¹ pro osy x, y a z. Pole tedy disponuje dobrou linearitou, relativně nízkým vazebným účinkem, vysokou reprodukovatelností a přijatelnou kmitočtovou charakteristikou v rozsahu 5–400 Hz na normální i smykové zatížení. Navíc může být díky své vynikající flexibilitě snadno integrováno na zakřivené a oblé povrchy, jako jsou robotické ruce a protézy. [34]

Je zřejmé, že velikost a struktura senzoru bude mít vliv na výkon snímání celého pole. Příkladem může být výška komolého hranolu; pokud je větší, bude větší i točivý moment při působení smykové síly, čímž se zvýší citlivost. Proto se do budoucna plánuje optimalizace struktury a rozměrů senzoru. Dále se vývoj zaměří na přizpůsobení skluzu a povrchu v aplikacích umělých rukou. V neposlední řadě se bude věnovat pozornost velkému šumu při využívání malých sil, který je zdrojem chyb měření senzoru. Jedním z navrhovaných řešení je přidání elektromagnetického stínění na povrch senzoru. [34]

5 Praktická část práce

Praktická část diplomové práce je zaměřena na měření charakteristik odporu vodivého inkoustu, při zatížení taktilního senzoru silou. Následující kapitoly se věnují přípravě před měřeními, kde je popsáno nanášení inkoustu, měření nanesené vrstvy, použité druhy snímacích elektrod, měření odporu a tlaku. Dále je popsán postup při samotném měření.

5.1 Nanášení inkoustu

Měření vlastností vodivého inkoustu vyžadovalo jeho nanesení na povrch dvou kruhových elektrod, a to tak, aby mezi nimi vznikl vodivý kontakt. Bylo tedy potřeba vyřešit, jak vodivý inkoust na elektrody nanést. Požadavky na nanesenou vrstvu vodivého inkoustu byly následující:

- vrstva inkoustu musí zakrývat pouze povrch snímacích elektrod, při větším průměru nanesené vrstvy by mohlo dojít k ovlivnění od okolních elektrod,
- zvolená nanášecí metoda musí být snadno opakovatelná,
- nanesená vrstva musí být pevná a mít celistvý povrch,
- povrch vrstvy musí být dostatečně rovný pro správné roznesení tlaku.

Následoval výběr metody ze známých postupů, které se zabývají nanášením inkoustů na různé povrchy. Pro nanesení inkoustu pouze na povrch elektrod se jako ideální varianta jevílo využití masky s kruhovými otvory o průměru elektrod. Uvažovalo se o nanášení inkoustu pomocí štětce nebo aplikátoru s měkkým polštářkem, ale ani jeden způsob nevytvoří dostatečně rovný a celistvý povrch a nanášení je velmi nepřesné. Dále se nabízelo využití inkoustové tiskárny. Tiskové hlavice mají velkou přesnost a dovedou nanést požadované množství inkoustu. Problém byl v nanesení inkoustu na snímací matici. Deska matice vykazuje určitou pružnost, ale ústrojím tiskárny by neprošla. Dále využití tiskárny limituje viskozita inkoustu.

Nakonec byla vybrána metoda „airbrush“ využívající stříkací pistoli. Pro měření měl být využit vodivý inkoust ze zlínské univerzity Tomáše Bati. V Centru polymerních materiálů disponují technologií pro výrobu vodivých inkoustů. Po zdlouhavé komunikaci a konečné telefonické dohodě inkoust přesto nepřišel, proto musel být obstarán alternativní vzorek inkoustu.

5.1.1 Vodivý inkoust

Graphit 33

Obr. 30 Graphit 33

Elektricky vodivý lak Graphit 33 od firmy CRC Industries Europe se vyrábí ve formě spreje. Obsahuje velmi jemné a čisté částice grafitového prášku, které jsou vmíchány do směsi rozpouštědel a organického pojiva. Výsledkem je velmi dobrá elektrická vodivost. Lak poskytuje dobrou přilnavost k plastům, dřevu, sklu a keramice. Nanesený povlak je suchý a lze ho využít jako suché mazivo.



Údaje o nebezpečnosti:

- H225 Vysoce hořlavá kapalina a páry.
- H319 Způsobuje vážné podráždění očí.
- H336 Může způsobit ospalost nebo závratě.

Tabulka 2 Technické parametry inkoustu Graphit 33[35]

| Graphit 33 - údaje o produktu | |
|--|--|
| Nástřík (pokrytí) | 10-20 μm tloušťka vrstvy |
| Aerosol | $\pm 0,3 \text{ m}^2$ / 200 ml plechovka |
| Objem | $\pm 4 \text{ m}^2$ / l |
| Doba schnutí při pokojové teplotě | bez lepivosti <20 min |
| Vlastnosti suchého laku | |
| Barva | černá |
| Teplotní odolnost laku | $\pm 90 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Teplotní odolnost grafitového filmu | 250 - 300 $^\circ\text{C}$ |
| Povrchový odpor (v závislosti na tloušťce vrstvy, způsobu aplikace a podmínkách sušení) | 1000-2000 Ω |

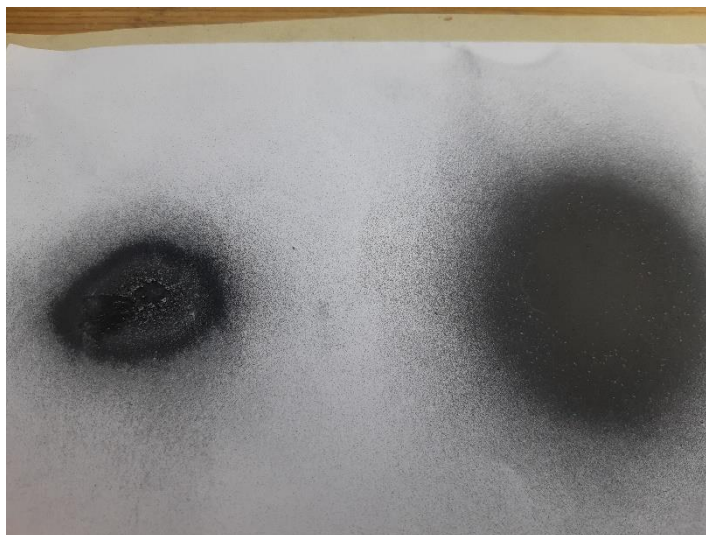
5.1.2 Stříkací metoda

Pro nanesení tenké vrstvy inkoustu byla původně zamýšlena malířská technika „airbrush“. Tato technika využívá malé pistole k nanesení tekutého média pomocí stlačeného vzduchu. Výhodou pistole je schopnost aplikovat velmi malé množství inkoustu (v desetinách ml) na požadovanou plochu z integrovaného zásobníku. Ovšem tato metoda počítala s kapalným vzorkem inkoustu v lahvičce, který nemá určenou metodu nanášení danou od

výrobce. Jelikož použitý inkoust byl ve formě kapalného plynu uzavřeného v aerosolové plechové lahvi, byl způsob nanášení předem určen.

Před každým nástřikem byl sprej důkladně protřepán. Testovací nástřiky byly prováděny v horizontální i vertikální poloze spreje. Většina sprejů vyžaduje pro správnou funkci vertikální polohu, ale testovací nástřiky prokázaly stejnou účinnost v obou polohách. Kvůli možnosti stékání naneseného laku byla zvolena pro následovné nástřiky poloha horizontální. Dále bylo potřeba zjistit správnou nanášecí vzdálenost, tedy vzdálenost mezi ústím spreje a nanášenou plochou. Nanášecí vzdálenost přímo ovlivňuje průměr naneseného obrazce (kruhu). Z technického listu byla vyčtena doporučená nanášecí vzdálenost mezi 20 a 30 cm. Obr. 31 ukazuje dva nástřiky z různé vzdálenosti.

Obr. 31 Testovací nástřiky vodivého inkoustu



Nástřík v levé části obrázku vznikl po aplikaci ze vzdálenosti 15 cm. Na první pohled je viditelný menší průměr obrazce na úkor celistvosti. Příliš malá vzdálenost zapříčinila, že nanesená vrstva uprostřed „kruhu“ byla tlakem plynu vytlačena k okraji. To zapříčinilo nerovnost a popraskání povrchu po jeho zaschnutí. Naopak nástřík v pravé části je rovnoměrný a celistvý. Byl vytvořen ze vzdálenosti 20 cm. Průměr „kruhu“ je cca 45 mm.

Lepší a stálejší vlastnosti získá nástřík až po určité době od aplikace. Testovací nástřiky byly nanášeny na papír. Ten nanesenou vrstvu z části nasál, a proto byla doba schnutí kratší. Pro tenké vrstvy je stanovena tato doba od výrobce na 10 min. Pro měření bylo však potřeba nanést více vrstev na sebe. Proto byl pro každou další nanesenou vrstvu stanoven čas schnutí $t = 10 + 5 \cdot (n - 1)$ v minutách, přičemž n je číslo nástřiku, po kterém mohla být aplikována další

vrstva. Po poslední nanesené vrstvě laku se čekalo další 4 hodiny, aby povrch dostatečně ztuhl, než na něm bylo prováděno měření.

Ruční způsob aplikace laku nepředstavoval žádné větší problémy. Nevýhoda mohla být v menší přesnosti a jednotnosti nanášení, například oproti lakovacímu stroji. Při manipulaci a aplikaci spreje byly dodrženy všechny pokyny výrobce. V rámci bezpečnosti byly vrstvy inkoustu nanášeny v odvětrávaném prostředí a s nasazenými ochrannými pomůckami (brýle a rouška).

5.1.3 Postup aplikace inkoustu

Vzorek Graphitu 33 vykazoval velkou hustotu a viskozitu, jeho konzistence se blížila spíše laku než inkoustu. Po jeho nanesení a zaschnutí vznikla suchá kohezivní vrstva, která byla zprvu matná, ale také bylo možno ji rozleštit. Při doteku či přejetí prstem po sobě inkoust zanechával malé černé částice. To je zřejmě způsobeno jeho využitím jako suché mazivo. Výhodou inkoustu byla jeho dobrá přilnavost na různé povrchy, tudíž nebyl problém s jeho aplikací na povrch elektrod. Hlavním ukazatelem vhodnosti inkoustu byla jeho konzistence a odpor, který zajistilo jeho složení z mikročástic grafitu.

Původně bylo zamýšleno přímé nanášení inkoustu na povrch elektrody senzoru. Po nanesení první vrstvy se ukázalo, že vrstva nepřilne dostatečně pevně k povrchu kruhové elektrody. Proto i malé mechanické namáhání zapříčinilo okamžité odlupování nanesené vrstvy z povrchu elektrod. Za těchto podmínek nebylo možné provést měření vlastností inkoustu, ke kterému je zapotřebí vyvinout tlak na vrstvu inkoustu plochým hrotem. Následující pokusy se snažily fixovat vrstvu inkoustu, ale překrytí či potření bezbarvým lakem nebylo úspěšné. Dále byly zjištěny nerovnosti na nanesené vrstvě inkoustu. Jednalo se o místo mezi vnější a vnitřní elektrodou, pod kterým se nenachází nevodivá vrstva. Problémové místo znázorňuje řez na obr. 32. Působení síly na takto nerovnou plochu by zapříčinilo snížení tlaku na stěžejní místo mezi elektrodami.

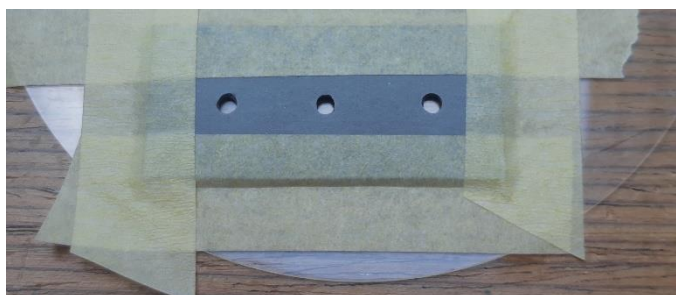
Obr. 32 Nerovnost vznikající na povrchu naneseného inkoustu



Proto se přistoupilo na alternativní řešení – nanesení vrstvy vodivého inkoustu na povrch plastové fólie, u které se předpokládá výrazně lepší přilnavost. Elektrody se následovně překryjí folií s naneseným inkoustem, který zajistí vodivost mezi nimi. Byla zvolena taková

tloušťka fólie, aby nedocházelo k ohybu v místě naneseného inkoustu a předešlo se poškození vrstvy. Vybraná tloušťka fólie byla cca 0,4 mm. Zkušební nástřik k povrchu fólie přilnul velmi dobře. Následovně bylo možné vytvořit vícevrstvé nánosy inkoustu pro samotné měření. Aby nástřik získal určitý tvar a neznečistil okolí fólie, byla využita krycí maska. Maska byla vyrobena z tenkého pásu gumy, do kterého byly vyraženy tři otvory pomocí děrovacího nástavce o průměru 3 mm. Před nanášením byla maska přichycena k fólii páskou, aby nedošlo k jejímu posunutí, viz obr 33.

Obr. 33 Zakrývací maska s kruhovými otvory



Ventil u aerosolové láhve neumožňoval příliš velkou kontrolu nad množstvím nanášeného inkoustu. Kvůli tomu nemohlo být provedeno nanášení jedním stříkem do otvoru masky, aniž by byla dodržena stejná intenzita nástřiku. Pro nanesení souvislé vrstvy o stejném objemu stříkaného inkoustu bylo zapotřebí nejprve zamířit mimo prostor masky. Po následovném stisknutí ventilu byla maska pokryta z jednoho konce na druhý plynulým nástřikem, který se nechal po zmíněnou dobu (kapitola 5.1.2) uschnout.

Při nanášení vrstev inkoustu na povrch fólie byly vždy dodrženy následující podmínky:

- před prvním nástřikem byl povrch fólie odmaštěn,
- před každým nástřikem byla láhev důkladně protřepána,
- aplikace inkoustu byla provedena plynulým pohybem a totožným stlačením ventilu láhve,
- vrstvy zasychaly po stanovenou dobu $t = 10 + 5 \cdot (n - 1)$ (min) nebo déle,
- inkoust byl nanášen kolmo k zemi (horizontální poloha),
- teplota v místnosti při nanášení byla 22 °C.

Podle uvedeného postupu byly vytvořeny všechny měřené tloušťky. Na jedné fólii tak vznikly tři různě tlusté vrstvy inkoustu, přičemž každá následující vrstva byla vytvořena

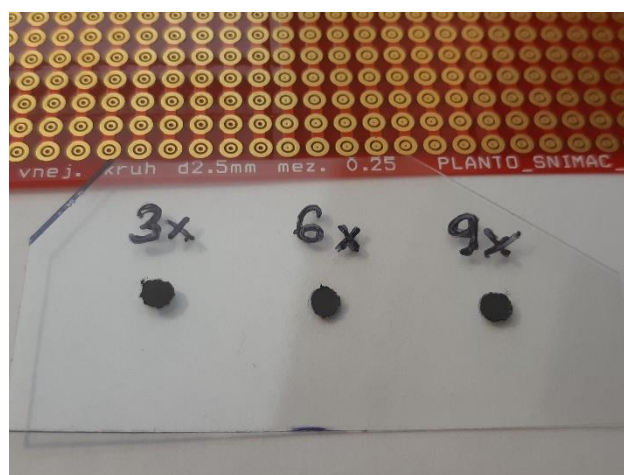
násobkem počtu nástřiků vrstvy předešlé. Nejslabší vrstva byla vytvořena 3 nástřiky, následující 6 a nejtlustší 9 nástřiky. Počet nástřiků byl zvolen tak, aby výsledná velikost jednotlivých tloušťek vrstev mezi sebou byla dostatečně velká. Po započítání rezervy byla stanovena tloušťka nejslabší vrstvy na 3 nástřiky. Nicméně i jeden nástřik by stačil k vytvoření homogenního povrchu vhodného pro měření.

Stejným postupem, jakým byl vytvořen jeden vzorek fólie, byly nastříkány další vzorky, které obsahovaly 3, 6 a 9 nástřiků. Jeden vzorek fólie obsahoval vždy tři různě tlusté vrstvy inkoustu kvůli snazšímu měření.

5.1.4 Měření tloušťky vrstev inkoustu

Před samotným měřením bylo potřeba zjistit přesnou tloušťku všech nanesených vrstev u jednotlivých vzorů. Obr. 34 ukazuje jeden fóliový vzorek s nanesenými vrstvami, u každého bodu byl uveden počet vrstev.

Obr. 34 Vzorek fólie s nanesenými vrstvami inkoustu



K měření tloušťky inkoustové vrstvy bylo využito digitální posuvné měřítko značky Digimatic s přesností na 0,01 mm a rozsahem 0-150 mm. Měření probíhalo vložení fólie mezi čelisti měřítka v místě nanesené vrstvy. Po sevření čelistí byla na displeji zobrazena celková tloušťka, od které se následovně musela odečíst tloušťka fólie, aby byla zjištěna tloušťka samotné vrstvy. Naměřené hodnoty na jedné fólii prokázaly, že 3, 6 a 9 nástřiků vytvořilo vždy rozdílně tlusté vrstvy od sebe. Dále bylo zjištěno, že stejný počet nástřiků nevytvoří ve všech případech vrstvu o totožné tloušťce. To bylo z velké části zapříčiněno rozdílným objemem inkoustu při jednotlivých nástřicích. V jednom ojedinělém případě byl mezi 3 a 6 nástřiky naměřen rozdíl rovný tloušťce jednoho nástřiku. Naměřené hodnoty byly

zaznamenány do tabulky. Vybraná fólie, na které bylo prováděno měření vlastností inkoustu, měla tloušťku vrstev 50, 80 a 110 μm .

První měření ukázalo, že zvolená nejtlustší vrstva není vhodná pro dané měření. Její elektrický odpor se měnil minimálně i při zatížení největší možnou silou. Proto byla nejtlustší vrstva vyřazena z měření a nahrazena tenkou vrstvou o tloušťce 20 μm . Vrstva byla nanášena na novou fólii dle stejného postupu jako vrstvy předešlé.

5.2 Vlastní měření vlastností taktilního senzoru s vodivým inkoustem

Měření je založeno na vlastnostech piezorezistivních materiálů. Úkolem bylo zjistit chování vodivého inkoustu v závislosti na zatěžující síle. Inkoust zde plní úlohu převodníku síly na elektrickou veličinu. Měření si tedy kladlo za cíl zjistit závislost elektrického odporu vodivého inkoustu R na zatěžující síle F , která se dále přepočítává dle zatěžující plochy na tlak p . Proto je zapotřebí, aby systém využitý pro měření závislosti byl schopen měřit odpor inkoustu a zároveň velikost síly, která působí na jeden taktilní senzor (elektrodu). Dále byla zjištěna hystereze, pro kterou je nezbytné, aby působení síly při zatěžování a odlehčování bylo konstantní a bez záskmitů. Způsobů zatěžování piezoelektrických materiálů je více.

Pro tuto práci byla původně zvolena metoda, jejíž realizace zahrnovala dostupné prostředky katedry elektroniky a automatizace. Metoda měla využít robotické rameno jako generátor zatěžující síly. Rameno disponuje plynulým pohybem ve vertikálním směru a dokáže vyvinout tlak na určitou plochu. Díky tomu bylo ideálním generátorem síly, který splňuje podmínky pro měření hystereze. V rámci toho měla být velikost síly zaznamenána snímačem skrze připevněný váleček s plochým hrotem, kdy hrot byl v přímém kontaktu s vrstvou měřeného vodivého inkoustu. Měřicí pracoviště vlastností taktilního senzoru se skládalo z následujících částí:

- Robot BOSCH Turbo Scara SR60
- Taktilní senzor a fólie s nanesenými vzorky vodivého inkoustu různých tloušťek
- Systém pro měření odporu a tlaku
- Externí PC s potřebným softwarem na získání a zpracování naměřených dat

V důsledku dlouhého čekání na vzorek inkoustu z UTB ve Zlíně nemohlo být měření uskutečněno v potřebném termínu. Po zvolení a dodání alternativního vzorku inkoustu vznikl

další problém. S příchodem nemoci COVID-19 do České republiky byl omezen a následovně zrušen přístup do budov ČZU. Tudíž měření nemohlo být provedeno v laboratoři s robotickým ramenem.

Aby mohlo být měření i přes omezení uskutečněno, přistoupilo se na přesun do domácích podmínek. S tím souvisel omezený přístup k měřicím přístrojům a technologiím. Hlavním úkolem bylo zvolit jinou metodu generování zatěžující síly, na které je celé měření závislé. Nejsnazší metodou na realizaci zatěžující síly bylo využití sady závaží. Tato metoda však nesplňovala podmínku generování konstantní síly bez závitů, k čemuž by došlo při výměně jednoho závaží za druhé. Zvolená metoda byla inspirována pokusným měřením, které bylo prováděno před možností měřit na robotickém rameni. Metoda využívá ke generování zatěžující síly hmotnost kapaliny v nádobě, kdy postupným zvyšováním a snižováním objemu kapaliny se plynule mění velikost zatížení. Díky tomu nebylo nutné využít snímač síly, jelikož síla se vypočetla z hmotnosti kapaliny v nádobě. Ze známé síly mohl být dále vypočten tlak. Pro měření odporu inkoustu byl sestaven elektrický obvod.

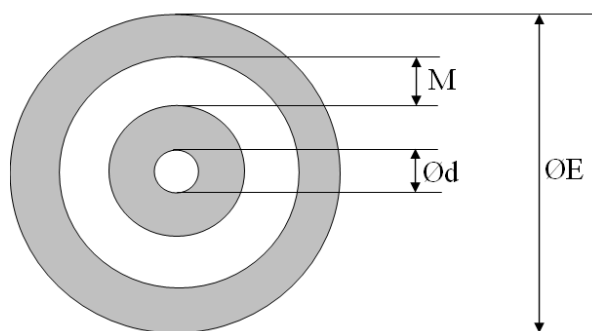
Měření probíhalo na čtyřech elektrodách s rozdílnou velikostí. Na každé elektrodě byly zvlášť testovány tři tloušťky naneseného inkoustu. Následovně byly z naměřených hodnot sestaveny závislosti, ze kterých byla vyhodnocena nejlepší kombinace mezi tloušťkou inkoustu a velikostí elektrody. Popis a realizace jednotlivých částí měření jsou uvedeny v následujících kapitolách.

5.2.1 Snímací matice měřicích elektrod

K měření byla využita snímací matice elektrod, která obsahovala čtyři typy kruhových elektrod o různě velkých průměrech. Jednotlivé elektrody dle obr. 35 mají následující rozměry:

- Elektroda s označením „**LH**“ – $\varnothing E=2$ mm, $\varnothing d=0,4$ mm, $M=0,1$ mm
- Elektroda s označením „**PH**“ – $\varnothing E=2$ mm, $\varnothing d=0,1$ mm, $M=0,1$ mm
- Elektroda s označením „**LD**“ – $\varnothing E=2,5$ mm, $\varnothing d=0,4$ mm, $M=0,25$ mm
- Elektroda s označením „**PD**“ – $\varnothing E=2,5$ mm, $\varnothing d=0,1$ mm, $M=0,25$ mm

Obr. 35 Rozměry kruhových elektrod

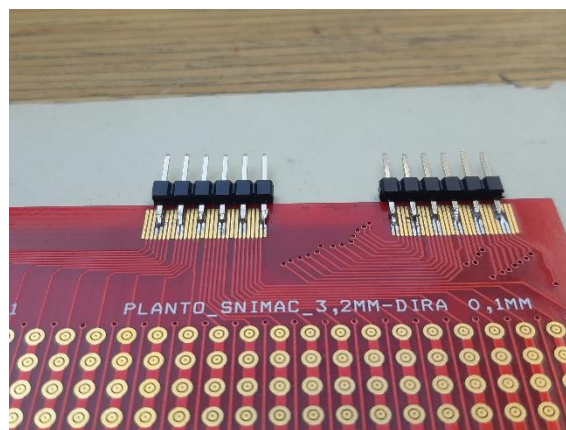


Snímací matice byla původně vytvořena jako součást taktilního snímače Plantografu. Pro účely měření byla matice zapůjčena do domácího prostředí. Právě díky speciální konstrukci, která se skládá z rozdílných typů elektrod, je možné měřit vliv velikosti elektrody na výsledný odpor. Původní zkratkovité označení jednotlivých elektrod bylo zachováno. Je odvozeno od sektoru, ve kterém se daný typ elektrody na desce nachází (např. LH = levý, horní). Matice elektrod je vyrobena na jedné desce plošných spojů zvané Cuflex. Jednotlivé elektrody jsou vodičově propojeny tak, že vnější kruhy tvoří řádky a vnitřní kruhy sloupce matice. Ke kontaktním plochám matice byly připájeny kontaktní piny, které umožňovaly snazší připojení vodiče a následný výběr zvolené elektrody při měření. Rozdělení matice a kontaktní piny ukazují obr 36 a 37.

Obr. 37 Snímací matice využívaná v Plantografu



Obr. 36 Kontaktní piny na vývodech matice



5.2.2 Plocha elektrod

Aby mohly být elektrody mezi sebou porovnány, bylo zapotřebí znát velikosti jejich snímacích ploch. Proto byly ze známých průměrů (viz. kapitola 5.2.1) vypočítány poloměry prstenců elektrod R a následovně jejich plochy S . Hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 3. Z hodnot v tabulce je vidět, že větší snímací plochu mají elektrody v dolní části snímací matice s vnějším poloměrem E o velikosti 2,5 mm. Největší plochu ze všech elektrod má elektroda PD (cca 1,4215 mm²).

Tabulka 3 Rozměry jednotlivých druhů elektrod a jejich vypočítané plochy

| Typ elektrody | E [mm] | d [mm] | M [mm] | R ₁ [mm] | R ₂ [mm] | R ₃ [mm] | R ₄ [mm] | S ₁ [mm ²] | S ₂ [mm ²] | S [mm ²] |
|---------------|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| LH | 2 | 0,4 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 0,55 | 1 | 0,1963 | 0,6362 | 0,8325 |
| PH | 2 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,45 | 0,55 | 1 | 0,5026 | 0,6362 | 1,1388 |
| LD | 2,5 | 0,4 | 0,25 | 0,2 | 0,5 | 0,75 | 1,25 | 0,4275 | 0,7854 | 1,2129 |
| PD | 2,5 | 0,1 | 0,25 | 0,05 | 0,5 | 0,75 | 1,25 | 0,6362 | 0,7854 | 1,4215 |

K vypočtení hodnot poloměrů R a ploch S jednotlivých elektrod z tabulky 3 byly využity následující vztahy (19 až 25):

$$R_1 = \frac{d}{2} \quad (19) \quad S_1 = \pi * (R_2 - R_1)^2 \quad (23)$$

$$R_2 = \frac{E}{4} - \frac{M}{2} \quad (20) \quad S_2 = \pi * (R_4 - R_3)^2 \quad (24)$$

$$R_3 = \frac{E}{4} + \frac{M}{2} \quad (21) \quad S = S_1 + S_2 \quad (25)$$

$$R_4 = \frac{E}{2} \quad (22)$$

5.2.3 Generování zatěžující síly

Pro generování zatěžující síly byla využita hmotnost nádoby naplněné kapalinou. Jako zatěžující kapalina byla využita voda, jejíž hustota je 997 kg.m⁻³, ze které se vypočítala hmotnost kapaliny podle vzorce:

$$m = \rho \cdot V, \quad (26)$$

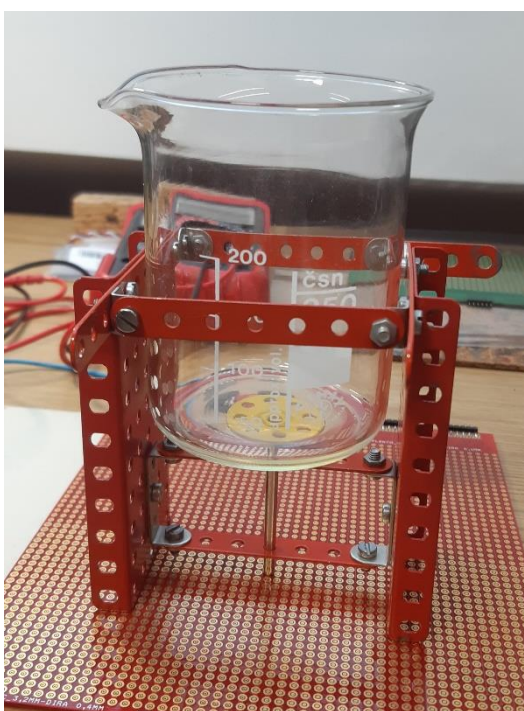
kde m (kg) je hmotnost, ρ (kg.m⁻³) je hustota a V (m³) je objem.

Zatěžování a odlehčování působící síly bylo řešeno zvyšováním a snižováním objemu vody v nádobě. To bylo provedeno pomocí injekční plastové stříkačky s objemem 20 ml. Výhodou této metody bylo konstantní zatížení a plynulá změna síly. Díky tomu bylo možno změřit hysterezi taktilního senzoru, která se projevila při odlehčování taktilního senzoru. Zkušební zatížení bylo provedeno pomocí laboratorní kádinky, do které se přilévala voda. Kvůli malému objemu byla následně vyměněna za odměrný plastový válec s objemem 1 l, přes který se dala generovat výrazně větší síla.

Po vyřešení způsobu generování síly bylo potřeba věnovat pozornost velikosti plochy, kterou síla působila na senzor. Samotný válec (nebo kádinka) měl příliš velký průměr

podstavy. Za těchto nastavených podmínek by došlo k zatížení několika senzorů najednou a tlak na jeden měřený senzor by byl výrazně menší. Proto bylo zapotřebí zmenšit obsah tlačné plochy. K tomu byla využita ocelová tyčka s plochým hrotem o průměru 3,75 mm. Aby nádobu s vodou bylo možno postavit na tyčku, byl na její druhý konec připevněn kulatý disk ze stavebnice Merkur. K tomu byla sestavena vodící konstrukce nádoby. Vodící konstrukce zabraňovala převrnutí nádoby a současně udržovala tyčku v kolmé poloze. Konstrukci sestavenou ze stavebnice Merkur ukazuje obr. 38, při výměně kádinky za odměrný válec byla konstrukce přizpůsobena jiným rozměrům.

Obr. 38 Vodící konstrukce z Merkuru



5.2.4 Měření tlaku

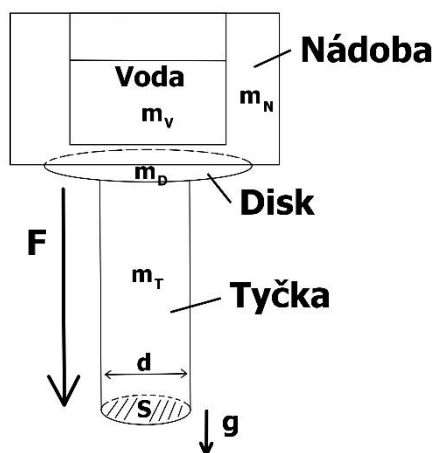
Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, síla byla realizována tlačáním ocelové tyčky ve vertikálním směru, přičemž byla zatížena nádobou obsahující určitý objem vody. Tlak byl měřen nepřímou metodou. Tím je myšleno, že nebyla měřená přímo velikost tlaku, ale byla vypočítána ze dvou dalších veličin podle obecného vztahu (27):

$$p = \frac{F}{S} \quad (27)$$

F (N) je tlaková síla působící kolmo na danou plochu. V tomto případě je síla vypočítána součtem jednotlivých hmotností (tyčky, disku, nádoby a vody) a vynásobením s gravitační konstantou g . S (m^2) je obsah styčné plochy. Styčnou plochu tvoří hrot válcové tyčky, který je

v kontaktu s elektrodou. Jelikož je plocha hrotu kruhová, její obsah se vypočítá jako druhá mocnina poloměru vynásobena π . Níže je uveden příklad s příloženým obr. 39, jak byl tlak počítán.

Obr. 39 Náskres metody generování síly



Výpočet tlaku:

Výpočet tlaku je počítán za situace, kdy je $m_V = 0$.

$$F = (m_N + m_V + m_D + m_T) * g = (0,084 + 0 + 0,012 + 0,004) * 9,81 = 0,981 \text{ N} \quad (28)$$

$$S = \pi * r^2 = \pi * 1,875^2 = 11,0447 \text{ mm}^2 \quad (29)$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{0,981}{11,0447 * 10^{-6}} = 88820,8824 \text{ Pa} \quad (30)$$

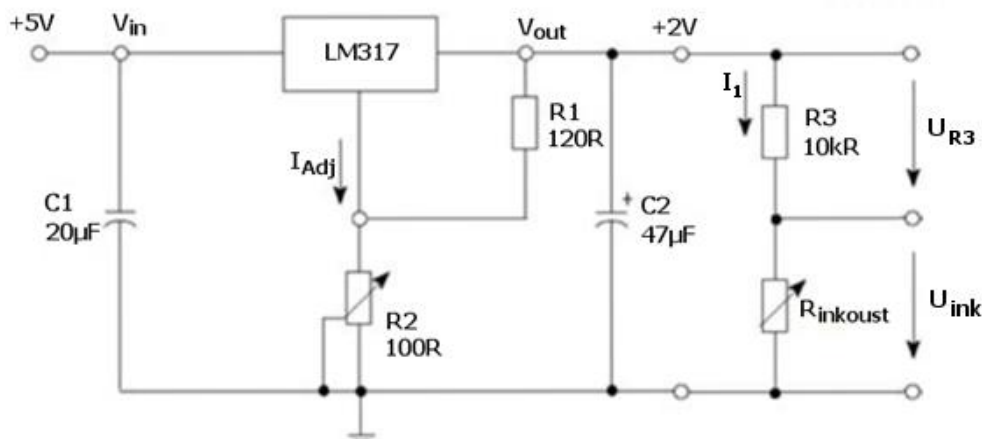
Vypočítaný tlak je zaokrouhleně roven 89 kPa. To je tlak, který působí na taktilní senzor před nalitím vody do nádoby. Veškeré hodnoty a výpočty byly zpracovávány do tabulek v programu Excel.

5.2.5 Měření elektrického odporu inkoustu

Při zatížení tlačil hrot tyčky na vrstvu vodivého inkoustu naneseného na fólii proti kruhové elektrodě. V tu chvíli inkoust vodivě spojil obě části elektrody. Poté mohl být měřen jeho elektrický odpor na vývodech snímací matice.

Odpor inkoustu byl měřen pomocí elektrického obvodu. Měřicí obvod byl vyroben pomocí univerzální desky plošných spojů, na kterou byly připájeny jednotlivé součástky. Schéma obvodu je vidět na obr. 40.

Obr. 40 Schéma zapojení měřicího obvodu



Obvod se skládá ze dvou částí. První část představuje stabilizační obvod, který slouží k napájení druhé části, složené z napětového děliče. Dělič tvoří dva rezistory, přičemž jeden je pevný a druhý proměnný. Jako proměnný rezistor sloužil měřený inkoust, který byl za pomoci pinových kolíků a propojovacích drátků připojen do obvodu. Pinové kolíky umožňovaly snadné přepojení propojovacích drátků, a tím i výběr konkrétní měřené elektrody v určitém řádku a sloupci. Hlavní součástí napájecího obvodu byl stabilizátor LM317. Na jeho řídicí elektrodu byl připojen potenciometr 100 Ω, který umožňoval jemnou regulaci výstupního napětí stabilizátoru. Na vstup stabilizátoru bylo přivedeno +5 V ze stejnosměrného zdroje a na jeho výstupu byly potenciometrem nastaveny 2 V, viditelné na obrázku obr. 41. Nízká hodnota výstupního napětí byla zvolena proto, aby děličem protékal malý proud, který nebude ve velké míře tepelně zatěžovat vrstvu vodivého inkoustu. Při výběru velikosti pevného rezistoru děliče bylo potřeba zajistit co nejvíce stabilní průchod proudem; čím větší hodnota odporu, tím prochází menší a stabilnější proud. Ovšem v případě, kdy je odpor příliš velký, protéká jím téměř nulový proud. To zapříčiní velmi malou změnu napětí na děliči, která by bylo obtížně měřitelná. Proto byl vybrán rezistor 10 kΩ. Elektrický odpor vodivého inkoustu byl určen z následujících vztahů odvozených z Ohmova a druhého Kirchhoffova zákona:

$$U_{ink} = U_N - U_{R3} \quad (31)$$

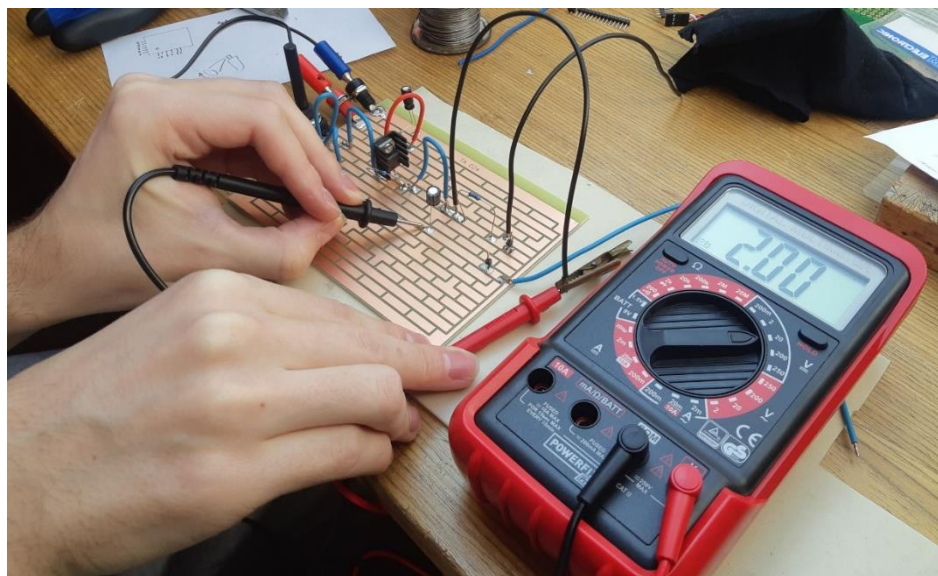
$$I_1 = \frac{U_{R3}}{R_3} \quad (32)$$

$$R_{ink} = \frac{U_{ink}}{I_1} \quad (33)$$

Pro výpočet odporu inkoustu bylo potřeba zjistit velikost napětí U_N a U_{R3} . Hodnoty napětí U_{R3} byly měřeny na rezistoru R_3 pomocí měřicího multimetru při zatížení vrstvy

inkoustu. Přesný multimetr byl zapůjčen z Katedry elektrotechniky a automatizace. Napětí U_N bylo během měření stále stejné. Jeho měření bylo spíše kontrolní. Měřeno bylo na výstupu stabilizátoru proti zemi. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky a pomocí výše uvedených vztahů (31, 32 a 33) byl vypočten odpor inkoustu.

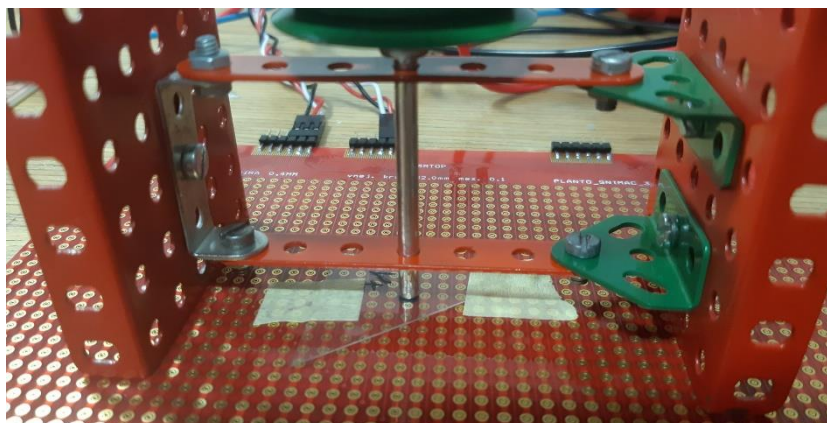
Obr. 41 Nastavování výstupního napětí stabilizátoru



5.3 Postup měření

Před samotným měřením byla provedena příprava měřicího pracoviště a všech pomůcek a přístrojů souvisejících s měřením. Byl vybrán jeden ze čtyř typů elektrod na snímací matici. Pro vybranou elektrodu se za pomoci zkoušky vodivosti (prozvoněním) našly příslušné piny řádku a sloupce, ke kterým se připojily propojovací vodiče. Druhé konce vodičů byly připojeny na příslušné piny napěťového děliče, které se nacházely na desce měřicího obvodu. Plocha snímací elektrody byla odmaštěna a následovně se k ní přiložila fólie. Fólie byla přiložena na plochu elektrody stranou s nanesenými vrstvami vodivého inkoustu. Zvolená tloušťka vrstvy vždy zakryla celou plochu elektrody. Po správném umístění byla fólie zafixována ke snímací matici lepící páskou, aby nedocházelo k nežádoucímu posunu fólie. Případný posun byl mohl ovlivnit rozložení působícího tlaku na inkoust, a tím by se změnila velikost měřeného odporu, nebo by mohlo dojít ke zhoršení vodivosti mezi inkoustem a elektrodou. Vodící konstrukce byla umístěna v místech fólie. Do otvorů v konstrukci byla zasunuta tyčka s diskem. Následně bylo důležité správně vystředit hrot tyčky nad měřenou vrstvou inkoustu. Bylo potřeba, aby hrot zakrýval celou plochu naneseného inkoustu. To nebylo ve většině případů obtížné, neboť hrot měl stejně velký nebo větší průměr než plocha inkoustu, jak lze vidět na obr. 42. Překrytí bylo vizuálně zkontrolováno z několika stran.

Obr. 42 Detail hrotu tyčky a vrstvy vodivého inkoustu

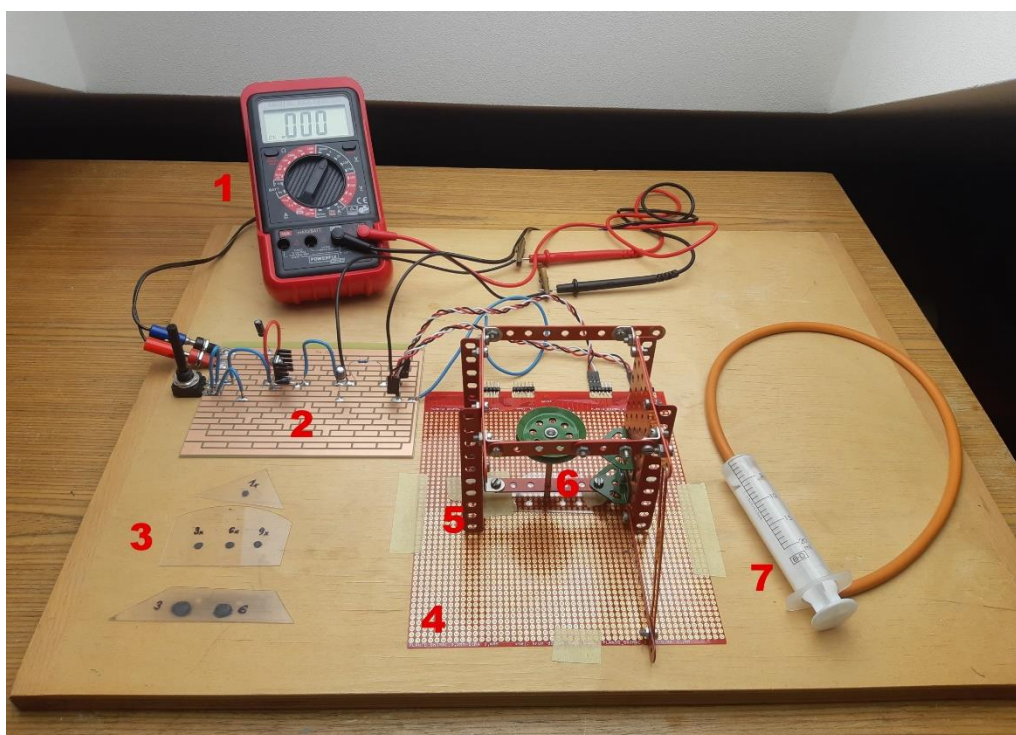


Protože síla tření mezi ocelovou konstrukcí a povrchem snímací matice byla velmi malá, byla konstrukce k povrchu matice také fixována páskou jako v případě fólie. Samotná snímací matice byla podložena rovným rýsovacím prknem, ke kterému byla opět fixována. K vyvedeným vodičům z měřicího obvodu byl připojen multimetr, který měřil velikost napětí U_{R3} . Měřicí rozsah byl na multimetru nastaven v jednotkách V (voltů), jelikož měřené napětí nepřesáhlo hodnotu 2 V. Na vstupní svorky měřicího obvodu bylo přivedeno napětí 5 V ze stejnosměrného zdroje. Nakonec byl připraven odměrný válec, injekční stříkačka s gumovou hadičkou a nádoba s vodou.

Při měření byl na tyčku s diskem posazen odměrný válec. Bylo důležité zajistit, aby válec stál přesně uprostřed konstrukce a neopíral se o její stěny. Plnění válce vodou byl taktilní senzor zatěžován konstantní silou. Na začátku jednotlivých měření byla vždy stanovena stabilní hodnota odporu inkoustu při zatížení, od které se dále měřené hodnoty zaznamenávaly v závislosti na vzrůstající či klesající síle. Stanovení stabilní hodnoty odporu probíhalo tak, že se do odměrného válce přilévala voda. Dokud byl tlak příliš malý, měřená hodnota napětí U_{R3} se blížila nule, tudíž hodnota odporu byla velká. Po dosažení určité velikosti tlaku odpor prudce klesl a napětí se ustálilo na hodnotě kolem 1,5 V. Hodnota se lišila podle tloušťky naneseného inkoustu a druhu elektrody, což se projevilo do výsledné charakteristiky. Nejprve byla provedena zkušební měření, podle kterých se stanovil objem vody, který se bude po jednotlivých krocích do válce přilévat. Stanoveno bylo 10 kroků, přičemž několik prvních kroků se přilévalo 25 ml a u zbylých 50 ml. Dvojí hodnoty byly zvoleny proto, aby lépe proměřily potřebnou část charakteristiky, jejíž průběh byl na začátku strmý a postupně se stával lineárním. Zvolený počet kroků byl dostatečný na proměření potřebné části charakteristiky. Další zvyšování zatěžující síly by nemělo velký vliv na změnu odporu

inkoustu. Velikost zatížení byla také ovlivněna maximálním objemem válce. První půlku měření se zatěžující síla zvyšovala přiléváním vody do válce za pomoci injekční stříkačky po jednotlivých krocích. Po dosažení desátého kroku následovalo odlehčování o stejný počet kroků, při kterém se voda injekční stříkačkou z válce odebírala. Celý proces postupného zatěžování a následného odlehčování byl prováděn s cílem změření hystereze vodivého inkoustu. Měření jednotlivých tloušťek inkoustu bylo provedeno na všech čtyřech typech elektrod, přičemž na každé tloušťce měření proběhlo 5×. Po každém měření byla pauza, při které byly elektrody odlehčeny na cca 5 minut, aby nedocházelo k trvalé deformaci materiálu. K deformaci vrstev inkoustu nakonec stejně došlo po určeném počtu měření a musely být vytvořeny nové. Během měření byly zaznamenávány hodnoty hmotnosti, U_N a U_{R3} do připravených tabulek v Excelu po každém kroku. Jeden měřený cyklus obsahoval celkem 21 řádků hodnot pro tloušťky 20 a 50 μm . V případě tloušťky 80 μm byl využit maximální objem válce a měřený cyklus obsahoval 19 řádků hodnot. Pracoviště při měření zachycuje obr. 43.

Obr. 43 Pracoviště na měření vlastností vodivého inkoustu



1 – multimetr, 2 – měřicí obvod, 3 – vzorky nanesených vrstev inkoustu, 4 – snímací matice, 5 – vodící konstrukce, 6 – tlačná tyčka a 7 – injekční stříkačka

Po měření závislosti změny odporu na působícím tlaku bylo provedeno ještě jedno měření, které mělo za cíl zjistit pokles měřeného napětí U_{R3V} závislosti na čase při stejném zatížení. Měření probíhalo na elektrodě PD s přiloženou vrstvou inkoustu 50 μm . V tomto měření byla síla generována pomocí závaží o hmotnosti 0,8 g. Po zatížení se zapsala první hodnota napětí. Další hodnota se zapsala vždy po 5 minutách. Celkem měření trvalo 20 min. Naměřené hodnoty slouží k určení poklesu odporu za určitou dobu v procentech.

5.4 Statistické vyhodnocení hodnot

Pro statistické vyhodnocení byl důležitý větší počet opakování měření. Účelem vyhodnocení bylo zjistit nejistotu měření a výběrovou směrodatnou odchylku. Níže je uveden příklad výpočtu statistického vyhodnocení pro hodnoty odporu naměřené na elektrodě PD při použití vrstvy 20 μm a zatížení 400571,3 Pa. Pro výpočet všech zbývajících hodnot se postupovalo stejně.

Tabulka 4 Zpracování naměřených hodnot odporu při zatěžujícím tlaku 400571,3 Pa na elektrodě PD

| Zatěžování – 400571,3 Pa | | | |
|--------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| i | R_i [Ω] | $(R_i - \bar{R}_i)$ | $(R_i - \bar{R}_i)^2$ |
| 1 | 542,96 | 1,09 | 1,1878 |
| 2 | 565,24 | 23,37 | 546,0470 |
| 3 | 531,86 | -10,01 | 100,2769 |
| 4 | 548,52 | 6,65 | 44,2291 |
| 5 | 520,78 | -21,09 | 444,9641 |
| n=5 | $\Sigma = 2709,36$ | $\Sigma = 0$ | $\Sigma = 1136,705$ |

R_i – změřená hodnota odporu inkoustu

\bar{R}_i – aritmetický průměr hodnot odporu inkoustu

$$\bar{R}_i = \frac{\sum_i^n R_i}{n} = \frac{2709,3}{5} = 541,87 \Omega \quad (34)$$

Výběrový rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i^n (R_i - \bar{R}_i)^2 = \frac{1136,705}{4} = 284,1762 \quad (35)$$

Výběrová směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{284,1762} = 16,85 \quad (36)$$

Standartní nejistota typu A:

- Výsledek nejistoty typu A se zapisuje ve tvaru $(\bar{X}_l \pm u_A)$
- Pokud je n menší než 10, násobí se nejistota koeficientem k_a z tabulky X.

Tabulka 5 Hodnoty koeficientu k_a pro méně než $n = 10$

| | | | | | | | | | |
|-------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| n | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| koef. k_a | 1 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,7 | 2,3 | 7 |

$$u_A = k_a \sqrt{\frac{\sum_i^n (R_i - \bar{R}_l)^2}{n(n-1)}} = 1,4 \sqrt{\frac{1136,705}{20}} = 10,55 \Omega \quad (36)$$

$$u_A = (541,87 \pm 10,55) \Omega \Rightarrow \frac{10,55}{541,87} 100 = 1,95 \%$$

Nejistota typu A a výběrová směrodatná odchylky jsou uvedeny v tabulkách s vypočteným tlakem a odporem inkoustu (příloha 1 až 12).

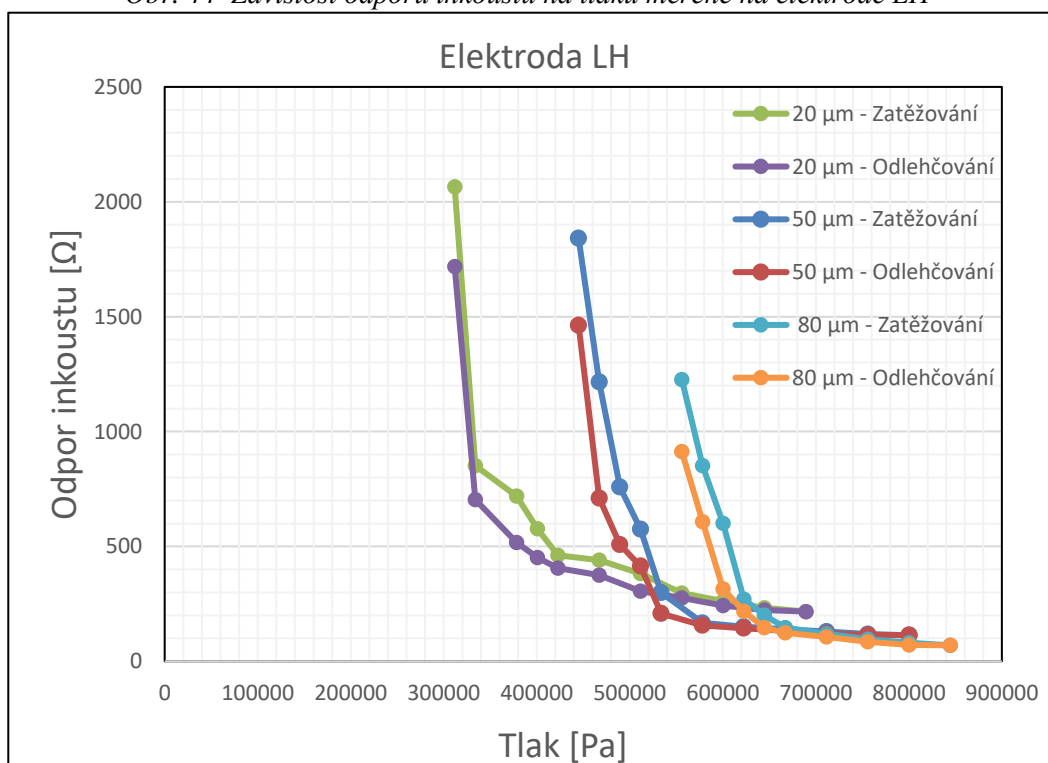
6 Výsledky měření

V této části jsou prezentovány výsledky měření na jednotlivých elektrodách. Jsou zde popsány průběhy závislosti změn odporu na působící síle a porovnány mezi sebou. Dále je zvolena optimální kombinace velikosti plochy elektrody a tloušťky vrstvy vodivého inkoustu.

6.1 Elektroda LH

Naměřené hodnoty na elektrodě LH byly vyneseny do grafu na obr. 44, přičemž na ose x je tlak a na ose y jsou hodnoty odporu. Přesné hodnoty měření jsou zapsané v tabulkách viz. příloha 1-12. Všechny průběhy vykazují podobně klesající charakter odporu při zvyšujícím se zatížení. Z průběhů je patrné, že tloušťka inkoustu výrazně ovlivňuje snímací citlivost senzoru. Na nejtenčí tloušťce se odpor začal měnit kolem tlaku 312 kPa, což odpovídá síle o velikosti 3,44 N. Odpor strmě klesá do hodnoty tlaku 422 kPa. V další části má průběh lineárnější charakter. Odpor klesnul na cca 216 Ω . U střední tloušťky bylo zapotřebí vyvinout větší tlak, odpor se změnil při 445 tlaku kPa. Od 533 kPa byl pokles odporu minimální až do konečné hodnoty 113 Ω . Nejtlustší vrstva snímala při tlaku 556 kPa. Po 662 kPa odpor lineárně klesal na 69 Ω . U všech měření byly rozdíly hodnot zatěžovací a odlehčovací větve (hystereze) poměrně malé. Největší míru hystereze vykazovala nejtenčí vrstva, u které se hodnoty odporu nejvíce měnily.

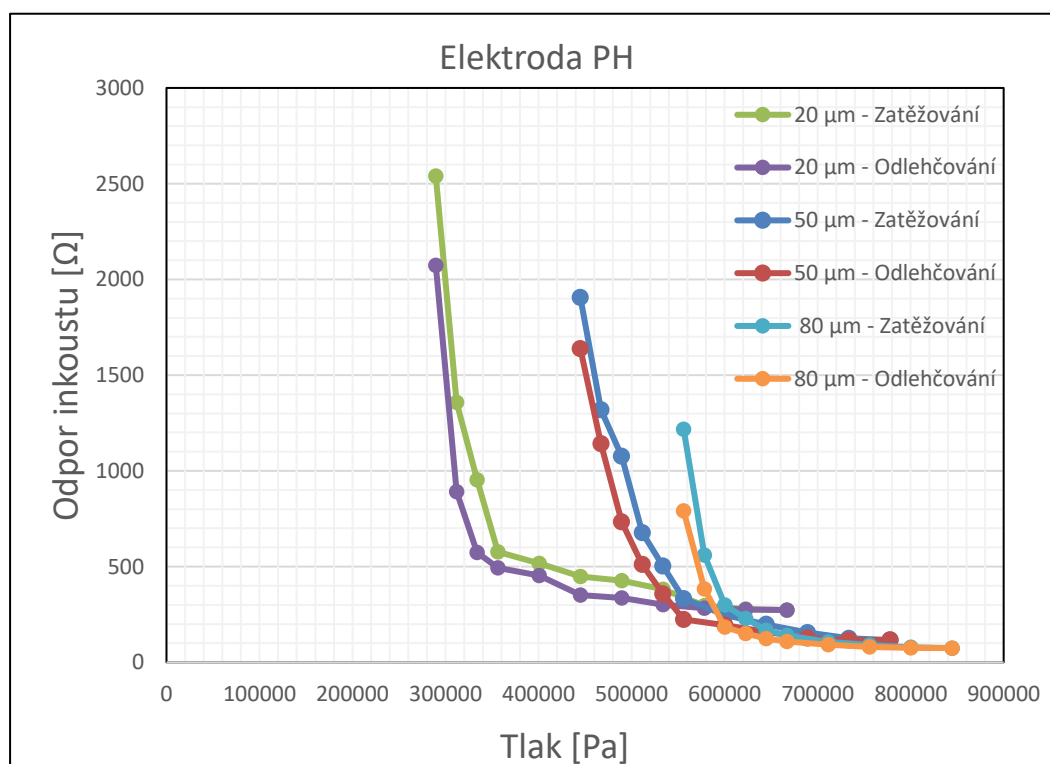
Obr. 44 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě LH



6.2 Elektroda PH

Na obr. 45 je zobrazen graf obsahující hodnoty naměřené na elektrodě PH. Průběhy mají podobně klesající trend jako v případě elektrody LH. Malým rozdílem mezi průběhy na obou elektrodách je spínací tlak. Na nejtenčí tloušťce se odpor začal měnit při tlaku 289 kPa, což je o 23 kPa méně než u elektrody LH. Tlaku odpovídala síla o velikosti 3,19 N. Následoval strmý pokles odporu do 356 kPa, od které byl průběh dále lineárnější. U střední tloušťky bylo zapotřebí vyvinout tlak 444 kPa a v případě nejtlustší vrstvy 556 kPa. Mezi konečnými hodnotami odporu u středních a nejtlustších vrstev byl rozdíl v řádech jednotek ohmů. Větší rozdíl byl u nejtenčích vrstev, kdy na elektrodě PH byl odpor 273 Ω , tj. o 57 Ω více než na elektrodě LH. Naměřené hystereze opisovaly zatěžovací průběhy bez větších odchylek.

Obr. 45 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě PH

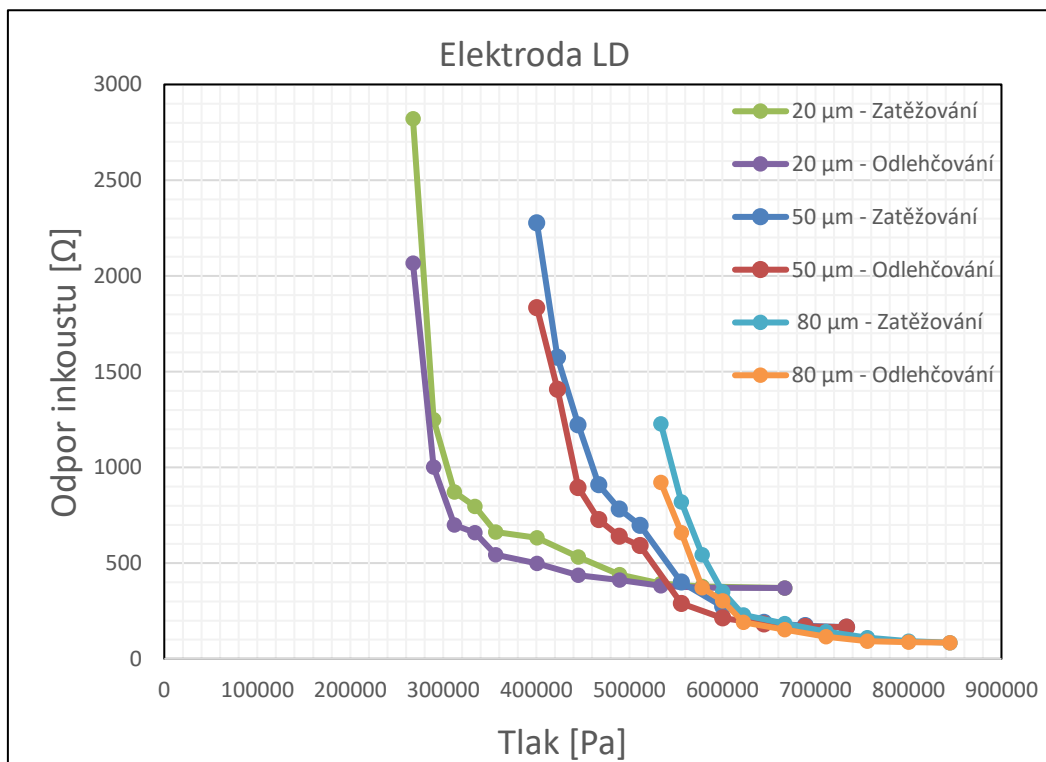


6.3 Elektroda LD

Hodnoty naměřené na elektrodě LD zobrazuje graf na obr. 46. Oproti předchozím dvěma elektrodám vykazovalo toto měření na největší citlivost a vyšší hodnoty odporu. Zároveň strmost počátečního odporu nebyla tak velká, a proto lineárnější část průběhu nastala později při větším tlaku. Při nejtenčí vrstvě se odpor začal měnit při tlaku 267 kPa, což je odpovídá síle o velikosti cca 2,95 N. Malý pokles odporu nastal až kolem 356 kPa, což byl stejný tlak jako v případě elektrody PH. Dále už odpor klesal velmi pomalu ke konečným 370 Ω , což

bylo téměř o 100Ω více než u elektrody PH. Střední tloušťka potřebovala na změnu odporu tlak 400 kPa a strmý pokles trval do 556 kPa . Na nejtlustší vrstvě došlo ke změně odporu při tlaku kolem 533 kPa . Lineárnější pokles nastal po zatížení tlakem 622 kPa . Velikost hystereze se ani v tomto případě výrazně nelišila.

Obr. 46 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě LD

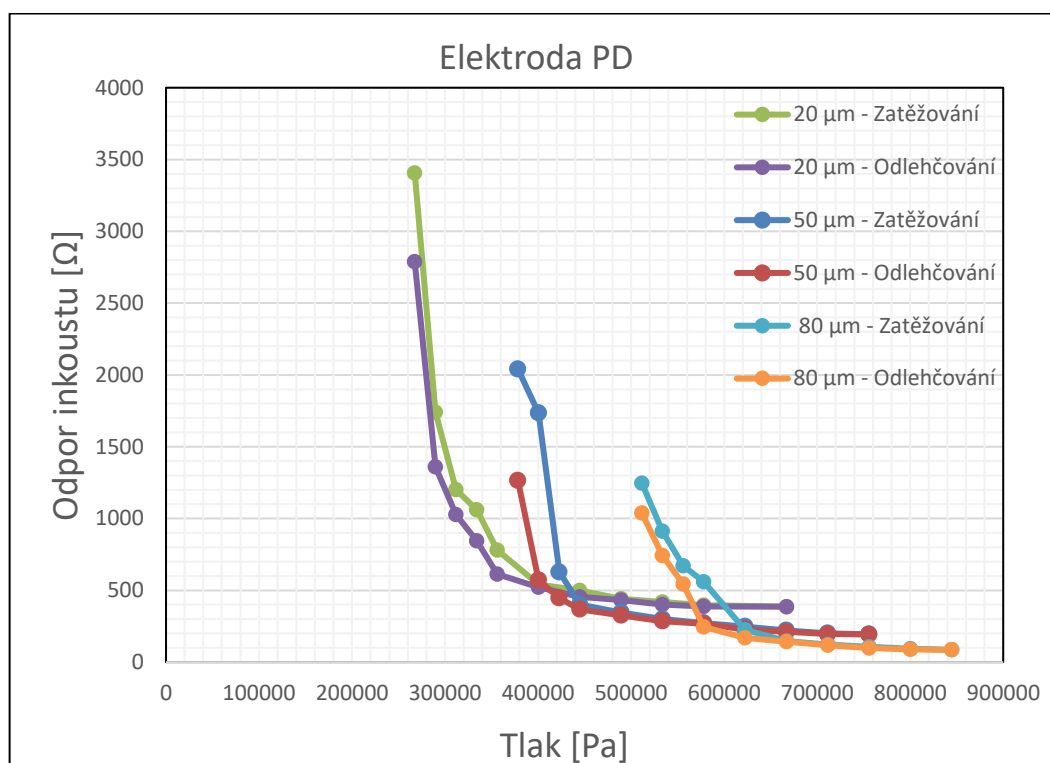


6.4 Elektroda PD

Měření na elektrodě PD prokázalo vyšší citlivost senzoru než na elektrodě LH a PH. V porovnání s elektrodou LD je citlivost srovnatelná nebo i lehce vyšší u vybraných vrstev. Jednotlivé průběhy ukazuje graf na obr. 47. Na nejtenčí vrstvě se odpor začal měnit při tlaku 267 kPa podobně jako u elektrody LD, s tím rozdílem že hodnota odporu byla o 586Ω vyšší. Ustálení strmého poklesu odporu nastalo později oproti LD, při tlaku 400 kPa . Dále už se odpor měnil minimálně. Při zvětšení zatížení o 267 kPa odpor klesl pouze o 153Ω na konečnou hodnotu 386Ω . Na této elektrodě a tloušťce vodivého inkoustu $20 \mu\text{m}$ byl poslední měřený odpor největší. Největší rozdíl od ostatních elektrod byl zaznamenán na střední tloušťce vrstvy inkoustu, kdy se hodnota odporu začala měnit kolem tlaku 386 kPa . Následoval velmi strmý pokles odporu do zatížení 445 kPa a v lineárnější části odpor klesl na 193Ω , což byla hodnota s největším rozdílem konečného odporu od hodnot naměřených na ostatních elektrodách. Nejtlustší vrstva snímala změnu odporu, dříve než ostatní elektrody, při

512 kPa, ale její následovný trend byl obdobný jako u ostatních elektrod. Strmý pokles ustal kolem 623 kPa a konečný odpor byl 85 Ω . U nejtlustších vrstev byly rozdíly mezi průběhy na jednotlivých elektrodách nejméně patrné. Průběhy se mnohdy překrývaly a klesly na podobné hodnoty odporů. Hystereze nebyla překvapivě největší u nejtenčí vrstvy, ale u střední, kdy na první hodnotě při zatěžování a poslední při odlehčování byl rozdíl cca 780 Ω .

Obr. 47 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě PD

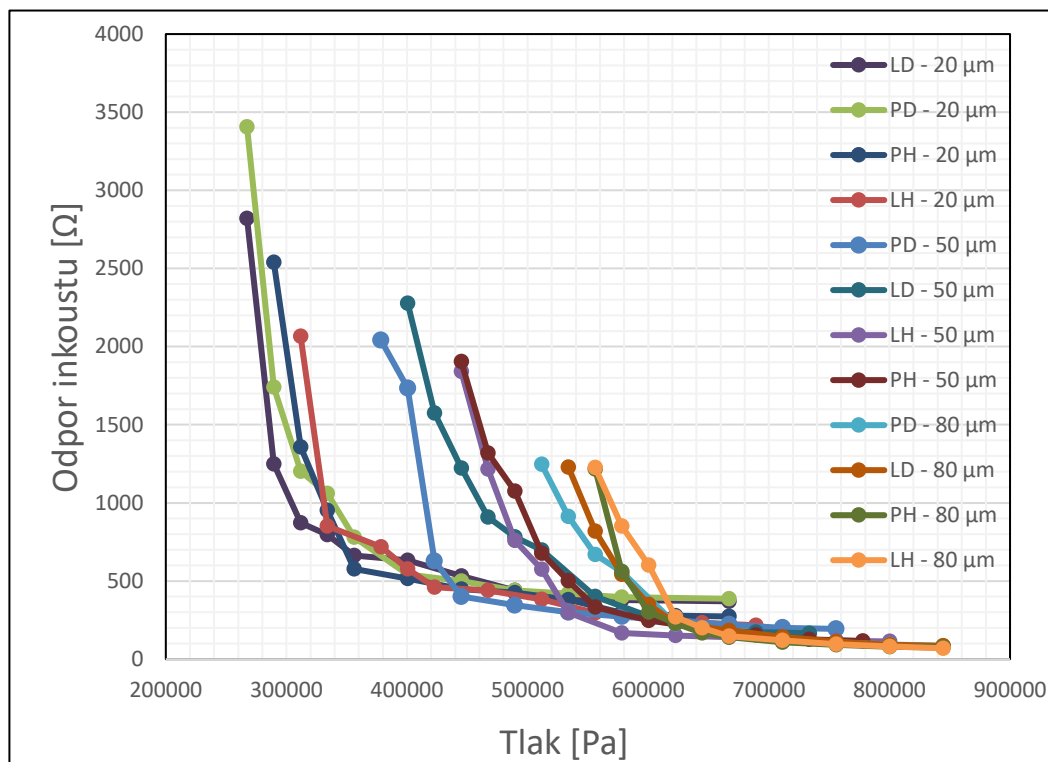


6.5 Vyhodnocení naměřených dat

Z naměřených charakteristik bylo potvrzeno, že použitý vzorek inkoustu vykazoval chování piezorezistivního materiálu. Při zvyšujícím tlaku se snižoval jeho elektrický odpor. Porovnáním naměřených průběhů na všech typech elektrod se dospělo k závěru, že právě velikost plochy ovlivňuje mez, od které lze snímat změnu odporu při zatížení. Na elektrodu s menší plochou je zapotřebí vyvinout větší tlak, který působí na fólii s naneseným inkoustem, než na elektrodu s větší plochou. Tuto skutečnost je možné vidět na obr. 48, na kterém je souhrnný graf se všemi naměřenými průběhy při zatěžování. Porovnáním průběhů elektrod se stejným průměrem vnějšího prstence E a rozdílnou plochou vzniknou dvojice elektrod LD, PD a LH, PH, u kterých je možné pozorovat rozdíl v počátečním tlaku při jakémkoliv ze tří tloušťek. Není tedy důležitá samotná velikost průměru elektrody, ale velikost její snímací

plochy s plochou dosedajícího inkoustu. Například na elektrodě PD je snímána změna odporu při 378 kPa, což je o 22 kPa méně než na elektrodě LD při totožné tloušťce inkoustu 50 μm .

Obr. 48 Závislost el. odporu na tlaku všech druhů elektrod a tloušťek inkoustu



Dále má velikost plochy vliv na hodnoty odporu. Při menší ploše je patrný posun průběhu charakteristiky níže na ose x, kde je odpor nižší. Velký rozdíl je například mezi porovnáním charakteristik elektrody PD a LH při tloušťce inkoustu 20 μm . Elektroda LH má plochu menší o cca 0,6 mm^2 než elektroda PD. Při tomto rozdílu ploch byl posun snímaného odporu o více než 1300 Ω .

Takovýto posun charakteristiky je přisuzován malé styčné ploše mezi povrchem elektrody a vrstvou inkoustu podle práce [36], ve které byla zkoumána změna elektrického odporu v závislosti na velikosti styčné plochy vodivého elastomeru. Při zatížení vrstva inkoustu přiléhá k povrchu elektrody, a tím vzniká vodivý kontakt. Když se oba povrchy přibližují, jejich styčná plocha se zvětšuje. To je doprovázeno snížením kontaktního odporu a naopak zvýšením vodivosti. V případě našich elektrod je plocha LH viditelně menší než DP, proto je potřeba většího zatížení k vytvoření dostatečně velké styčné plochy, která zaznamená změnu odporu. Větší tlak zapříčiní zaznamenání menšího odporu, proto je viditelný posun odporu počátečních hodnot. U větších ploch dojde ke změně odporu dříve při menším zatížení, proto je počáteční hodnota odporu větší.

Tyto poznatky lze formulovat do následujícího závěru. Vliv na změnu odporu vodivého inkoustu má velikost plochy elektrody takový, že čím je styčná plocha mezi inkoustem a elektrodou větší, tím je citlivost senzoru (měření) vyšší.

Dále lze z průběhů stanovit, jaký vliv má tloušťka inkoustu na závislost jejího odporu při působícím tlaku. Měřeny byly tloušťky inkoustu 20, 50 a 80 μm . Pokud byla tloušťka inkoustu větší, byly zaznamenány hodnoty odporu nižší v celém měřeném rozsahu a celkově byla schopnost inkoustu změnit svůj odpor na velikosti působícího tlaku menší. Toto chování způsobuje samotné složení vodivého materiálu. Aby se stal nějaký nevodivý materiál vodivým, potřebuje obsahovat vodivé částice, jako je například grafit u používaného vzorku inkoustu, které umožní průchod elektrickému proudu. U silnější vrstvy je přítomno více vodivých částí; pokud je následně vrstva zatížena, vodivé částice se v důsledku stlačení materiálu k sobě přiblíží a mezi nimi vznikne více vodivých cest. To umožní průchod většího proudu skrze vrstvu, a tím se sníží její celkový odpor. Díky tomu se u silnějších vrstev dříve dosáhne velikosti mezního tlaku, od kterého se odpor mění minimálně při zvyšování působící síly. Tenčí vrstvy obsahují méně částic, které vytvoří méně vodivých cest při zatížení, a proto je velikost odporu méně ovlivněna. Toto omezení má každá měřená tloušťka vrstvy, ale v jiné míře. Největší omezení změny odporu je vidět u tloušťky 80 μm na všechny měřené typy elektrod.

Z tohoto zjištění je možné říci, že čím je tloušťka vodivého inkoustu větší, tím je při narůstajícím tlaku schopnost změny elektrického odporu inkoustu menší. Dále má tloušťka vliv na rozlišovací schopnost a vodivost měřené vrstvy.

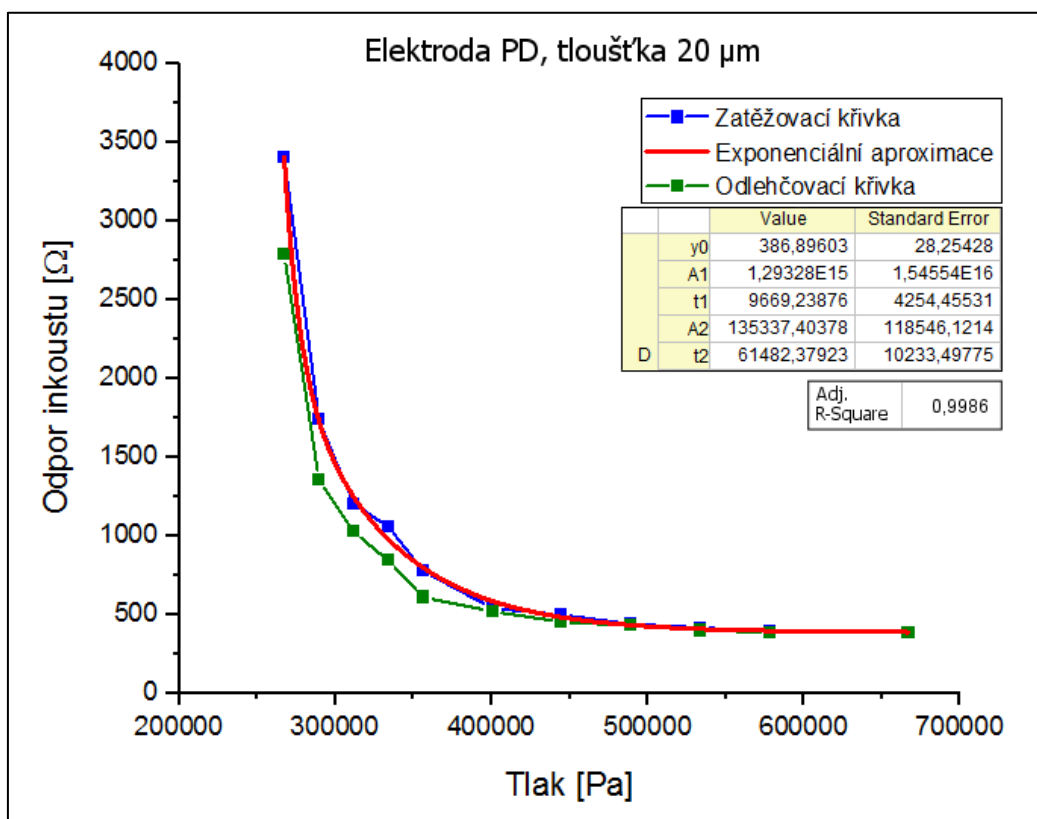
6.5.1 Optimální kombinace elektrody a tloušťky

Obecně lze říci, že měřený vzorek inkoustu vykazoval poměrně velký rozsah změn odporu, který se pohyboval od 3400 do 100 Ω , ale jeho citlivost nebyla příliš velká. Nejnížší naměřená hodnota tlaku při změně odporu byla 267 kPa. Z porovnaných závislostí a hodnot vykazovala vždy nejlepší vlastnosti nejtenčí tloušťka inkoustu 20 μm . Z elektrod se jako nejlepší typ jevila elektroda s největší plochou PD, podobné průběhy s trochu nižšími hodnotami byly naměřeny i na elektrodě LD. Obě elektrody měly při použití nejtenčí vrstvy nejlepší citlivost a rozlišovací schopnosti ze všech měřených kombinací. Po ustálení první velké změny odporu byl následný trend jejich průběhů téměř lineární. Obě elektrody mají stejně velký průměr vnějšího prstence 2,5 mm, tedy stejnou plochu vnější elektrody. Liší se však plocha vnitřní elektrody, která je u LD o 0,2 mm^2 menší než u PD. Podle naměřených hodnot v tabulce 6 a 7 je vidět, že obě elektrody snímaly změnu odporu při stejném tlaku, ale hodnoty odporu byly rozdílné. U elektrody PD byla počáteční naměřená hodnota odporu 3406 Ω a u elektrody LD byla 2820 Ω . Z hodnot vypočítané

nejistoty A je patrné, že při velké počáteční změně odporu byla i nejistota větší a dále její hodnota klesala s ustalujícím se odporem. Maximální odchylka od střední hodnoty odporu nepřesahovala 5 %. Při počátečním zatížení je u elektrody PD vypočítaná nejistota větší než u elektrody LD, její křivka má tedy větší tendenci se odchylovat od svého trendu. Pro oba průběhy elektrod byla vypočítána aproximace podle dvoufázové exponenciální rovnice $y = y_0 + A_1(1 - e^{-x/t_1}) + A_2(1 - e^{-x/t_2})$ v programu Origin 8.5.1. Hodnoty jednotlivých koeficientů jsou uvedeny v tabulce vesle průběhů. Průběhy aproximace jsou viditelné na obr. 49 pro elektrodu PD a na obr. 50 pro elektrodu LD.

Z aproximačních křivek lze vyvodit, že pokles odporu má trend blízký exponenciálnímu. Aproximace v případě elektrody PD má plynulejší pokles a křivka je při ustálení méně přivěšená než v případě elektrody LD.

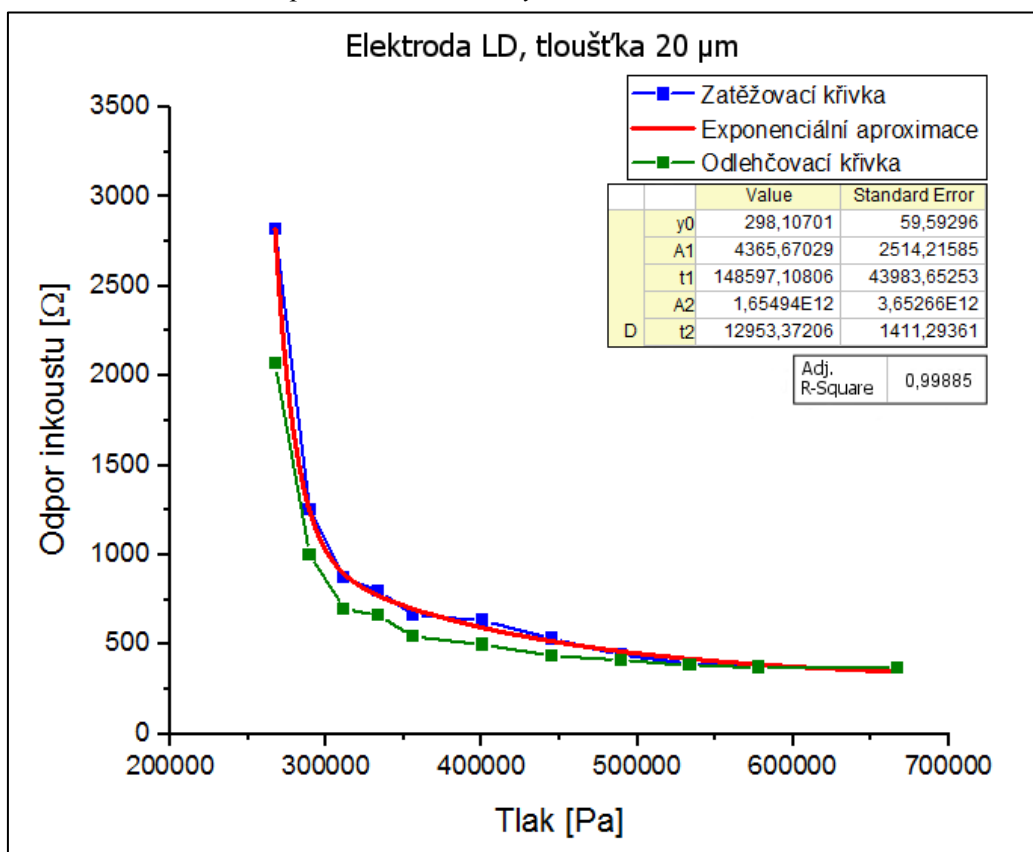
Obr. 49 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě PD



Tabulka 6 Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PD při tloušťce inkoustu 20 μm

| PD, 20 μm – Zatěžování | | | | | PD, 20 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 2,95 | 267343,59 | 3406,72 | 25,02 | 39,96 | 7,37 | 667026,71 | 386,37 | 1,85 | 2,95 |
| 3,20 | 289548,21 | 1741,27 | 16,34 | 26,09 | 6,39 | 578208,24 | 388,53 | 2,83 | 4,52 |
| 3,44 | 311752,83 | 1202,02 | 16,81 | 26,85 | 5,90 | 533799,00 | 400,42 | 5,35 | 8,55 |
| 3,69 | 333957,45 | 1060,76 | 14,20 | 22,69 | 5,41 | 489389,77 | 431,88 | 3,96 | 6,32 |
| 3,93 | 356162,06 | 779,36 | 6,61 | 10,56 | 4,91 | 444980,53 | 454,80 | 9,98 | 15,94 |
| 4,42 | 400571,30 | 541,87 | 10,55 | 16,86 | 4,42 | 400571,30 | 521,90 | 8,27 | 13,21 |
| 4,91 | 444980,53 | 499,80 | 8,60 | 13,74 | 3,93 | 356162,06 | 612,37 | 14,24 | 22,74 |
| 5,41 | 489389,77 | 440,60 | 6,20 | 9,90 | 3,69 | 333957,45 | 843,67 | 13,42 | 21,44 |
| 5,90 | 533799,00 | 418,84 | 5,69 | 9,09 | 3,44 | 311752,83 | 1026,58 | 6,25 | 9,99 |
| 6,39 | 578208,24 | 396,09 | 2,83 | 9,09 | 3,20 | 289548,21 | 1358,58 | 24,56 | 39,22 |
| 7,37 | 667026,71 | 386,37 | 1,85 | 2,95 | 2,95 | 267343,59 | 2789,44 | 22,15 | 35,38 |

Obr. 50 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě LD



Tabulka 7 Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LD při tloušťce inkoustu 20 μm

| LD, 20 μm – Zatěžování | | | | | LD, 20 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 2,95 | 267343,59 | 2820,53 | 10,29 | 16,44 | 7,37 | 667026,71 | 370,22 | 3,01 | 4,81 |
| 3,20 | 289548,21 | 1249,87 | 7,61 | 12,16 | 6,39 | 578208,24 | 371,29 | 3,01 | 4,81 |
| 3,44 | 311752,83 | 871,94 | 8,53 | 13,62 | 5,90 | 533799,00 | 380,98 | 3,02 | 4,82 |
| 3,69 | 333957,45 | 796,81 | 5,53 | 8,84 | 5,41 | 489389,77 | 412,33 | 5,58 | 8,90 |
| 3,93 | 356162,06 | 663,27 | 8,58 | 13,70 | 4,91 | 444980,53 | 436,24 | 7,07 | 11,29 |
| 4,42 | 400571,30 | 632,65 | 6,62 | 10,57 | 4,42 | 400571,30 | 498,71 | 9,45 | 15,10 |
| 4,91 | 444980,53 | 531,87 | 8,14 | 13,00 | 3,93 | 356162,06 | 542,97 | 5,50 | 8,79 |
| 5,41 | 489389,77 | 439,53 | 10,63 | 16,97 | 3,69 | 333957,45 | 659,85 | 6,36 | 10,16 |
| 5,90 | 533799,00 | 392,85 | 4,54 | 7,25 | 3,44 | 311752,83 | 699,77 | 3,00 | 4,79 |
| 6,39 | 578208,24 | 377,75 | 4,39 | 7,25 | 3,20 | 289548,21 | 1001,11 | 8,87 | 14,17 |
| 7,37 | 667026,71 | 370,22 | 3,01 | 4,81 | 2,95 | 267343,59 | 2067,10 | 7,63 | 12,19 |

6.6 Diskuze

Kvůli omezením spojeným s rozšířením viru COVID-19 bylo měření prováděno v domácím prostředí, nikoliv v laboratoři, proto byly veškeré využití metody přizpůsobeny těmto podmínkám. Potřebné pomůcky a měřicí přístroje byly pro uskutečnění měření zapůjčeny z Katedry elektrotechniky a automatizace. Pro velkou časovou náročnost bylo omezeno opakované měření za stejných podmínek z původních deseti na pět. Menší počet hodnot může mít vliv na výsledcích statistického vyhodnocování, neboť v případě většího počtu měření by mělo větší vypovídající hodnotu.

Z naměřených hodnot a vynesných grafů bylo zjištěno, že vodivý materiál má velký vliv na vlastnosti taktilního senzoru. Proto je velmi důležitá volba vhodného vodivého inkoustu. Před samotným měřením bylo potřeba nanést inkoust na snímací elektrody. Měřený vzorek inkoustu nejprve po nástřiku k elektrodě přilnul, ale po vyvinutí tlaku na nanesenou vrstvu byla odhalena nízká integrita mezi inkoustem a povrchem elektrody. Následkem zatížení docházelo k odlupování vrstvy od povrchu elektrody. Tento poznatek by měl být respektován při následném výběru inkoustu. Správně by měl inkoust po zaschnutí na elektrodě vytvořit pevný povrch, který vydrží působení mechanických sil při zatěžování taktilního senzoru. Pro lepší přilnavost k elektrodě je výhodné její povrch před nanášením inkoustu upravit. Aplikovaný inkoust pak musí mít správný úhel smáčení a povrchové napětí. Kvůli tomuto problému byl inkoust místo na povrch elektrody nanášen na plastovou fólii, se kterou měl mnohem lepší přilnavost.

Pro generování zatěžující síly byla využita hmotnost vody v nádobě. Tlak na taktilní senzor byl vyvíjen prostřednictvím tyčky s průměrem kontaktní plochy 3,75 mm. Tato metoda se ukázala být vhodná pro měření. Její velkou výhodou bylo plynulé zvyšování tlaku, které nebylo ničím omezeno, protože záviselo na množství přilité vody v jednom kroku, a to se mohlo v případě potřeby měnit. S problémem působícího tlaku se potýkala předcházející práce [37], která pro generování zatěžující síly využívala robotické rameno BOSCH Turbo Scara. Rameno dokázalo vyvinout mnohem větší tlak než nádoba vody, ale jeho pohyb ve vertikální ose byl omezen polohovacím mechanismem, který měl minimální posun daný. Nevýhodou při použití vody v nádobě byla její nízká viskozita. Pokud byl vodní sloupec v nádobě vyšší, tak se při dolévání mnohdy vodní hladina rozpohybovala, a to mělo vliv na výsledný tlak. Proto se musela voda v jednotlivých krocích dolévat pomaleji nebo se s odečítáním hodnot čekalo na ustálení hladiny. Řešením by mohlo být využití kapaliny s větší viskozitou, např. oleje, u kterého je známa velikost hustoty pro potřebné výpočty. Při opětovném využití této metody by bylo vhodnější využít jiný způsob pro zvyšování a snižování objemu vody než za pomoci injekční stříkačky, se kterou během měření bylo potřeba stále manipulovat. Její další nevýhodou byla relativně dlouhá doba prováděného úkonu (cca 20 s), který byl při velkém množství měřených hodnot zdlouhavý. Tento úkon by šlo v budoucnu zautomatizovat. Při využití čerpadla s malým průtokem by byla voda hadičkovým systémem čerpána do nádoby. Motorek čerpadla by mohl být ovládán řídicím obvodem a aplikací v programu LabVIEW.

Z provedeného měření byly zjištěny vlastnosti využitého inkoustu. Po aplikaci a zaschnutí vytvořil inkoust suchou kohézní vrstvu, která ale na dotek zanechávala malé černé částice. Při zatížení stejným tlakem po delší dobu prokázal vzorek určitou pevnost, kdy pokles jeho odporu po 20 min byl kolem 12 %. Po opakovaném zatěžování a odlehčování byla znát únava materiálu nanesené vrstvy. Po zhruba polovině provedených měření bylo u některých vzorků pozorováno výrazné zhoršení vodivosti a deformace povrchu vrstvy. To mohlo být zapříčiněno působením příliš vysokého tlaku, který překročil mez úměrnosti tenké vrstvy, nebo příliš častou manipulací, během které se vrstva obrušovala při kontaktu s jinými materiály. Proto musely být poškozené vzorky nahrazeny novými.

Po vyhodnocení naměřených hodnot byla data konfrontována s prací [37], jejíž náplní bylo také měření změny odporu inkoustu na působícím zatížení. Práce využívala pro měření vzorek inkoustu DZT-3K obsahující uhlíkové vodivé částice. V této práci byl použit inkoust Graphit 33. Obě práce došly ke shodnému závěru, že nejlepší kombinací je nejtenčí vrstva

inkoustu a elektroda s největší plochou, ale každý typ inkoustu se choval při měření jinak. Inkoust DZT-3K projevoval výrazně vyšší citlivost než inkoust Graphit 33, kdy reagoval na změnu odporu při nižším tlaku kolem 22 kPa. Graphit 33 reagoval při tlaku 267 kPa. K tomuto porovnání je nutné dodat, že měřená nejtenčí vrstva inkoustu DZT-3K měla poloviční tloušťku než nejtenčí vrstva měřená v této práci. I při větší tloušťce vrstvy vykazoval Graphit 33 vyšší rozlišovací schopnost. Odpor se u nejtenčí vrstvy měnil od 3,4 k Ω do 380 Ω a zbylé dvě tloušťky měly nižší, ale stále přijatelnou rozlišovací schopnost. Tento fakt uváděl autor ve své práci, tedy že inkoust DZT-3K má velkou vodivost, a tím malou rozlišovací schopnost. Při měření na nejtenčí vrstvě se její odpor pohyboval mezi 1,2 k Ω a 390 Ω . U širších vrstev se odpor měnil minimálně.

Z porovnání vlastností dvou druhů vodivých inkoustů lze vyvodit závěr, že ani jeden z nich není nejvhodnější volbou pro taktilní senzory. Každý by byl vhodný v jiné aplikaci, kde bude vyžadována buď větší nebo menší citlivost. Je možné zahrnout do úvahy fakt, že pokud by byl inkoust s grafitovými částicemi měřen na stejně tenké vrstvě jako druhý typ inkoustu, mohl by vykazovat větší citlivost. Dále je potřeba brát v potaz životnost vrstvy inkoustu, která bude při použití v taktilním senzoru vyžadována. Při měření inkoustu s uhlíkovými částicemi není v práci zmínka o poškození povrchu vrstvy. U měření inkoustu s grafitovými částicemi se vyskytly případy deformované vrstvy. Je tedy třeba uvažovat nad příčinou deformace; zda je na vině špatně nanesená vrstva nebo například příliš velký zatěžovací tlak. Toto zjištění by bylo potřeba do budoucna objasnit.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjistit vlastnosti taktilního snímače, který využívá vrstvu vodivého inkoustu jako převodníku síla – elektrický odpor. Dílčím cílem bylo prozkoumat vliv rozdílné tloušťky inkoustu v kombinaci s různými typy snímacích elektrod na změnu elektrického odporu senzoru zatěžovaného silou.

Pro měření byly vytvořeny tři kruhové vrstvy inkoustu o tloušťce 20, 50 a 80 μm . Jejich vlastnosti byly měřeny na čtyřech typech elektrod s rozdílnou velikostí snímací plochy. Problematickou částí bylo nedostatečné přilnutí inkoustu k povrchu snímacích elektrod, proto byl inkoust nanesen na tenkou plastovou fólii, která se na povrch elektrod přikládala. Z naměřených hodnot byly vyneseny grafy závislosti změn odporu inkoustu na působícím tlaku pro jednotlivé kombinace. Porovnáním závislostí mezi sebou bylo zjištěno, že čím větší je tloušťka vrstvy inkoustu, tím má větší vodivost, která způsobuje nižší rozlišovací schopnost snímače. Tedy rozsah změny odporu byl u nejtlustší vrstvy cca 1250-70 Ω , u střední vrstvy cca 2000-190 Ω a u nejtenčí vrstvy 3400-380 Ω . Dále bylo zjištěno, že elektroda s menší snímací plochou zaznamená změnu odporu až při větším tlaku. To reprezentuje nižší citlivost taktilního snímače. Jako optimální kombinace byla zvolena dvojice elektrod PD a LD s nejtenčí vrstvou inkoustu (20 μm), jejichž průběhy vykazovaly největší citlivost, která se projevila změnou odporu při tlaku kolem 267 kPa, a rozlišovací schopnost. U elektrody PD a LD byla počítána aproximace. Díky ní bylo zjištěno, že výsledné průběhy mají exponenciální charakter. Vypočítaná odchylka od střední hodnoty průběhů se pohybovala do 5 %.

V porovnání s inkoustem DZT-3K, prezentovaným v práci [37], vykazoval inkoust měřený v této práci nižší citlivost, ale vyšší rozsah změny odporu. Inkoust DZT-3K reagoval na změnu odporu při tlaku 22 kPa, což bylo o 245 kPa méně než u měřeného inkoustu. Naopak měřený inkoust se pohyboval ve větším rozsahu změny odporu od 3,4 k Ω do 380 Ω oproti porovnávanému inkoustu, který se pohyboval mezi 1,2 k Ω a 390 Ω .

Ze zmíněných poznatků vyplývá, že měřený inkoust prokázal základní požadované vlastnosti. Ačkoli se nejedná o ideálně vodivý inkoust k širokému využití, lze ho poměrně úspěšně aplikovat v taktilních senzorech, které nebudou vyžadovat snímání tlaků pod hodnotu 200 kPa.

U případné navazující práce by bylo nutné objasnit příčinu opotřebování vrstev inkoustu a upravit metodu tlakového zatěžování pro snazší opakovatelnost více měření.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] LYSENKO, V. Úvod do metrologie [elektronická skripta]. Ostrava, © 2005 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/uvmet/09.pdf>
- [2] Tactile sensors. In: Scholarpedia: the peer-reviewed open-access encyclopedia [online], last modified on 29.5.2015 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: http://www.scholarpedia.org/article/Tactile_Sensors
- [3] ELPROCUS. Tactile Sensor Working and Its Types [online]. ©2013-2020 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/tactile-sensor-types-and-its-working/>
- [4] VOLF, J. *Taktilní senzory pro automatizaci*. Automa: časopis pro automatizační techniku [online]. 2008, roč. 14, č. 7 [cit. 2019-12-05]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37544.pdf>
- [5] Vrba R., Hubálek J., Adámek M.: *Mikrosenzory a mikromechanické systémy* [online]. 2018 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/Menufram.htm>
- [6] APPLIED MEASUREMENTS LIMITED. What are Hysteresis Errors? [online]. ©2004-2020 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://appmeas.co.uk/resources/pressure-measurement-notes/what-are-hysteresis-errors/>
- [7] VYLEGALA, P. Rozdělení snímačů, požadavky kladené na snímače, vlastnosti snímačů. 2014 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: http://www.ssenajizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_ss_1.pdf
- [8] RADA, V. Teorie měření a regulace. 2015 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/tst/rada.v/TMaR/t-mar-2015-9cv-TAK.pdf>
- [9] VOLF, J. - VLČEK, J. – Semnický, T.: The piezoelectric tactile sensor for static force measurement. In. XVIII IMEKO World Congress, Rio de Janeiro 2006, Brasil
- [10] FOUSEK, J. *Rešeršní studie zaměřená na měření a řízení přítláčné síly robotických koncových členů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Dostupné také z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30292347.pdf>
- [11] Tekscan. How Does a Force Sensing Resistor (FSR) Work? [online]. ©2020 [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://www.tekscan.com/blog/flexiforce/how-does-force-sensing-resistor-fsr-work>

- [12] JOCKUSCH, J., WALTER, J., RITTER, H. *A Tactile Sensor System for a Three-Fingered Robot Manipulator*. IEEE 1997. University of Bielefeld. Dostupné z: <https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~walter/pub/JockuschWalterRitter97-icra.pdf>
- [13] BROUČEK, M. *Využití taktilních čidel ve výuce na základní škole a v technické praxi*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra technické a informační výchovy.
- [14] HUSÁK, M. *Taktilní senzory a dotykové displeje*. [online prezentace] [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12086248-4-taktilni-senzory-a-dotykové-displeje.html>
- [15] PYO, S., LEE, J., KIM, Min-Ook, KEW-LEE, Hyung. *Polymer-based flexible and multi-directional tactile sensor with multiple NiCr piezoresistors*. *Micro and Nano Systems Letters* [online]. 2019, č. 7 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40486-019-0085-6>
- [16] JAŠEK, P. *Pasivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, strojního inženýrství, Ústavstrojírenské technologie. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87262
- [17] LUFINKA, A. *Snímače pro měření deformace* [online prezentace]. 2012 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky//p8_snimace_deformace.pdf
- [18] Matsumiya, T.; Nakayama, S.; Miura, Y.; etc.: *Intelligent control method for robot hand based on tactile information by double-octagon tactile sensor*. 1999 IEEE International Conference on Systems, man, and Cybernetics, vol. 2. IEEE, Piscataway, USA, 2001
- [19] CHENG, Ming-Yuan, HUANG, X.-H., MA, C.-W. a YANG, Y.-J. A. *Flexible Capacitive Tactile Sensing Array with Floating Electrodes*. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2009, 19(11) [cit. 2019-12-18]. DOI: 10.1088/0960-1317/19/11/115001. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/230940000_A_Flexible_Capacitive_Tactile_Sensing_Array_with_Floating_Electrodes
- [20] PEŠKA, R. *Plně flexibilní plošné spoje přicházejí*. In: HW server [online]. 15. dubna, 2019, 9:00 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/plne-flexibilni-plosne-spoje-prichazi.html>
- [21] VOJÁČEK, A. *Magnetické senzory, přiblížení - 1. díl*. In: HW server [online]. 2. října, 2017, 9:10 [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni.html>

- [22] ŠIPULA, M. *Zařízení pro lineární odměřování polohy*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27723
- [23] FORMÁNEK, J. *Snímač síly a momentu* [online přednáška]. 2007 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/VYUKA/Data1/MT/mt-prednasky/K06sila.pdf>
- [24] VOJÁČEK, A. *Magnetostrikční lineární snímače pohybu*. In: HW server [online]. 4. října, 2010, 20:41 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magnetostrickni-linearni-snimace-pohybu>
- [25] NAGAHAMA, Shunsuke, MIGITA, Kayo a SUGANO, Shigeki. *Soft Magnetic Powdery Sensor for Tactile Sensing*. Sensors [online]. 2019, 19 (12) [cit. 2019-12-30]. DOI: 10.3390/s19122677. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6631932/>
- [26] CHI, Cheng, SUN, Xuguang, XUE, Ning, LI, Tong a LIU, Chang. *Recent Progress in Technologies for Tactile Sensors*. Sensors [online]. 2018, 18 (4) [cit. 2020-01-04]. DOI: 10.3390/s18040948. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5948515/>
- [27] ŠVESTKA, J. *Mikroohybové optovláknové snímače*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64278
- [28] DOLEJŠ, N. *Optická vlákna v aplikované pružnosti*. In: STČ 2010: Konference studentské tvůrčí činnosti. Strojní fakulta ČVUT v Praze, 30. března 2010: sborník příspěvků konference [online]. Praha, 2010 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2010/sbornik/papers/pdf/DolejsNorbort-314334.pdf>
- [29] *Optické vláknové mřížky (FBG)*. Boteg.cz [online]. ©2020 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://www.boteg.cz/cz/fiber-bragg-grating/>
- [30] WARD-CHERRIER, Benjamin., PESTELL, Nicholas, CRAMPORN, Luke, WINSTONE, Benjamin, GIANNACCINI, Maria Elena, ROSSITER, Jonathan a LEPORA, F. Nathan. *The TacTip Family: Soft Optical Tactile Sensors with 3D-Printed Biomimetic Morphologies*. Soft Robotics [online]. 2018, 5 (2) [cit. 2020-01-15]. DOI: 10.1089/soro.2017.0052. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5905869/>

- [31] LEPORA, F. Nathan, CHURCH, Alex, DE KERCKHOVE, Conrad, HADSELL, Raia, LLOYD, John. *From pixels to percepts: Highly robust edgeperception and contour following using deeplearning and an optical biomimetic tactile sensor*. IEEE Robotics and Automation Letters [online]. 2019, 4 (2) [cit. 2020-01-15]. DOI: 10.1109/LRA.2019.2899192. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1812.02941.pdf>
- [32] Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Ústav fyziky. *Piezoelektrické jevy. Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích* [online prezentace]. 2012 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf
- [33] Snímače mechanického namáhání – piezoelektrický jev. ELUC – elektronická učebnice [online]. ©2020 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590>
- [34] YU, Ping, LIU, Weiting, GU, Chunxin, CHENG, Xiaoying a FU, Xin. *Flexible Piezoelectric Tactile Sensor Array for Dynamic Three-Axis Force Measurement*. Sensors [online]. 2016, 16 (6) [cit. 2020-01-22]. DOI : 10.3390/s16060819. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4934245/>
- [35] KONTACT CHEMIE. *Graphit 33*. Technical data sheet. 4. 6, 2013. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2723424.pdf?_ga=2.247062980.1361376680.1586329450998405615.1580898668&_gac=1.82737636.1584374240.Cj0KCQiAkKnyBRDwARIsALtXe7jDui9OiELS15TGUII89tNcRFmlDdR0AuS15fDCanigUZGLIQ80g6kaArw5EALw_wcB
- [36] TRINKL, A. *Optimalizace konstrukce plošných taktilních snímačů*. Disertační práce. ČZU Praha, 2011
- [37] LUFINKA, J. *Vliv vodivého inkoustu na vlastnosti taktilního snímače*. Praha, 2014. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta elektrotechniky a automatizace.

Seznam obrázků:

- Obr. 1 Příklad hysterezní křivky [6]
- Obr. 2 Přejímová charakteristika [5]
- Obr. 3 Typická závislost odporu senzoru s elastomerem na působící síle [8]
- Obr. 4 Závislost odporu FSR senzoru na působící síle [4]
- Obr. 5 Konstrukce článku tříprsté ruky se senzorem FSR [10]
- Obr. 6 Řez konstrukcí senzoru s odporovou vrstvou [4]
- Obr. 7 Konstrukce senzoru s odporovou tenkou vrstvou [14]
- Obr. 8 Schéma a převodní charakteristika senzoru s odporovou tlustou vrstvou [14]
- Obr. 9 Schéma konstrukce senzoru s piezorezistory NiCr na bázi polymeru [15]
- Obr. 10 Princip namáhání senzoru s piezorezistory NiCr na bázi polymeru [15]
- Obr. 11 Průběh působení normálové (a) a smykové (b) síly na senzoru s piezorezistory
- Obr. 12 Drátový a foliový tenzometr [17]
- Obr. 13 Uspořádání tenzometrů na snímači DOTS [4]
- Obr. 14 Průřez kapacitního taktálního senzoru [10]
- Obr. 15 Senzor se změnou vzdálenosti desek [10]
- Obr. 16 Konstrukce kapacitního dotykového snímacího pole s pohyblivými elektrodami [19]
- Obr. 17 Schéma typického kapacitního snímacího mechanismu [19]
- Obr. 18 Schématický princip magnetostrikce [23]
- Obr. 19 Princip magnetoanizotropního senzoru [23]
- Obr. 20 Orientace magnetického pole feromagnetického prášku pro dva různé typy senzorů [25]
- Obr. 21 Působení síly na měkký MPS [25]
- Obr. 22 Optické vlákno s Braggovou mřížkou a průběhy signálů [29]
- Obr. 23 Konstrukce senzoru TacTip [30]
- Obr. 24 Naměřená hodnoty při dotyku pinů senzoru TacTip [30]
- Obr. 25 Krystalová mřížka piezoelektrického materiálu [32]
- Obr. 26 Konceptuální schéma tříosého dotykového sensorového pole [34]
- Obr. 27 Princip namáhání piezoelektrických kondenzátorů taktálního senzoru [34]
- Obr. 28 Působení síly na jehlan sensorového pole
- Obr. 29 Průběh odezvy senzoru na působící sílu v čase [34]
- Obr. 30 Graphit 33
- Obr. 31 Testovací nástřiky vodivého inkoustu
- Obr. 32 Nerovnost vznikající na povrchu naneseného inkoustu
- Obr. 33 Zakrývací maska s kruhovými otvory
- Obr. 34 Vzorek fólie s nanesenými vrstvami inkoustu
- Obr. 35 Rozměry kruhových elektrod
- Obr. 36 Kontaktní piny na vývodech matice
- Obr. 37 Snímací matice využívaná v Plantografu
- Obr. 38 Vodící konstrukce z Merkuru
- Obr. 39 Nákres metody generování síly
- Obr. 40 Schéma zapojení měřicího obvodu
- Obr. 41 Nastavování výstupního napětí stabilizátoru
- Obr. 42 Detail hrotu tyčky a vrstvy vodivého inkoustu
- Obr. 43 Pracoviště na měření vlastností vodivého inkoustu
- Obr. 44 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě LH
- Obr. 45 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě PH
- Obr. 46 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě LD

Obr. 47 Závislost odporu inkoustu na tlaku měřené na elektrodě PD

Obr. 48 Závislost el. odporu na tlaku všech druhů elektrod a tloušťek inkoustu

Obr. 49 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě PD

Obr. 50 Aproximace naměřených hodnot na elektrodě LD

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Naměřené a vypočtené hodnoty síly na senzory pole [34]

Tabulka 2 Technické parametry inkoustu Graphit 33[35]

Tabulka 3 Rozměry jednotlivých druhů elektrod a jejich vypočítané plochy

Tabulka 4 Zpracování naměřených hodnot odporu při zatěžujícím tlaku 400571, 3 Pa na elektrodě PD

Tabulka 5 Hodnoty koeficientu k_a pro méně než $n = 10$

Tabulka 6 Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PD při tloušťce inkoustu 20 μm

Tabulka 7 Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LD při tloušťce inkoustu 20 μm

Přílohy

Příloha 1: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PD při tloušťce inkoustu 20 μm .

| PD, 20 μm – Zatěžování | | | | | PD, 20 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 2,95 | 267343,59 | 3406,72 | 25,02 | 39,96 | 7,37 | 667026,71 | 386,37 | 1,85 | 2,95 |
| 3,20 | 289548,21 | 1741,27 | 16,34 | 26,09 | 6,39 | 578208,24 | 388,53 | 2,83 | 4,52 |
| 3,44 | 311752,83 | 1202,02 | 16,81 | 26,85 | 5,90 | 533799,00 | 400,42 | 5,35 | 8,55 |
| 3,69 | 333957,45 | 1060,76 | 14,20 | 22,69 | 5,41 | 489389,77 | 431,88 | 3,96 | 6,32 |
| 3,93 | 356162,06 | 779,36 | 6,61 | 10,56 | 4,91 | 444980,53 | 454,80 | 9,98 | 15,94 |
| 4,42 | 400571,30 | 541,87 | 10,55 | 16,86 | 4,42 | 400571,30 | 521,90 | 8,27 | 13,21 |
| 4,91 | 444980,53 | 499,80 | 8,60 | 13,74 | 3,93 | 356162,06 | 612,37 | 14,24 | 22,74 |
| 5,41 | 489389,77 | 440,60 | 6,20 | 9,90 | 3,69 | 333957,45 | 843,67 | 13,42 | 21,44 |
| 5,90 | 533799,00 | 418,84 | 5,69 | 9,09 | 3,44 | 311752,83 | 1026,58 | 6,25 | 9,99 |
| 6,39 | 578208,24 | 396,09 | 2,83 | 9,09 | 3,20 | 289548,21 | 1358,58 | 24,56 | 39,22 |
| 7,37 | 667026,71 | 386,37 | 1,85 | 2,95 | 2,95 | 267343,59 | 2789,44 | 22,15 | 35,38 |

Příloha 2: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PD při tloušťce inkoustu 50 μm .

| PD, 50 μm – Zatěžování | | | | | PD, 50 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 4,18 | 378366,68 | 2040,97 | 13,99 | 22,35 | 8,35 | 755845,18 | 192,64 | 1,45 | 2,32 |
| 4,42 | 400571,30 | 1734,36 | 12,42 | 19,84 | 7,86 | 711435,94 | 195,76 | 3,71 | 5,93 |
| 4,67 | 422775,92 | 628,15 | 12,59 | 20,11 | 7,37 | 667026,71 | 210,34 | 6,28 | 10,03 |
| 4,91 | 444980,53 | 400,43 | 8,63 | 13,79 | 6,88 | 622617,47 | 228,10 | 8,29 | 13,24 |
| 5,41 | 489389,77 | 345,55 | 6,44 | 10,29 | 6,39 | 578208,24 | 268,00 | 6,35 | 10,14 |
| 5,90 | 533799,00 | 299,73 | 4,92 | 7,87 | 5,90 | 533799,00 | 285,96 | 7,98 | 12,75 |
| 6,39 | 578208,24 | 272,22 | 4,67 | 7,46 | 5,41 | 489389,77 | 325,25 | 5,28 | 8,43 |
| 6,88 | 622617,47 | 248,01 | 5,50 | 8,79 | 4,91 | 444980,53 | 368,08 | 7,52 | 12,02 |
| 7,37 | 667026,71 | 220,78 | 6,29 | 10,05 | 4,67 | 422775,92 | 446,06 | 8,58 | 13,70 |
| 7,86 | 711435,94 | 200,96 | 3,71 | 10,05 | 4,42 | 400571,30 | 570,87 | 14,62 | 23,36 |
| 8,35 | 755845,18 | 193,68 | 2,30 | 3,67 | 4,18 | 378366,68 | 1263,87 | 20,38 | 32,55 |

Příloha 3: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PD při tloušťce inkoustu 80 μm .

| PD, 80 μm – Zatěžování | | | | | PD, 80 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 5,65 | 511594,39 | 1246,08 | 9,12 | 14,57 | 9,33 | 844663,65 | 85,73 | 3,18 | 5,09 |
| 5,90 | 533799,00 | 912,29 | 10,68 | 17,05 | 8,84 | 800254,41 | 87,77 | 3,63 | 5,80 |
| 6,14 | 556003,62 | 670,09 | 8,20 | 13,10 | 8,35 | 755845,18 | 96,93 | 4,16 | 6,65 |
| 6,39 | 578208,24 | 558,57 | 11,41 | 18,23 | 7,86 | 711435,94 | 117,36 | 3,51 | 5,61 |
| 6,88 | 622617,47 | 223,91 | 7,09 | 11,33 | 7,37 | 667026,71 | 141,99 | 5,09 | 8,13 |
| 7,37 | 667026,71 | 147,14 | 5,81 | 9,28 | 6,88 | 622617,47 | 168,81 | 4,80 | 7,67 |
| 7,86 | 711435,94 | 122,49 | 4,18 | 6,68 | 6,39 | 578208,24 | 243,81 | 7,56 | 12,07 |
| 8,35 | 755845,18 | 107,14 | 5,26 | 8,40 | 6,14 | 556003,62 | 544,08 | 6,23 | 9,94 |
| 8,84 | 800254,41 | 92,86 | 3,64 | 5,81 | 5,90 | 533799,00 | 741,16 | 10,54 | 16,83 |
| 9,33 | 844663,65 | 85,73 | 3,18 | 5,81 | 5,65 | 511594,39 | 1037,59 | 18,09 | 28,89 |

Příloha 4: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LD při tloušťce inkoustu 20 μm .

| LD, 20 μm – Zatěžování | | | | | LD, 20 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 2,95 | 267343,59 | 2820,53 | 10,29 | 16,44 | 7,37 | 667026,71 | 370,22 | 3,01 | 4,81 |
| 3,20 | 289548,21 | 1249,87 | 7,61 | 12,16 | 6,39 | 578208,24 | 371,29 | 3,01 | 4,81 |
| 3,44 | 311752,83 | 871,94 | 8,53 | 13,62 | 5,90 | 533799,00 | 380,98 | 3,02 | 4,82 |
| 3,69 | 333957,45 | 796,81 | 5,53 | 8,84 | 5,41 | 489389,77 | 412,33 | 5,58 | 8,90 |
| 3,93 | 356162,06 | 663,27 | 8,58 | 13,70 | 4,91 | 444980,53 | 436,24 | 7,07 | 11,29 |
| 4,42 | 400571,30 | 632,65 | 6,62 | 10,57 | 4,42 | 400571,30 | 498,71 | 9,45 | 15,10 |
| 4,91 | 444980,53 | 531,87 | 8,14 | 13,00 | 3,93 | 356162,06 | 542,97 | 5,50 | 8,79 |
| 5,41 | 489389,77 | 439,53 | 10,63 | 16,97 | 3,69 | 333957,45 | 659,85 | 6,36 | 10,16 |
| 5,90 | 533799,00 | 392,85 | 4,54 | 7,25 | 3,44 | 311752,83 | 699,77 | 3,00 | 4,79 |
| 6,39 | 578208,24 | 377,75 | 4,39 | 7,25 | 3,20 | 289548,21 | 1001,11 | 8,87 | 14,17 |
| 7,37 | 667026,71 | 370,22 | 3,01 | 4,81 | 2,95 | 267343,59 | 2067,10 | 7,63 | 12,19 |

Příloha 5: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LD při tloušťce inkoustu 50 μm .

| LD 50, μm – Zatěžování | | | | | LD, 50 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 4,42 | 400571,30 | 2277,49 | 12,02 | 19,20 | 8,10 | 733640,56 | 165,70 | 1,77 | 2,83 |
| 4,67 | 422775,92 | 1574,08 | 6,63 | 10,59 | 7,61 | 689231,33 | 168,80 | 1,45 | 2,31 |
| 4,91 | 444980,53 | 1222,12 | 13,20 | 21,08 | 7,12 | 644822,09 | 182,27 | 4,23 | 6,76 |
| 5,16 | 467185,15 | 908,71 | 7,72 | 12,34 | 6,63 | 600412,86 | 213,46 | 4,79 | 7,64 |
| 5,41 | 489389,77 | 781,68 | 7,72 | 12,33 | 6,14 | 556003,62 | 289,13 | 4,91 | 7,85 |
| 5,65 | 511594,39 | 697,48 | 5,44 | 8,68 | 5,65 | 511594,39 | 590,99 | 9,79 | 15,64 |
| 6,14 | 556003,62 | 400,43 | 6,77 | 10,82 | 5,41 | 489389,77 | 639,44 | 5,82 | 9,30 |
| 6,63 | 600412,86 | 273,27 | 4,31 | 6,88 | 5,16 | 467185,15 | 726,17 | 7,47 | 11,93 |
| 7,12 | 644822,09 | 189,53 | 6,66 | 10,64 | 4,91 | 444980,53 | 894,44 | 4,84 | 7,73 |
| 7,61 | 689231,33 | 172,94 | 3,24 | 10,64 | 4,67 | 422775,92 | 1407,72 | 5,31 | 8,48 |
| 8,10 | 733640,56 | 165,70 | 1,77 | 2,83 | 4,42 | 400571,30 | 1834,33 | 6,93 | 11,07 |

Příloha 6: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LD při tloušťce inkoustu 80 μm .

| LD, 80 μm – Zatěžování | | | | | LD, 80 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 5,90 | 533799,00 | 1228,40 | 8,56 | 13,67 | 9,33 | 844663,65 | 84,71 | 2,66 | 4,26 |
| 6,14 | 556003,62 | 819,02 | 9,90 | 15,82 | 8,84 | 800254,41 | 86,75 | 2,66 | 4,26 |
| 6,39 | 578208,24 | 542,96 | 3,48 | 5,56 | 8,35 | 755845,18 | 92,86 | 3,64 | 5,81 |
| 6,63 | 600412,86 | 349,83 | 5,61 | 8,96 | 7,86 | 711435,94 | 115,32 | 4,75 | 7,59 |
| 6,88 | 622617,47 | 229,14 | 5,86 | 9,36 | 7,37 | 667026,71 | 152,29 | 5,10 | 8,15 |
| 7,37 | 667026,71 | 184,35 | 6,37 | 10,18 | 6,88 | 622617,47 | 191,61 | 5,44 | 8,69 |
| 7,86 | 711435,94 | 143,02 | 4,78 | 7,63 | 6,63 | 600412,86 | 302,91 | 6,39 | 10,21 |
| 8,35 | 755845,18 | 111,24 | 8,17 | 13,04 | 6,39 | 578208,24 | 372,37 | 4,39 | 7,01 |
| 8,84 | 800254,41 | 91,84 | 2,67 | 4,26 | 6,14 | 556003,62 | 658,72 | 7,37 | 11,78 |
| 9,33 | 844663,65 | 84,71 | 2,66 | 4,26 | 5,90 | 533799,00 | 921,81 | 7,18 | 11,47 |

Příloha 7: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PH při tloušťce inkoustu 20 μm .

| PH, 20 μm – Zatěžování | | | | | PH, 20 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 3,20 | 289548,21 | 2539,20 | 9,85 | 15,73 | 7,37 | 667026,71 | 273,27 | 2,76 | 4,41 |
| 3,44 | 311752,83 | 1358,49 | 9,21 | 14,71 | 6,88 | 622617,47 | 275,38 | 3,77 | 6,02 |
| 3,69 | 333957,45 | 952,91 | 5,94 | 9,48 | 6,39 | 578208,24 | 282,78 | 2,34 | 3,74 |
| 3,93 | 356162,06 | 576,42 | 4,29 | 6,85 | 5,90 | 533799,00 | 301,85 | 4,58 | 7,31 |
| 4,42 | 400571,30 | 516,36 | 6,66 | 10,64 | 5,41 | 489389,77 | 335,93 | 8,53 | 13,62 |
| 4,91 | 444980,53 | 448,23 | 4,45 | 7,12 | 4,91 | 444980,53 | 351,97 | 5,30 | 8,47 |
| 5,41 | 489389,77 | 426,45 | 4,44 | 7,09 | 4,42 | 400571,30 | 453,70 | 6,58 | 10,51 |
| 5,90 | 533799,00 | 380,99 | 5,64 | 9,01 | 3,93 | 356162,06 | 494,29 | 8,59 | 13,72 |
| 6,39 | 578208,24 | 296,55 | 5,03 | 8,04 | 3,69 | 333957,45 | 573,14 | 19,99 | 31,93 |
| 6,88 | 622617,47 | 277,49 | 3,31 | 8,04 | 3,44 | 311752,83 | 890,88 | 4,23 | 6,76 |
| 7,37 | 667026,71 | 273,27 | 2,76 | 4,41 | 3,20 | 289548,21 | 2072,94 | 9,46 | 15,11 |

Příloha 8: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PH při tloušťce inkoustu 50 μm .

| PH, 50 μm – Zatěžování | | | | | PH, 50 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 4,91 | 444980,53 | 1904,77 | 8,30 | 13,26 | 8,59 | 778049,80 | 116,34 | 3,20 | 5,12 |
| 5,16 | 467185,15 | 1318,63 | 6,34 | 10,13 | 8,10 | 733640,56 | 116,34 | 3,20 | 5,12 |
| 5,41 | 489389,77 | 1075,44 | 9,94 | 15,88 | 7,61 | 689231,33 | 126,58 | 2,27 | 3,63 |
| 5,65 | 511594,39 | 676,93 | 9,23 | 14,75 | 7,12 | 644822,09 | 159,50 | 1,62 | 2,58 |
| 5,90 | 533799,00 | 502,01 | 9,95 | 15,89 | 6,63 | 600412,86 | 193,69 | 5,14 | 8,21 |
| 6,14 | 556003,62 | 332,72 | 5,60 | 8,94 | 6,14 | 556003,62 | 223,91 | 4,27 | 6,81 |
| 6,63 | 600412,86 | 246,96 | 6,32 | 10,10 | 5,90 | 533799,00 | 357,33 | 5,81 | 9,28 |
| 7,12 | 644822,09 | 197,85 | 6,26 | 10,00 | 5,65 | 511594,39 | 510,83 | 5,13 | 8,19 |
| 7,61 | 689231,33 | 155,38 | 3,68 | 5,88 | 5,41 | 489389,77 | 733,08 | 9,05 | 14,46 |
| 8,10 | 733640,56 | 125,56 | 4,18 | 5,88 | 5,16 | 467185,15 | 1140,83 | 6,95 | 11,10 |
| 8,59 | 778049,80 | 116,34 | 3,20 | 5,12 | 4,91 | 444980,53 | 1637,41 | 12,93 | 20,65 |

Příloha 9: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě PH při tloušťce inkoustu 80 μm .

| PH, 80 μm – Zatěžování | | | | | PH, 80 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 6,14 | 556003,62 | 1217,06 | 6,23 | 9,95 | 9,33 | 844663,65 | 74,55 | 2,66 | 4,25 |
| 6,39 | 578208,24 | 560,78 | 5,18 | 8,27 | 8,84 | 800254,41 | 75,57 | 2,25 | 3,59 |
| 6,63 | 600412,86 | 299,73 | 4,33 | 6,92 | 8,35 | 755845,18 | 80,65 | 3,18 | 5,08 |
| 6,88 | 622617,47 | 229,14 | 4,86 | 7,76 | 7,86 | 711435,94 | 91,84 | 4,16 | 6,64 |
| 7,12 | 644822,09 | 166,74 | 6,23 | 9,95 | 7,37 | 667026,71 | 109,18 | 4,85 | 7,75 |
| 7,37 | 667026,71 | 139,94 | 4,93 | 7,88 | 7,12 | 644822,09 | 124,54 | 7,73 | 12,35 |
| 7,86 | 711435,94 | 107,14 | 4,74 | 7,57 | 6,88 | 622617,47 | 150,23 | 5,86 | 9,36 |
| 8,35 | 755845,18 | 90,82 | 3,19 | 5,09 | 6,63 | 600412,86 | 184,34 | 6,25 | 9,98 |
| 8,84 | 800254,41 | 78,61 | 2,85 | 4,54 | 6,39 | 578208,24 | 383,14 | 6,03 | 9,64 |
| 9,33 | 844663,65 | 74,55 | 2,66 | 4,54 | 6,14 | 556003,62 | 790,99 | 6,10 | 9,74 |

Příloha 10: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LH při tloušťce inkoustu 20 μm .

| LH, 20 μm – Zatěžování | | | | | LH, 20 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 3,44 | 311752,83 | 2065,66 | 10,97 | 17,52 | 7,61 | 689231,33 | 216,59 | 1,79 | 2,86 |
| 3,69 | 333957,45 | 852,03 | 29,34 | 46,86 | 7,12 | 644822,09 | 222,86 | 1,79 | 2,86 |
| 4,18 | 378366,68 | 719,27 | 6,43 | 10,28 | 6,63 | 600412,86 | 242,76 | 3,75 | 5,98 |
| 4,42 | 400571,3 | 576,42 | 5,54 | 8,84 | 6,14 | 556003,62 | 275,39 | 6,97 | 11,13 |
| 4,67 | 422775,92 | 461,36 | 7,43 | 11,86 | 5,65 | 511594,39 | 305,04 | 6,39 | 10,20 |
| 5,16 | 467185,15 | 440,60 | 6,20 | 9,90 | 5,16 | 467185,15 | 375,62 | 10,01 | 15,98 |
| 5,65 | 511594,39 | 382,07 | 7,40 | 11,81 | 4,67 | 422775,92 | 405,83 | 2,40 | 3,83 |
| 6,14 | 556003,62 | 296,55 | 5,03 | 8,04 | 4,42 | 400571,30 | 451,51 | 5,73 | 9,14 |
| 6,63 | 600412,86 | 262,73 | 4,89 | 7,81 | 4,18 | 378366,68 | 517,47 | 7,97 | 12,73 |
| 7,12 | 644822,09 | 232,28 | 3,74 | 7,81 | 3,69 | 333957,45 | 704,40 | 16,39 | 26,18 |
| 7,61 | 689231,33 | 216,59 | 1,79 | 2,86 | 3,44 | 311752,83 | 1717,86 | 11,95 | 19,09 |

Příloha 11: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LH při tloušťce inkoustu 50 μm .

| LH, 50 μm – Zatěžování | | | | | LH, 50 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 4,91 | 444980,53 | 1841,35 | 12,80 | 20,44 | 8,84 | 800254,41 | 113,27 | 1,75 | 2,80 |
| 5,16 | 467185,15 | 1215,82 | 13,47 | 21,51 | 8,35 | 755845,18 | 115,32 | 1,43 | 2,29 |
| 5,41 | 489389,77 | 758,55 | 20,64 | 32,97 | 7,86 | 711435,94 | 120,43 | 2,68 | 4,29 |
| 5,65 | 511594,39 | 575,33 | 13,42 | 21,43 | 7,37 | 667026,71 | 132,74 | 4,60 | 7,35 |
| 5,90 | 533799,00 | 298,71 | 16,13 | 25,76 | 6,88 | 622617,47 | 144,05 | 3,67 | 5,87 |
| 6,39 | 578208,24 | 166,74 | 4,80 | 7,67 | 6,39 | 578208,24 | 156,41 | 4,21 | 6,72 |
| 6,88 | 622617,47 | 150,23 | 4,89 | 7,81 | 5,90 | 533799,00 | 208,27 | 9,34 | 14,92 |
| 7,37 | 667026,71 | 139,94 | 4,88 | 7,80 | 5,65 | 511594,39 | 414,50 | 6,17 | 9,85 |
| 7,86 | 711435,94 | 129,66 | 4,87 | 7,78 | 5,41 | 489389,77 | 507,54 | 11,62 | 18,56 |
| 8,35 | 755845,18 | 118,39 | 1,76 | 7,78 | 5,16 | 467185,15 | 710,12 | 15,34 | 24,50 |
| 8,84 | 800254,41 | 113,27 | 1,75 | 2,80 | 4,91 | 444980,53 | 1462,66 | 12,81 | 20,46 |

Příloha 12: Průměrné hodnoty naměřené na elektrodě LH při tloušťce inkoustu 80 μm .

| LH, 80 μm – Zatěžování | | | | | LH, 80 μm – Odlehčování | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. | Síla [N] | Tlak [Pa] | R_{ink} [Ω] | u_a [Ω] | výběr směr odchyl. |
| 6,14 | 556003,62 | 1225,89 | 11,38 | 18,17 | 9,33 | 844663,65 | 69,48 | 2,66 | 4,24 |
| 6,39 | 578208,24 | 851,89 | 10,74 | 17,16 | 8,84 | 800254,41 | 71,51 | 2,66 | 4,24 |
| 6,63 | 600412,86 | 601,10 | 8,83 | 14,11 | 8,35 | 755845,18 | 84,71 | 2,66 | 4,26 |
| 6,88 | 622617,47 | 270,12 | 7,60 | 12,15 | 7,86 | 711435,94 | 106,12 | 3,20 | 5,11 |
| 7,12 | 644822,09 | 200,98 | 9,67 | 15,45 | 7,37 | 667026,71 | 124,54 | 5,83 | 9,31 |
| 7,37 | 667026,71 | 147,14 | 4,26 | 6,81 | 7,12 | 644822,09 | 146,11 | 6,20 | 9,90 |
| 7,86 | 711435,94 | 120,44 | 6,17 | 9,85 | 6,88 | 622617,47 | 217,65 | 8,20 | 13,10 |
| 8,35 | 755845,18 | 95,91 | 3,91 | 6,24 | 6,63 | 600412,86 | 315,66 | 4,94 | 7,89 |
| 8,84 | 800254,41 | 81,67 | 4,72 | 7,54 | 6,39 | 578208,24 | 607,86 | 12,10 | 19,32 |
| 9,33 | 844663,65 | 69,48 | 2,66 | 7,54 | 6,14 | 556003,62 | 912,30 | 14,51 | 23,18 |

Příloha 13: Hodnoty odporu naměřené na elektrodě PD při stejném zatížení po dobu 20 min.

| Čas [min] | Hmotnost [kg] | Síla [N] | Tlak [Pa] | U_n [V] | U_{R3} [V] | R_{ink} [Ω] |
|-----------|---------------|----------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------|
| 0 | 0,8 | 7,85 | 710547,8 | 2 | 1,96 | 204,08 |
| 5 | 0,8 | 7,85 | 710547,8 | 2 | 1,962 | 193,68 |
| 10 | 0,8 | 7,85 | 710547,8 | 2 | 1,964 | 183,30 |
| 15 | 0,8 | 7,85 | 710547,8 | 2 | 1,965 | 178,12 |
| 20 | 0,8 | 7,85 | 710547,8 | 2 | 1,965 | 178,12 |