

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Textilní tlakové senzory**

**Bc. Jakub Zdeněk**

**2020**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub ZDENĚK**  
Osobní číslo: **E18N0022P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Téma práce: **Textilní tlakové senzory**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování

1. Popište problematiku smart textilií a aplikaci tlakových senzorů v textiliích.
2. Proveďte rešerši textilních tlakových senzorů a kriticky je zhodnoťte.
3. Navrhněte a realizujte textilní tlakový senzor.
4. Proveďte jeho měření a testování včetně jeho odolnosti vůči pracovním cyklům.
5. Kriticky zhodnoťte navržený textilní tlakový senzor a navrhněte jeho aplikaci v praxi.



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

1. Mattila, H., R., Intelligent Textiles and clothing, CRC Press, 2006. ISBN-13: 978-0849390999
2. Schneegass, S., AmftSmart, O., Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction, Springer, 2017, ISBN 978-3-319-50123-9
3. K. Cherenack, L. Van Pieteron, Smart textiles: Challenges and opportunities, J. Appl. Phys. 112 (2012).  
vdoi:10.1063/1.4742728.

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

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

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



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

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá textilními tlakovými senzory. V první části jsou teoreticky popsány základní teoretické aplikace a rozdělení textilních tlakových senzorů. Druhá část této práce se zabývá reálnými aplikacemi, návrhy a prototypy textilních tlakových senzorů. Dále v praktické části jsou navrženy kapacitní tlakové senzory, které jsou vytvořeny a fyzicky otestovány. Následně se práce zabývá mechanickým zatěžováním, pracími sériemi a hodnocením vytvořených kapacitních textilních tlakových senzorů. Závěr této práce se zabývá kritickým zhodnocením realizovaných textilních senzorů a je možností jejich integrace.

## **Klíčová slova**

Textilní tlakové senzory, kapacitní senzory, smart textilie, netkaná pokovená textilie, vodivé textilie, 3D distanční pletenina, termoplastická mřížka

**Abstract**

The presented diploma thesis deals with textile pressure sensors. The first part theoretically describes the basic theoretical applications and classification of textile pressure sensors. The second part of this work deals with real applications, designs and prototypes of textile pressure sensors. Furthermore, in the practical part, capacitive pressure sensors are designed, which are created and physically tested. Subsequently, the work deals with mechanical loading, washing series and evaluation of the created capacitive textile pressure sensors. The conclusion of this work deals with a critical evaluation of implemented textile sensors and is the possibility of their integration.

**Key words**

Textile pressure sensors, capacitive sensors, smart fabrics, non-woven metallized fabrics, conductive fabrics, 3D distance knitted fabric, thermoplastic grid

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 18.6.2020

Jakub Zdeněk

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Soukupovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, nápady, odborný výklad a metodické vedení práce. Poděkování bych ráda také věnovala Ing. Stanislavu Suchému za výpomoc v laboratoři. V neposlední řadě bych ráda poděkovala mé rodině za podporu při studiu.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 APLIKACE TLAKOVÝCH SENZORŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 CHYTRÉ TEXTILIE .....	12
1.2 POUŽITÍ A VYUŽITÍ .....	13
1.3 E-DEFINICE .....	14
1.4 STUPNĚ INTEGRACE CHYTRÝCH TECHNOLOGIÍ .....	15
1.5 KAPACITNÍ SENZORY .....	15
1.6 TENZOMETRICKÉ SENZORY .....	17
1.7 PIEZOELEKTRICKÉ SENZORY .....	17
1.8 SENZORY S OPTICKÝM SENZOREM .....	18
1.8.1 Zastínění fotodiody clonou .....	18
1.8.2 Využití vlastností optického vlákna .....	19
1.9 MAGNETOELASTICKÉ A MAGNETOANIZOTROPNÍ SENZORY .....	19
1.10 SENZORY S POVRCHOVĚ AKUSTICKOU VLNOU .....	19
1.11 KONSTRUKCE A APLIKACE KAPACITNÍCH SENZORŮ .....	20
APLIKACE VYUŽÍVAJÍCÍ 3D POTIŠTĚNÉ MIKROKANÁLKOVÉ FORMY S TEKUTÝM KOVEM ...	20
TEXTILNÍ KAPACITNÍ SENZOR .....	21
<b>2 TEXTILNÍ TLAKOVÉ SENZORY</b> .....	<b>22</b>
2.1 SENSING TEXTILE SEAM-LINE FOR WEARABLE MULTIMODAL PHYSIOLOGICAL MONITORING .....	22
2.2 TEXTILE-BASED WEARABLE SENSORS USING METAL-NANOWIRE EMBEDDED CONDUCTIVE FIBERS .....	23
2.3 TEXTILE BASED FERROELECTRET FOR FOOT PRESSURE SENSOR .....	25
2.4 A LINEAR WIDE-RANGE TEXTILE PRESSURE SENSOR INTEGRALLY EMBEDDED IN REGULAR FABRIC .....	27
<b>3 NÁVRH A REALIZACE TEXTILNÍCH TLAKOVÝCH SENZORŮ</b> .....	<b>29</b>
3.1 PRVNÍ NÁVRH SENZORU .....	29
3.2 DRUHÝ NÁVRH SENZORU .....	29
3.3 TŘETÍ NÁVRH SENZORU .....	30



3.4	POSTUP VÝROBY .....	31
<b>4</b>	<b>MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ KVALITY SENZORŮ, TESTOVÁNÍ ODOLNOSTI VŮČI PRACÍM CYKLŮM. ....</b>	<b>37</b>
4.1	NETKANÁ POKOVENÁ TEXTILIE.....	39
4.1.1	<i>Netkaná pokovená textilie Meftex 10 – TYP 1</i> .....	40
4.1.2	<i>Netkaná pokovená textilie Meftex 30 – TYP 2</i> .....	42
4.2	MĚŘENÍ VODIVÝCH TEXTILNÍCH MATERIÁLŮ – VODIVÉ STUHY .....	45
4.3	ŠLICHTOVANÉ TLAKOVÉ SENZORY – TYP 3.....	48
4.4	OŠLICHTOVANÉ TLAKOVÉ SENZORY – TYP 4 .....	49
4.5	NAVRŽENÝ SENZOR – TYP 5 .....	52
4.6	NAVRŽENÝ SENZOR – TYP 6 .....	53
4.7	EXPERIMENTY.....	55
4.8	SENZORY PO PRACÍCH SÉRIÍCH .....	57
4.8.1	<i>Vodivé stuhly</i> .....	57
4.8.2	<i>Ošlichtované tlakové senzory – TYP 4</i> .....	60
4.8.3	<i>Navržený senzor – TYP 5</i> .....	62
4.8.4	<i>Navržený senzor – TYP 6</i> .....	63
4.9	MĚŘENÍ ODOLNOSTI VŮČI STLAČENÍ 3D PLETENINY .....	66
<b>5</b>	<b>KRITICKY ZHODNOŤTE NAVRŽENÝ TEXTILNÍ TLAKOVÝ SENZOR A NAVRHNĚTE JEHO APLIKACI V PRAXI. ....</b>	<b>68</b>
5.1	NEDOSTATKY.....	68
5.2	VÝHODY: .....	69
5.3	VHODNÉ APLIKACE: .....	70
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>79</b>

## Úvod

Integrace elektronických prvků do textilií zažívá v posledních letech velký rozmach. Textilie zasahují do široké škály oborů lidské činnosti. S rozvojem smart (česky chytrých) technologií a nositelných technologií stoupá snaha integrovat do nich co nejvíce elektroniky a to tak, aby si i přesto nejvíce zachovaly své základní vlastnosti.

Syntézou elektroniky a textilií vznikají elektronické textilie (e-textilie), které jsou v posledních letech na vzestupu. Mnoho institucí a společností se zabývá dalším vývojem těchto technologií, aby se mohly stát každodenní součástí našeho života. Vznikají textilní systémy schopné snímat okolní prostředí nebo životní funkce lidí. Existují světelné systémy pro zvýšení bezpečnosti či textilní systémy pro vyhřívání. Elektronické textilní systémy jsou dokonce vytvářeny i pro oblast módního designu, sportu případně pro simulaci počítačových her.

Předkládaná práce je zaměřena na textilní tlakové senzory, jejich výrobu a odolnost vůči pracím cyklům. Práce je rozdělena do teoretické a praktické části. Teoretická část se zabývá problematikou chytrých textilií, jejich rozdělením a možnostmi jejich využití, čímž se zabývá první kapitola práce. Druhá kapitola se zaměřuje na ovládací prvky a jejich integraci do textilií se zaměřením především na třetí stupeň integrace. Praktická část diplomové práce se zaměřuje na návrh, realizaci a optimalizaci funkčního tlakového senzoru. Čtvrtá kapitola zkoumá navržené senzory, které byly podrobeny zátěžovým zkouškám a pracím cyklům. V páté kapitole jsou shrnuty a zhodnoceny výsledky, výhody a nevýhody všech provedených experimentů a měřených senzorů.

## Seznam symbolů a zkratek

%	Procenta	
°C	Stupeň celsia	
C	Kapacita	[F]
Cu	Měď	
d	Tloušťka	[m]
F	Jednotka elektrické kapacity	
FEP	Fluorinated ethylene propylene	
Hz	Jednotka frekvence	
IoT	Internet of Things (Internet věcí)	
kg	Kilogram	
l	Délka	
ml	Mililitr	
mm	Milimetr	
OE	Rotorové spřádání	
Ot/min	Počet otáček za minutu	
Pa	Jadnotka tlaku	[N/m <sup>2</sup> ]
PEN	Polyethylenafthalát	
PESh	Polyester hedvábí	
PET	Polyethylentereftalát	
PZT	Olovo-zirkonát-titanát	
R	Elektrický odpor	[Ω]
S	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
T	Jemnost	[tex]
TN	Netkaná textilie	
E	Permitivita	[F/m]
Ωcm	Měrný elektrický odpor	
Ω/□	Odpor na čtverec	
ρ	Objemová hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]

# 1 Aplikace tlakových senzorů

Senzory zatížení se staly součástí našeho každodenního života. Využívají se jak v domácnostech (vážení osob, potravin atd.), tak v různých pracovních procesech (obchody, přeprava zásilek, sběrné suroviny). V této kapitole jsou popsány základní principy, které tyto senzory využívají. Zmíněny jsou tyto typy senzorů:

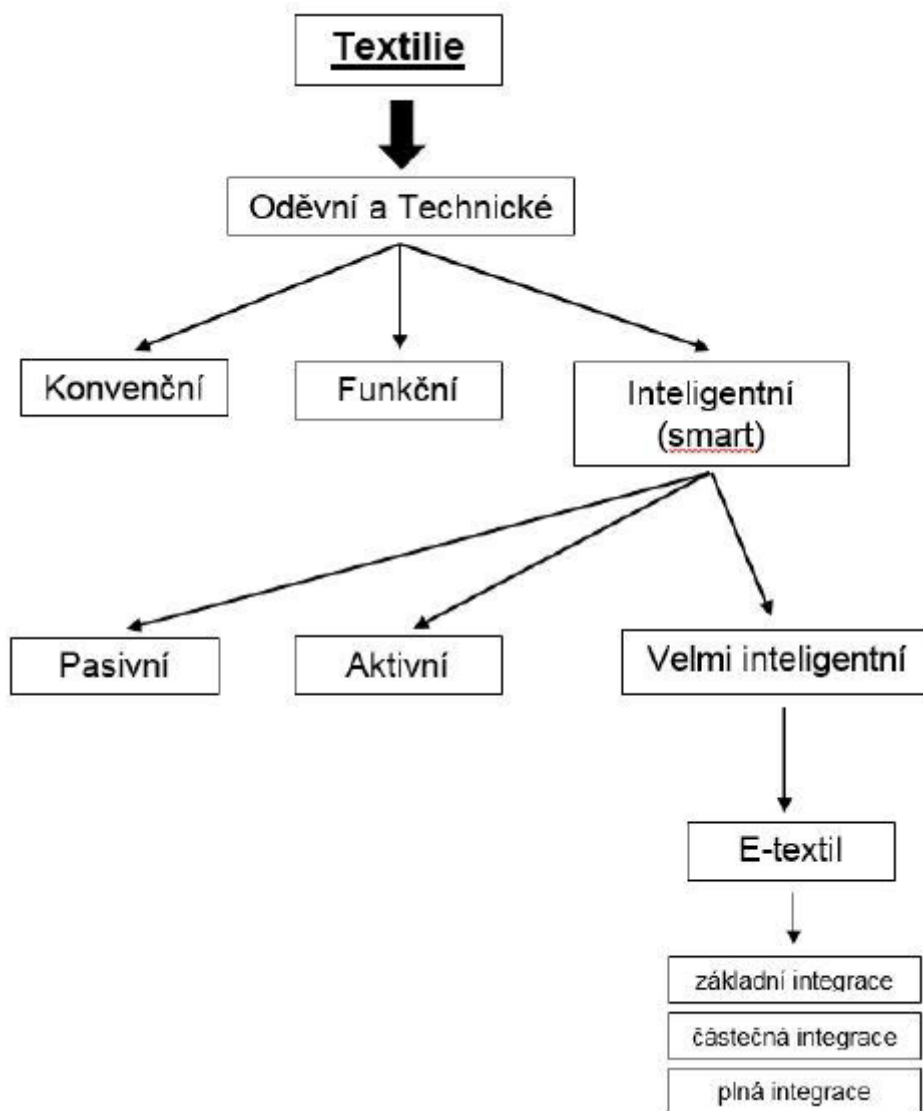
- Kapacitní senzory
- Tenzometrické senzory
- Piezoelektrické senzory
- Senzory s použitím optiky
- Magnetoelastické a magnetoanizotropní senzory
- Rezonanční senzory s povrchově akustickou vlnou

## 1.1 Chytré textilie

V posledních letech se ve velkém integrují elektronické prvky do textilií. S rozvojem chytrých technologií a nositelných technologií je snahou integrovat elektroniku tak, aby se co nejvíce zachovaly základní vlastnosti integrované elektroniky jako takové. Spojením textilií a elektroniky vznikají textilie, které jsou v posledních letech na vzestupu. Vývojem těchto technologií se zabývá mnoho společností a institucí. Jejich snahou je, aby se chytré textilie mohly stát každodenní součástí života každého člověka. Chytré textilie jsou schopny snímat okolní prostředí a lidské životní funkce lidí. Pomáhají tedy zvyšovat bezpečnost. Dokonce existují i textilie se systémem vyhřívání. Tato oblast technologií se již využívá také v oblasti módního designu a ve sportovní oblasti. [1] [2]

Smart textilie neboli česky chytré textilie. Tímto lze nazývat všechny textilní produkty a aplikace, které rozšiřují užitečnost a funkčnost všech konvenčních tkanin. Ty jsou zhotoveny tak, aby ulehčovali a zpříjemňovali život lidem, především na základě schopnosti reagovat předem stanoveným způsobem na vnější podněty (mechanické, chemické, elektrické apod.). Může se jednat například o vylepšení termoregulace, odvod vlhkosti, ale také o snímání EKG, dýchání či tělesné teploty. Díky tomu v sobě chytré textilie spojují množství vědních oborů, jako je fyzika, chemie, farmacie, informatika nebo elektrotechnika. Pro vznik komplexního řešení je nutná vyváženost těchto oborů. [1] [2]

Tato práce se především zabývá integrací elektronických senzorů do textilií. Tímto spojením vzniká široká škála použití. V poslední době díky rychlému vývoji elektroniky a internetu věcí (IoT) vznikají velmi zajímavé aplikace. Tyto aplikace mohou být nápomocny například při výkonu povolání, mohou hlídat životní funkce či zlepšovat lidem sociální blahobyt. [1]



Obr. 1.1: Diagram integrace chytrých textilií.

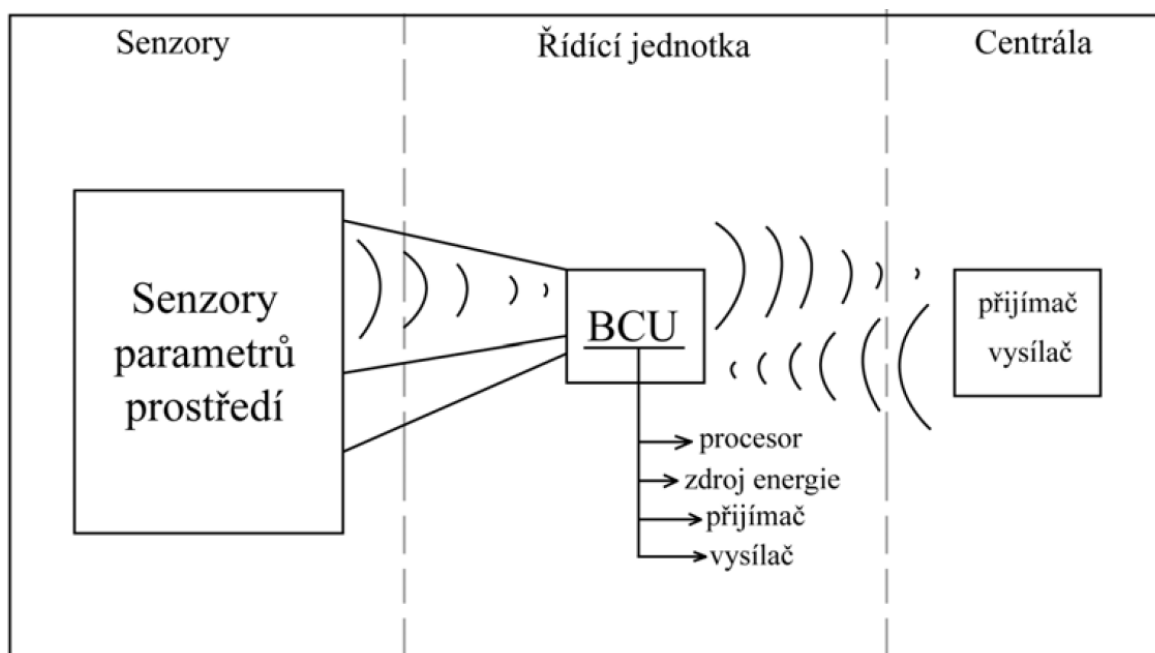
## 1.2 Použití a využití

Chytré textilie nabízí širokou a rozmanitou oblast aplikací. Rozvíjí se v oblasti lékařství, bezpečnosti, sportovního oblečení. Další možnosti aplikací jsou i v obyčejném oblečení, které lidé každodenně nosí. Uplatnění chytré textilie není omezeno pouze na nositelné oblečení, ale je již rozšířeno do mnoha dalších oborů různých lidských činností.

Lze se s nimi setkat mimo jiné v automobilech, robotice, letadlech či stavebnictví. Tato oblast technologií nabízí opravdu pestrou škálu použití.

### 1.3 E-definice

E-textilie se díky mikro a nano elektronice stávají inteligentní. Elektronika je adaptována přímo do struktury textilie. Tato elektronika je velmi malých rozměrů, reaguje na vnější vlivy a adaptuje se. Celý tento systém je vytvořen a navrhnut tak, aby bylo vhodné ho nosit bez výrazných pohybových omezení. Tyto textilie se skládají z několika systémů a částí, které tvoří celkový funkční systém.



Obr. 1.2: Schéma funkčnosti e-technologie [2].

- **Senzory** – teploty, vlhkosti, různých plynů, tělesných funkcí
- **Akční členy** – zpracovávají informace ze senzorů
- **Vodivé cesty** – například vodivé příze nebo sítotisk
- **Řídicí jednotka** – obsahuje přijímač, vysílač, procesor, může být součástí i baterie

Využití e-textilií nachází velké uplatnění v lékařství, jako diagnostické monitorovací zařízení. U záchranných složek je vhodné využití E-textilie v podobě různých senzorů, které detekují nebezpečné plyny, teplotu či vlhkost přímo v místě nebezpečí. [2]

## 1.4 Stupně integrace chytrých technologií

Samotnou integraci elektroniky lze realizovat v několika stupních.

**První stupeň** – tento stupeň zajišťuje výrobu textilu. Jedná se o základní integraci.

Jednotlivé komponenty (například DPS) jsou přichyceny a propojeny pomocí drátků přímo na textil.

**Druhý stupeň** – elektronické součástky jsou umístěny na textil. Jedná se o částečnou integraci. Je to způsob vytváření vodivých struktur a cest pomocí vodivých nití, které jsou vytvořeny pro vhodné připojení a aplikaci elektro-součástek (senzory, mikroprocesory atd.).

**Třetí stupeň** – elektronika je již plně integrována do textilu. Jedná se o plnou integraci. [2, 3, 4]

## 1.5 Kapacitní senzory

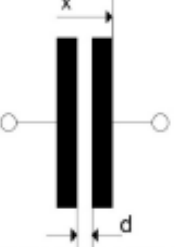
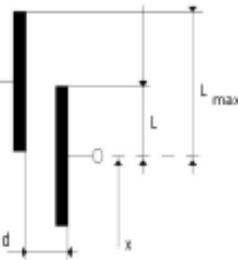
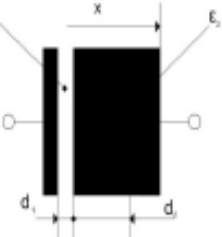
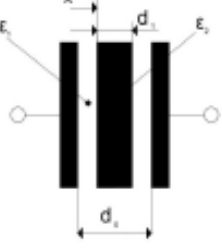
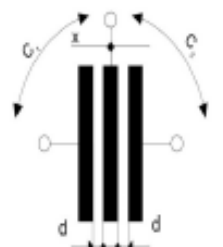
Kapacitní senzory pracují na principu vyvolání změny kapacity. Tato změna nastane v okamžiku změny geometrických vlastností. Může se jednat o změnu plochy  $S$ , změnu vzdálenosti elektrod  $l$  nebo změnu permitivity  $\varepsilon$ . Na Obr. 1.3 jsou uvedeny základní typy kapacitních snímačů, principy fungování a jejich vztahy pro výpočet kapacity. [4]

Systém na Obr. 1.4 se skládá z pasivního pole kapacitorů. Podle vyvinutého zatížení na povrch senzoru se mění kapacita každého kapacitoru. Velikost kapacity je určena mezi dvěma vodivými pruhy, které jsou odděleny dielektrickým a elastickým materiálem. Mezi danými deformovanými řádky a sloupci matice je měřena kapacita. Při stlačení vrstvy se mezi elektrodami zvýší výsledná kapacita. [4]

Základem celého systému je tvorba senzoru, který bude poskytovat data, jež budou dále zpracovávána. Je tedy patrné, že se jedná o kapacitní změny v protínajících se vodivých vláknech. [4]

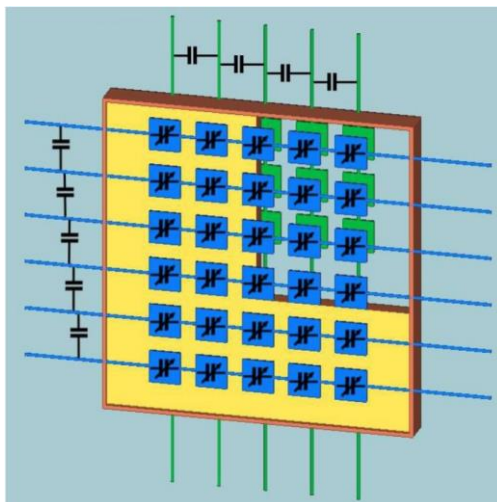
Schéma na Obr. 1.4 obsahuje i parazitní kapacity, které ovlivňují měření. Proto je nutno s nimi počítat a kompenzovat je. Princip funkce je velice jednoduchý. Vychází ze základního vzorce pro výpočet kapacity, kde permitivita  $\varepsilon$  a plochu desek  $S$  bereme jako konstantu. Proto změna kapacity je dána změnou vzdálenosti  $d$  vodivých drátů nebo tlakem (silou) působící na desku. [4]

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \tag{1}$$

Typ	Schéma	Vztah
deskový jednoduchý s proměnnou mezerou		$C = \epsilon \frac{S}{d(x)}$
deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika		$C = \epsilon \frac{S(x)}{d}$
deskový s vrstvou dielektrika s proměnnou mezerou		$C = \frac{\epsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \epsilon_1}{\epsilon_2}}$
deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika		$C = \frac{\epsilon_1 S}{d_0 - d_1(x) \left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right)}$
deskový diferenční s proměnnou mezerou		$C_1 = \epsilon \frac{S}{d(x)}$ $C_2 = \epsilon \frac{S}{d(x)}$

Obr. 1.3: Základní typy kapacitního senzoru [5].

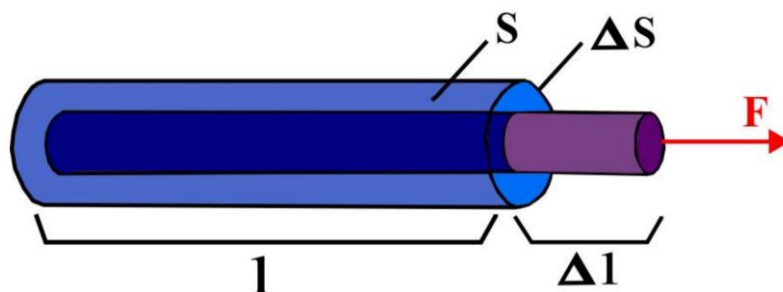




Obr. 1.4: Maticová struktura [4].

## 1.6 Tenzometrické senzory

Tyto senzory pracují na principu změny odporu v závislosti na deformaci daného tělesa. Definice výpočtu je dána Hookeovým zákonem. Na Obr. 1.5 je zobrazen fyzicky namáhaný drát, který mění své fyzikální rozměry působením sil na něj. Tím mění svůj měrný odpor  $R$ . Z rovnice (2) je patrné, že změnou svého obsahu  $S$  nebo délky  $l$  se mění odpor  $R$  kabelu. [6]



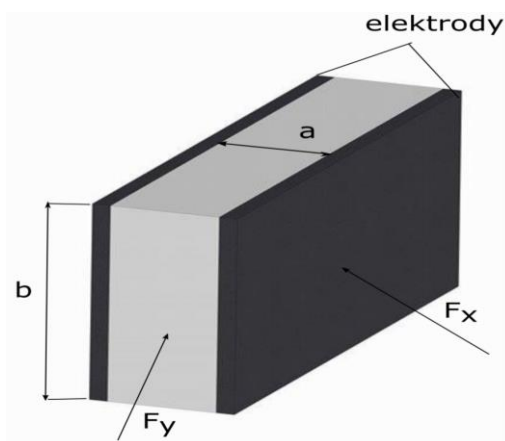
Obr. 1.5: Popis principu tenzometrického prvku [6].

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

## 1.7 Piezoelektrické senzory

Piezoelektrické senzory jsou založeny na principu piezoelektrického jevu. Tento jev vzniká u středově nesouměrných krystalů. Princip funkčnosti těchto krystalů je závislý na uspořádání kladných a záporných iontů obsažených v krystalové mřížce. Ionty musí být

upraveny tak, aby byly rozděleny na jednu stranu kladné a na druhou záporné. Při fyzické námaze materiálu změni částice svoji polohu a vznikne náboj. U piezoelektrických senzorů se musí brát v úvahu míra mechanického namáhání. Je-li namáhání v kolmém směru, tak se tento jev nazývá podélný, při rovnoběžném působení je to jev příčný. Podélný jev je nezávislý na rozměrech a náboji  $Q$ . [7]



Obr. 1.6: Piezoelektrický senzor [7].

## 1.8 Senzory s optickým senzorem

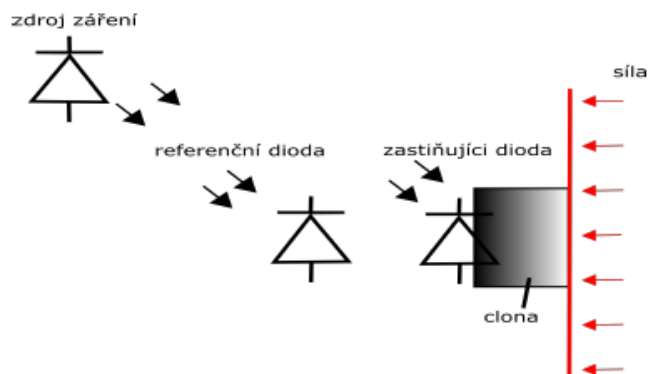
Tyto senzory pracují na principu utlumení přenosu světla. Jsou zde popsány dva principy těchto senzorů (viz Obr. 1.7. a

Obr. 1.8)

### 1.8.1 Zastínění fotodiody clonou

Světlo se šíří ke dvěma fotodiódám, které vytvářejí napětí. Pokud síla působí na clonu, ta se posouvá a zastiňuje fotodiodu, tím klesá napětí, které dioda vyprodukuje. Vhodnou elektronikou se docílí snadného vyhodnocení a potlačení nelinearit a kolísání světla. [8]

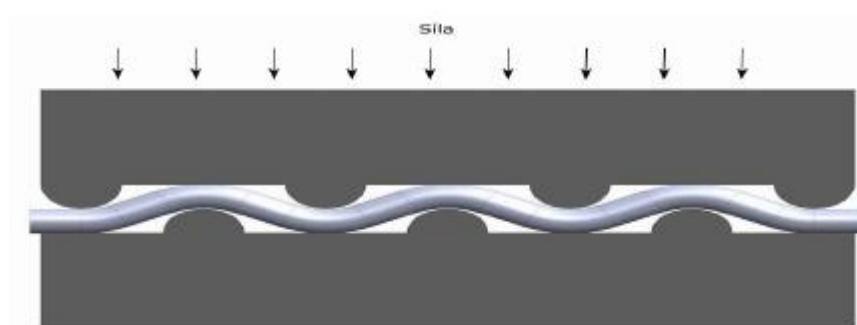
Principem tohoto senzoru je přivedení světla na dvě fotodiody, které vytváří napětí. Jedna fotodioda bude zastiňována clonou, na kterou působí síla. Pokud je dioda zastiňována, klesá na ni napětí a rozdíl napětí na diodách vyhodnotí systém k určení působící síly. [8]



Obr. 1.7: Funkce optického senzoru [8].

### 1.8.2 Využití vlastností optického vlákna

Působením mechanickou námahou na optické vlákno se mění jeho vlastnosti. Deformací optického vlákna dochází k ohybům, čímž vzniká větší odraz a útlum procházejícího světla. Tyto senzory nachází uplatnění v oblastech, kde nesmí být kovové prvky nebo místa s vyšší teplotou okolí. [8]



Obr. 1.8: Působení sil na vlákno [8].

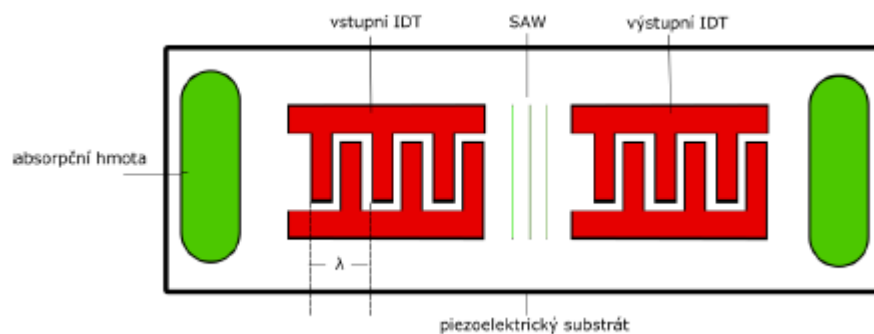
### 1.9 Magnetoelastické a magnetoanizotropní senzory

Tyto senzory mají společnou vlastnost s tenzometry. Jejich vlastnosti jsou nejlépe využívány při mechanickém napětí. Změnou mechanického napětí se mění permeabilita materiálu. Na výrobu těchto senzorů jsou vhodné materiály s malou indukcí nasycení, velkou permeabilitou a činiteli magnetostrikce. Nejčastější materiál pro výrobu těchto typů senzorů jsou kovová skla, která mají větší citlivost a stálejší parametry. [9]

### 1.10 Senzory s povrchově akustickou vlnou

Senzory s povrchově akustickou vlnou jsou složeny z digitálních měničů, které jsou naneseny na piezoelektrický substrát. Akustická vlna je konvergována těmito měniči (vyvolávají a přijímají povrchové vlny). Nepřímý piezoelektrický jev je generován

deformací na vstupní straně, čímž je vyvolána akustická vlna. Jakmile k přijímací straně vlna dorazí, je opět konvergována na elektrický signál (přímý piezoelektrický jev). Při vhodném zapojení zesilovače se zpětnou vazbou dojde k vytvoření generátoru harmonického napětí. [10]

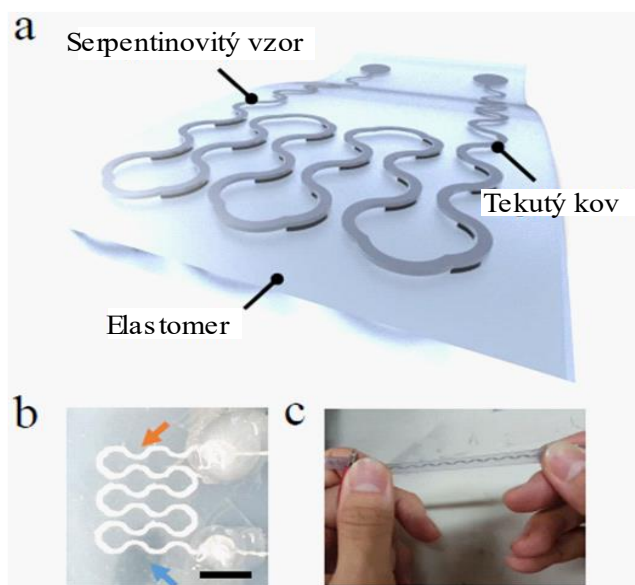


Obr. 1.9: Schéma piezoakustického prvku [10].

### 1.11 Konstrukce a aplikace kapacitních senzorů

#### Aplikace využívající 3D potištěné mikrokanálové formy s tekutým kovem

V tomto výzkumu se představuje měkký na napětí necitlivý, tlakový senzor s využitím 3D-tištěné mikrokanálové formy a tekutý kov pro aplikace sledování zdravotního stavu. Tlakový senzor se skládá z elastomeru a tekutého kovu, který má flexibilní vlastnosti. Serpentinovitý vzor mikrokanálu umožňuje senzoru být necitlivý na napětí a zároveň udržovat stálou přesnou odezvu signálu v aplikaci nositelných textilií. [11]



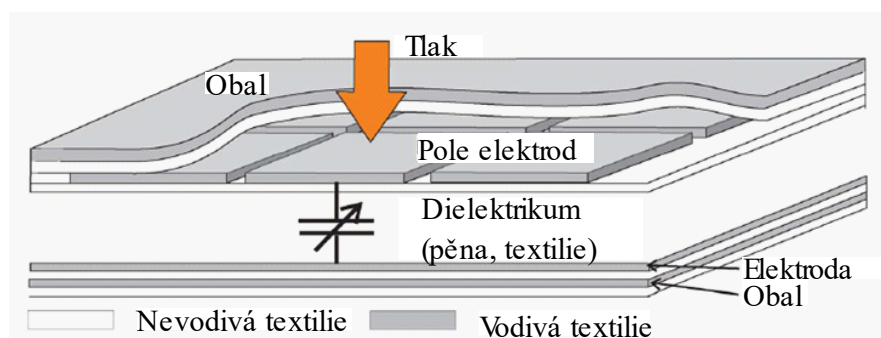
Obr. 1.10: Serpentinová struktura tlakového senzoru [11].

Tento typ senzoru lze použít v různých oblastech. Je ho možné aplikovat pro měření tlaku v pneumatikách, měření atmosférického tlaku nebo tlaku v krvi, jak je již uvedeno v [7].

Tlakové senzory mají různé pracovní principy, avšak provedení je tam, kde se mění vzdálenost mezi elektrodami pomocí působícího tlaku na kapacitní senzor. Citlivost senzoru na působící tlak lze určit pomocí různých flexibilních membrán. Senzor zobrazený na Obr. 1.10 obsahuje plochý hliník jako elektrodu, malé kapky rtuti a serpentinovitou membránou z kovu barya. Tento senzor může být sestaven i z nerezové oceli a titanátu stroncia [12]. Flexibilita senzoru je dosažena pomocí měděné elektrody a polyamidového substrátu. [11]

### Textilní kapacitní senzor

Vyvinutý systém pro měření tlaku se skládá ze dvou samostatných částí (viz obr. 1): textilního sensorového pole a měřicí elektroniky. Elektrické signály byly směřovány textílem vodiče na textílii senzoru a byly připojeny ke komunikační elektronice. [13]



Obr. 1.11: Obecná struktura textilního tlakového senzoru [13].

Textilní senzor se skládá ze základní třívrstvé struktury, která slouží k vytvoření variabilního kondenzátoru. Mezi dvěma elektrodami, vyrobenými z vodivých textilií, je uspořádán stlačitelný distanční člen, který mění svou tloušťku. Jeho tloušťka závisí na vyvolaném tlaku. Další vrstvy vodivého textilu jsou uspořádány tak, že pokrývají obě strany pole pro účely stínění.

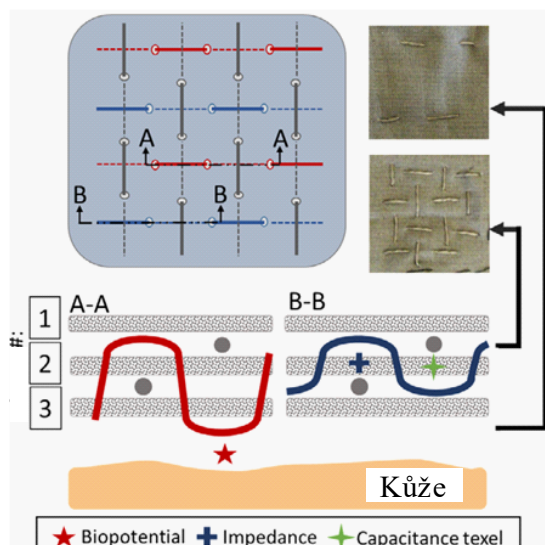
Kapacitní odpor (reaktance) kondenzátoru s plochou deskou je inverzně úměrná vzdálenosti mezi deskami (elektrodami) při dané permitivitě materiálu mezi deskami. [13]

## 2 Textilní tlakové senzory.

V této kapitole je popsáno několik aplikací textilních tlakových senzorů. Je zde několik zajímavých myšlenek a navržených funkčních prototypů. Tento přehled nových textilních senzorů se zabývá novými výzkumy a novými trendy v aplikaci senzorů pro běžné použití. Prozatím se jedná pouze o komerčně nedostupné senzory.

### 2.1 Sensing Textile Seam-line for Wearable Multimodal Physiological Monitoring

Článek zkoumá novou multimodální snímací metodou, která formuje švy z vodivých textilních vláken komerčně dostupné tkaniny. Navrhovaný mikro elektromechanický senzor by poskytoval nositelný, flexibilní záznam signálu na bázi textilu. Bylo by možné detekovat vlhkost a hmatové snímání současně. Tři typy vláken (viz Obr. 2.1) jsou hodnoceny z hlediska jejich schopnosti snímání na základě pole, včetně 3D tištěného vodivého vlákna. Toto vlákno je na bázi vícevrstvých uhlíkových nanotubic, (MWNT multiwalled nanotube) a komerčně dostupného nerezového vodivého vlákna z oceli. [14]



Obr. 2.1: Průřez A-A ukazuje vlákno prošité skrz vnitřní tkaninu (vrstva 2) a vrstva textilie na straně kůže (vrstva 3). Průřez B-B ukazuje impedanční / kapacitní snímací vlákno prošité skrz vnitřní textilní vrstvu. Texel („textilní prvek“) adresující vlákna (tmavě šedá) jsou orientována kolmo a jsou šity podél vnitřní textilní vrstvy [14].

Mnoho elektronických textilních senzorů bylo vyrobeno začleněním měkkého nebo tuhého vodivého materiálu do tkaniny. Vodivé nitě a příze byly začleněny do textilu, aby se dosáhlo větší vodivé podložky prostřednictvím pravidelného nebo alternativního tkaní. Vzory mohou fungovat jako elektrody EKG nebo kapacitní desky.

Nedávná práce se zaměřila na navrhování nových vodivých vláken, která jsou snadno integrovatelná do standardních textilií pro vylepšené snímání pomocí materiálů, které redukuje odpor, udržují dobrou flexibilitu a vykazují silné, mechanické a odolné vlastnosti.

Citlivého kapacitní řešení taktálních senzorů bylo dosaženo začleněním různých nanočástic a vodivých polymerů do vnitřních jader izolovaných vláken, kde izolace působí jako vrstva dielektrika. Byly také použity novější metody 3D tisku.

Některá z vodivých vláken jsou sešívána do textilie tak, že jsou částečně exponována externě a jsou v přímém kontaktu s kůží pro přesnější snímání (Obr. 2.1). Paralelně s nimi jsou spojena i jiná vodivá vlákna. Vlákna jsou umístěna na vnitřní textilní vrstvě a nepřicházejí tedy do styku s kůží. Tato vlákna se používají pro impedanční a kapacitní snímání anebo pro monitorování vlhkost či tlakové síly. Třetí sada vodivých vláken je prošívána vnitřní textilní vrstvou a je kolmá ke snímacímu vláknu, které působí jako adresová vlákna pro výběr a snímání „textilního prvku“ (texel). Tato adresující vlákna jsou umístěna tak, aby se nedotýkala ostatních kolmých snímacích vláken.

Protože prošitá vodivá vlákna nejsou pod vysokým axiálním napětím, jsou stlačena proti vrstvě tkaniny. Když je síla aplikována normálně, tak se kapacita zvyšuje. Je to kvůli snížené efektivní vzdálenosti mezi vlákny v bodě křížení. Protože izolační tkanina je porézní a má dobré odvodové schopnosti, absorbuje tekutinu v přítomnosti vlhkosti a impedance v bodě křížení se zmenší. [14]

## **2.2 Textile-based wearable sensors using metal-nanowire embedded conductive fibers**

V této práci se měří napětí a tlak na textilním senzoru využívající vodivá vlákna zabudovaná do kovového vlákna. Vodivá vlákna byla vyrobena ovrstvováním dopovaným glycerolem (3,4-ethylen-dioxythiofen): poly (styrenulfonát) a stříbrnými nanodrátky (Ag NWs) na nylonových vláknech pomocí komerčně dostupného šicího stroje na bázi textilu. Snímač napětí a tlaku byl vyroben na tkaninách tenzometrických snímačů založených na textilu. Tento senzor ukázal vysokou citlivost a spolehlivost při použití mechanického namáhání. Také tlakový senzor vykazoval rozumnou hodnotu tlakové odezvy na různé úrovně zatěžovacího tlaku. [15]

Elektronické textilie (E-textil) jsou považovány za jedny z nejslibnějších kandidátů na nositelnou inteligentní elektroniku, která vyžaduje mechanickou flexibilitu, pohodlí, světlo,

nízkou hmotnost a vysokou funkčnost. Doposud většina nositelné inteligentní elektroniky byla vyvinuta na typu tenkého filmu substrátu nebo na elastomerních materiálech, a to kvůli podobnosti v jejich výrobním procesu ve srovnání s konvenčními výrobky elektroniky. [15]

Dvě rovnoběžné linie vodivých vláken, umístěné ve vzdálenosti  $\sim 7$  mm, se našila na látku. Dvě vodivá vlákna jsou elektricky odpojena od obvodu, je-li vodivý povrch Al mezi fólií, pryží, sklem, lidskou kůží nebo mezi dvěma vlákny. Dvě vlákna se elektricky spojí a vytvoří uzavřený okruh. Elektrický odpor textilního tlakového senzoru se měnil podle zatížení působícího na látku (hmotnosti 5 g a 10 g). [15]



Obr. 2.2: Pružný textilní senzor [15].

Textilní tkanina vykazovala dobrou stabilitu během 200 cyklů opakovaného natahování a uvolňování. Tento senzor dokáže určit i tlak vyvíjený na vyrobený kus látkového senzoru. Z těchto výsledků očekáváme, že mohou být jak tenzometrické, tak tlakové senzory na bázi textilu používané v různých nositelných elektronických systémech. Může se jednat o pohybové, rehabilitační a lékařské senzory. [15]

Jednoduše pomocí určitého vzorce šití a výběru vhodné tkaniny a izolační vrstvy, dokázali vyrobit jednoduché, levné, adaptabilní binární senzory na bázi textilu. Navrhovaný způsob může být velmi užitečný a praktický v tom, že vyžaduje pouze použití vodivých vláken k vytvoření švů, které jsou nutné k vytvoření téměř každého textilního výrobku. Tento senzor design by mohl umožnit rozsáhlou integraci textilu, protože to současně umožňuje více režimů snímání pouze pomocí typu jednoduchého vlákna a standardní techniky tkaní. V současné době se vyvíjejí multi-fyzické modely simulace a charakterizace odezev takových senzorů v systému, aby přesněji předpovídaly chování senzorů pod



různými omezeními, jako je hustota vodivých vláken a deformace tkaniny. Vlákna s průřezem ve tvaru H jsou také vyhodnocena, aby se zlepšily multimodální způsoby založené na vláknech se schopností snímání. Budoucí směr tohoto výzkumu zahrnuje vývoj nových vláken a konektorů, které umožňují všudypřítomné a adaptivní snímací textilie. [15]

Předchozí výsledky prokázaly, že vlákna a tkaniny jsou vhodné pro realizaci nositelné elektroniky. Použití kovového jádra nebo velkého množství kovových nanočástic může být škodlivé z hlediska mechanických vlastností vláken. [15]

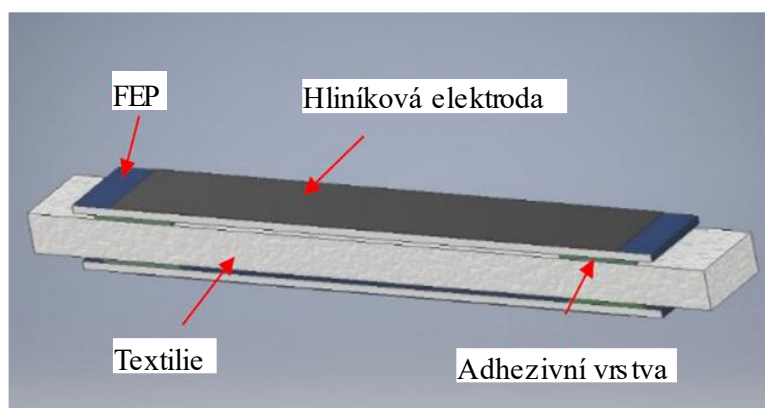
### 2.3 Textile based ferroelectret for foot pressure sensor

Senzory založené na piezoelektrických materiálech (ZnO, olovo, titaničitan zirkoničitý (PZT), MoS<sub>2</sub>, polyvinylidenfluorid (PVDF) a jeho podobný polymer) vynikají převodem mechanického signálu na elektrický výstup. [16]

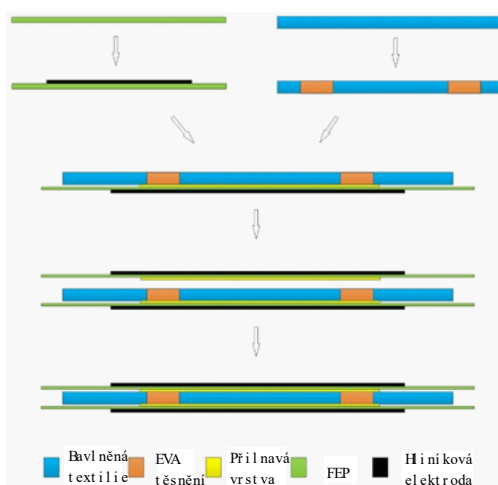
PZT má vynikající dielektrikum a piezoelektrické vlastnosti, ale je to pevná keramika s velmi vysokým Youngovým modulem (63 GPa) [16].

Naproti tomu PVDF je měkký polymer s nízkým Youngovým modulem (2,9 GPa), ale jeho piezoelektrický součinitel náboje je řádově nižší než PZT (20 pC/N), což ho činí nevhodným pro nositelné aplikace. Proto je třeba vyvinout piezoelektrický materiál s vysokou piezoelektrickou aktivitou, nízkým Youngovým modulem a schopností natáhnout se a přizpůsobit se nositelnému snímatelnému senzoru. [16]

Ferroelectret je tenký film z polymerové pěny, která může generovat elektrický signál při působení mechanické síly. Tato síla je podobná piezoelektrickým materiálům. Typická vnitřní struktura ferroelektrické pěny je náhodně uspořádaná buňka, kde jsou prázdná místa s kladným a záporným nábojem uloženým odděleně na povrchu. Vzhledem k materiálu polymeru a jeho buněčné struktuře, je elastický modul ferroelektretu nízký. Ferroelektron je snadno stlačitelný a podléhá velké deformaci a to, když je pod tlakovou silou a má silný piezoelektrický účinek. Díky jeho pokročilé piezoelektrické vlastnosti, která byla srovnávána s jinými vlastnostmi piezoelektrických materiálů, byly navrženy četné aplikace, například akustické převodníky, vysokofrekvenční reproduktory, ultrazvukové vysílače a přijímače, hydrofony a akcelerometry. Měkká, pružná povaha polymerního ferroelektretu jej dělá velmi vhodným pro použití v aplikacích nositelné elektroniky. [16]



Obr. 2.3: Ferroelektrický senzor [16].



Obr. 2.4: Struktura ferroelektrického senzoru [16].

Tento výzkum popisuje výrobu a testování textilního ferroelektronu snímajícího tlak nohy. Jsou vyrobeny tenké filmy z fluorovaného ethylenu propylenu (FEP) a konvenční bavlny formované do sendvičové struktury. Nejtradičtější ferroelektrody jsou napěněny za použití modifikovaného foukání filmu a vytlačovacího procesu. Nicméně výrobní proces pro tradiční ferroelektrody je drahý, složitý a nemůže být rozšířen na další materiály. V tomto výzkumu je nositelný ferroelektrický textilní tlakový senzor založený na rychle sestavené výrobní metodě. Obr. 2.3 znázorňuje FEP-textilní ferroelektronickou strukturu. Úroveň piezoelektrické aktivity ferroelektronu je určována materiálovými vlastnostmi filmu FEP a textilu. FEP film je vynikající elektrotechnický materiál a je využíván jako materiál nosiče náboje. Textilie slouží jako mechanicky podpurný materiál, který odděluje FEP film. Výrobní proces ferroelektronu je znázorněn na Obr. 2.4. Tenká vrstva hliníkové elektrody byla odpařena na FEP film. Ethylen-vinylacetát (EVA) polymer je potažen z obou stran bavlněné textilie a vsákne se do textilního materiálu. V souhrnu byl představen textilně-

ferroelektrický tlakový senzor, který je vyroben z fluorovaných ethylenových propylenových (FEP) filmů a konvenční textilní bavlny formované do sendvičové struktury. Textilní ferroelektrické snímače tlaku nohy vykazovaly dobrý vztah linearitu s vnější silou. Materiály a výroba jsou levné a bezpečné k použití, což může být vhodné pro výrobu ve velkém množství a pro aplikace nositelné elektroniky. [16]

## **2.4 A Linear Wide-Range Textile Pressure Sensor Integrally Embedded in Regular Fabric**

Tlakové senzory TEXTILE jsou vhodné pro aplikace ve zdravotnictví, kde tlakové síly působí v jedné ose s lidským tělem na textilní povrch senzoru. Například textilní snímač síly, který je použitý u snímání změny pohybu hrudního koše. Zatímco piezoelektrické snímače tlaku jsou používány pro snímání srdečního rytmu při kardiorepiračním monitorování aplikace. [17]

Tento druh textilních tlakových senzorů je konstruováno tak, že má jednu nebo více vrstev aktivního polymeru. Běžně se používá piezoelektrický nebo piezorezistentní polymer, vložený mezi dvě vodivé desky. Oba typy polymerů jsou velmi tenké pro pohodlné nošení. Piezoelektrický polymer přeměňuje aplikovanou sílu na výstupní napětí. Vzhledem k vysoké impedanci piezoelektrických zařízení, může být tento výstupní signál citlivý na nadměrné elektrické rušení a následně i na nízký poměr signál-šum. Na druhé straně se piezorezistentní polymer mění aplikovanou silou na změněný elektrický odpor. Na rozdíl od piezoelektrických polymerů jsou piezorezistentní polymery citlivé na statické nebo velmi nízkofrekvenční signály, jako rušivé signály vyvolané silami lidského těla. Dle průzkumu je zřejmé, že existující textilní tlakové senzory, které by mohly být zabudovány do běžné tkaniny, by mohly tvořit bezešvé součásti struktury tkaniny. Současné piezorezistentní textilní tlakové senzory podobné struktury dokázaly snímat až 800 kPa, což je nedostatečné pro některé aplikace, jako je analýza chůze, která vyžaduje přibližně 1 000 kPa. [17]

### **A – Snímací materiál piezorezistentní materiál**

Byl vybrán 3M Velostat, protože má vysoký objemový odpor  $<500 \Omega/\text{cm}$  a tloušťku pouze 200 mikronů. Vodivé desky jsou pleteny pomocí vodivé příze Shieldex, která je vyrobena z polyamidu a potažena 99 % čistého stříbra měrný odpor  $<3 \Omega/\text{cm}$ . [17]

### **B. Počet snímacích vrstev**

Zatímco se může rozšířit více vrstev piezoelektrického materiálu, detekovaný rozsah tlaku t

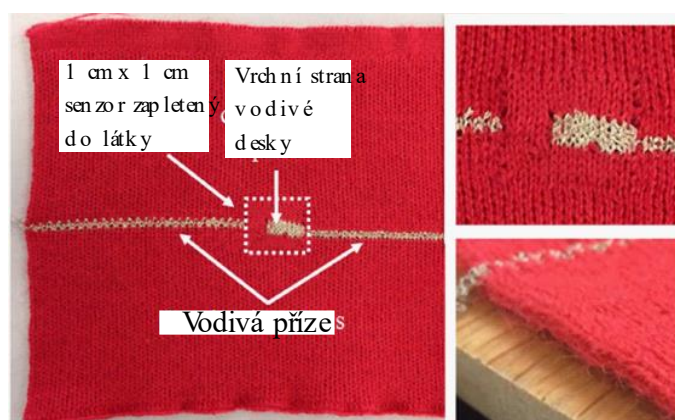
zvýší deformační efekt a sníží se citlivost senzoru na malé změny tlaku. Po rozsáhlých experimentech byl zvolen dvouvrstvý piezoodolný design. [17]

### C. Velikost senzoru

Bylo navrženo, aby byla zachována přesnost měření tlaku. Velikost textilního tlakového senzoru by neměla být menší než  $0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$ . V tomto případě byl vyroben senzor o velikosti  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ . [17]

### D. Geometrie vodivých desek

Geometrie vodivých desek z hlediska jejich rozměrů a polohy vzhledem k piezorezistentního polymeru může ovlivnit výkon senzoru. Konečná geometrie je stanovena empiricky po sérii experimentů. Je pozorováno, že citlivost na tlakovou změnu je vyšší, pokud mají horní a spodní vodivé desky překrývající se oblast. [17]



Obr. 2.5: Textilní tlakový senzor vsítý do textilie [17].

### E. Pletený prototyp

Obr. 2.5 znázorňuje textilní tlakový senzor vyrobený pomocí Pletacího stroje SIG.

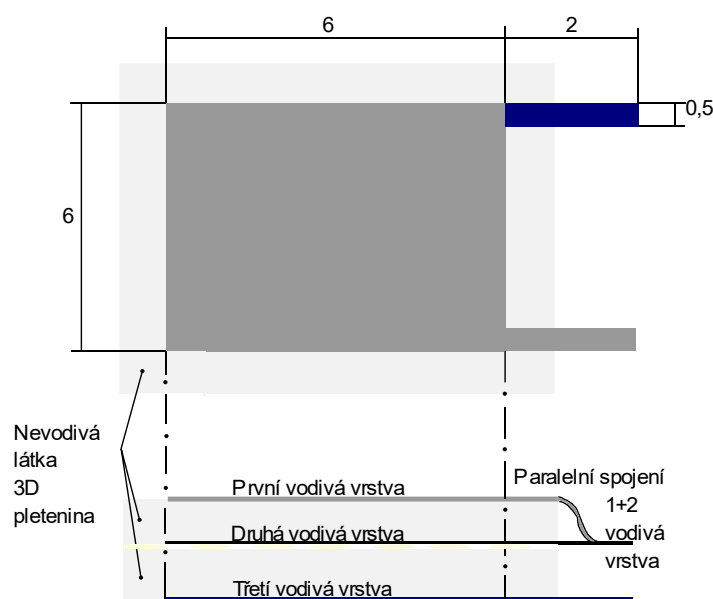
V této technologii se jedná o vylepšený design piezo-rezistentní textilního tlakového senzoru, který lze integrálně zabudovat do normální tkaniny, jak je zobrazeno na Obr. 2.5. Výsledky ukazují, že prototypový senzor může detekovat až 1000 kPa s relativně lineární odezvou. V literatuře však chybí teoretický rámec analyzující takový návrh senzoru. [17]

### 3 Návrh a realizace textilních tlakových senzorů

Tento bod zadání se skládá ze dvou druhů paralelního zapojení senzoru. První senzor byl vyroben se třemi stejnými plochami, které jsou v tzv. zákrytu nad sebou. Paralelně jsou spojeny první a druhá vrstva vodivé stuhy (viz Obr. 3.1). Druhý senzor byl pozměněn, takže druhá vrstva měla kratší stranu o 1 cm a paralelní spojení bylo provedeno mezi první a třetí vrstvou (viz Obr. 3.2). Celý postup výroby s fotodokumentací se nachází v kapitole 3.2 Druhý návrh senzoru.

#### 3.1 První návrh senzoru

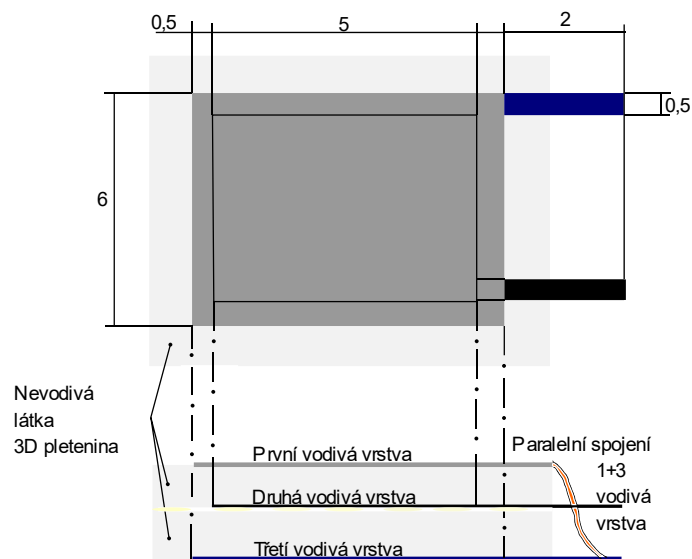
Senzor se skládá ze tří vrstev vodivého materiálů, které jsou odděleny dielektrickou, flexibilní tkaninou (3D pletenina). Rozměry vodivé vrstvy jsou 6 cm x 6 cm. Z každé vrstvy jsou vyvedeny konektory o délce 2 cm a šířce 0,5 cm (viz Obr. 3.1). V laboratorních podmínkách bylo dbáno na přesnost výroby, ale i tak došlo k nedokonalému zakrytí všech vodivých vrstev a z následného měření bylo zjištěno, že není kapacita totožná u všech vyrobených prvků viz naměřené hodnoty zobrazené v grafech (Graf 4-1, Graf 4-2, Graf 4-6, Graf 4-8, Graf 4-11).



Obr. 3.1: Schéma navrženého senzoru – TYP 1.

#### 3.2 Druhý návrh senzoru

Tento tlakový senzor byl upraven od předchozího zmenšením druhé vodivé vrstvy. Tento krok byl navrhnut z důvodu velkého rozptylu naměřených hodnot předchozích senzorů.



Obr. 3.2: Schéma navrženého senzoru – TYP 5.

### 3.3 Třetí návrh senzoru

Po změření senzoru s vnitřní menší elektrodou a konzultování výsledků bylo navrženo, že by vnitřní elektroda mohla mít kruhovitý tvar. Tento krok by měl zajistit, že vnitřní elektroda bude s vrchní i spodní elektrodou v zákrytu a plocha elektrod by měla být stále stejná. Tento nápad vznikl kvůli nedostatečně přesným hodnotám a velkému rozptylu kapacit senzoru z kapitoly 3.2. Kruhová vnitřní elektroda by měla zajistit stále stejnou kapacitní plochu i při posunutí vrchní či spodní vodivé vrstvy, což je způsobeno skládáním senzoru a následnému spékání vrstev. Na Obr. 3.3 je zobrazeno všech 13 vrstev senzoru, které je potřeba spéci k sobě pomocí černé termoplastické mřížky s označením DHJ32000/X27, aby byl senzor kompletní a funkční.



Obr. 3.3: Struktura navrženého senzoru s kruhovou vnitřní elektrodou – TYP 6.

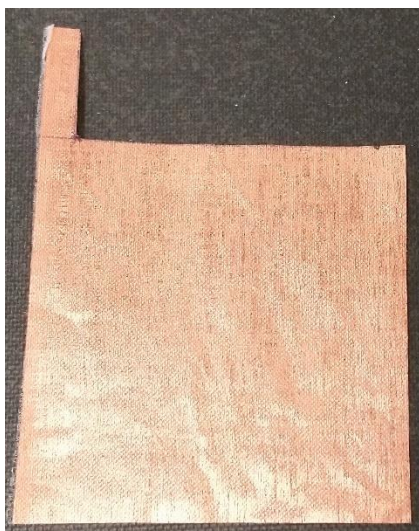
### 3.4 Postup výroby

K dispozici bylo 12 různých vodivých stuh (viz Tab. 4-3). Po zvolení vodivé stuhy byla stuha nařezána na příslušné rozměry 6 cm x 6 cm pomocí rotačního řezacího nože.

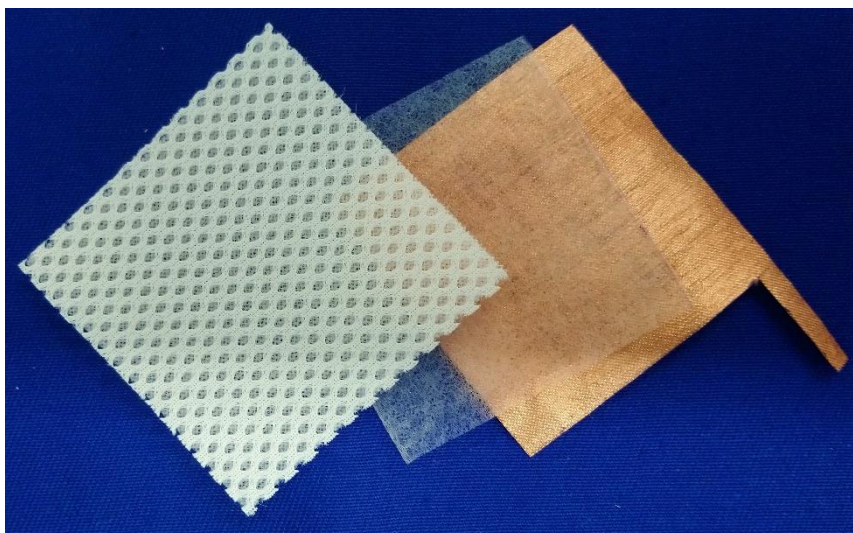
Na Obr. 3.4 je znázorněna vodivá stuha, kde už je z výroby přichycena termoplastická mřížka, která zaručuje přilepení k další vrstvě. Z vodivé stuhy byla změřena a vyříznuta požadovaná velikost vodivé plochy na tlakový senzor společně s kontaktem na spojení k další vrstvě a měření (Obr. 3.5). Mezi vodivé vrstvy byla vložena dielektrická flexibilní 3D pletenina a termoplastická mřížka. Dále byla přidána vnitřní druhá vodivá vrstva a stejným postupem byla přidána druhá dielektrická vrstva 3D pleteniny, termoplastická mřížka a poslední vrchní vodivá vrstva. Celý tento proces je prokládán zatavením každé vrstvy zvlášť, a to kvůli technologickému procesu lepení. Kvůli nesoudružnosti vrstev, se při prvním pokusu zaminovat všechny vrstvy dohromady jedním zatavením, došlo k posunutí všech vrstev a k následné výrobě chybného testovacího vzorku.



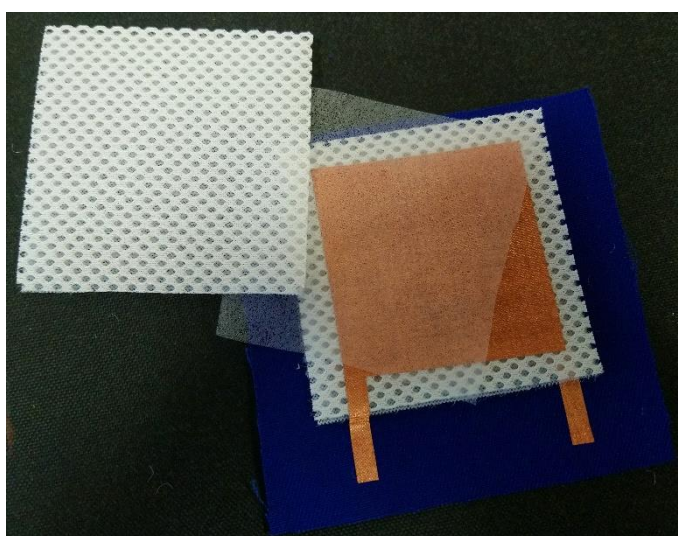
Obr. 3.4: Netkaná textilie pokovená Cu.



Obr. 3.5: Vyříznutá vodivá vrstva ze stuhy.

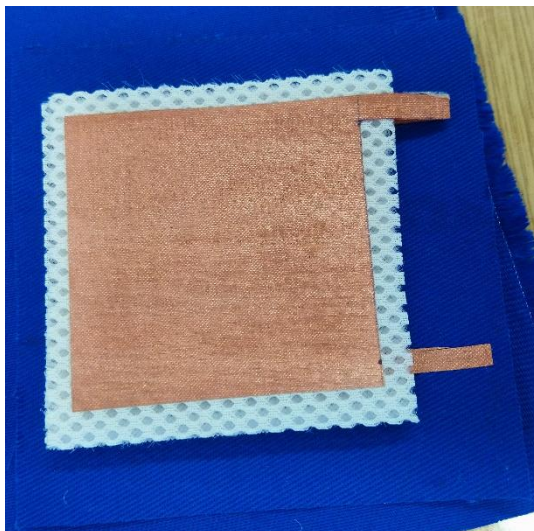


Obr. 3.6: Skládání vrstev před spečením.

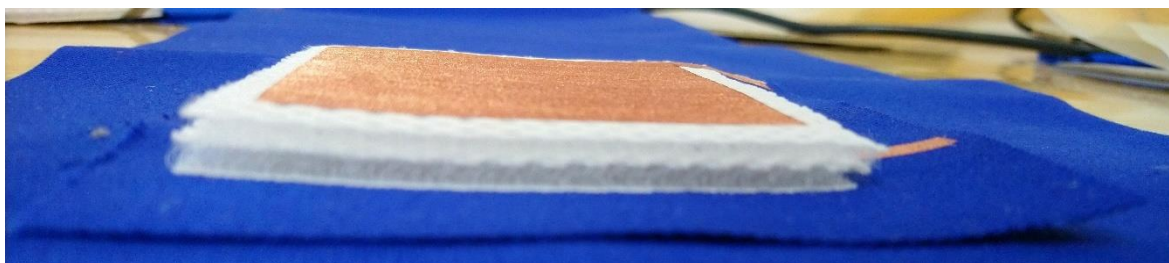


Obr. 3.7: Třetí a druhá vrstva senzoru před přidáním první vodivé vrstvy.

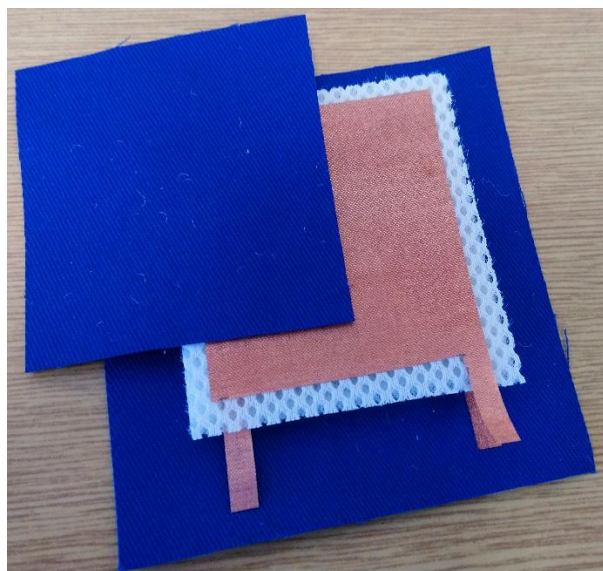




Obr. 3.8: Výsledný tlakový kapacitní senzor bez textilní ochrany.



Obr. 3.9: Výsledný tlakový kapacitní senzor bez textilní ochrany (z profilu).



Obr. 3.10: Tlakový kapacitní senzor před dokončením (vlevo), dokončený (pravo).

Poslední látková vrstva byla po diskuzi přidána tak, aby byl senzor lépe ochráněn před vnějšími vlivy nebo aby při měření, kdy bylo použito kovové závaží, nedocházelo ke zkreslení kapacity senzoru.

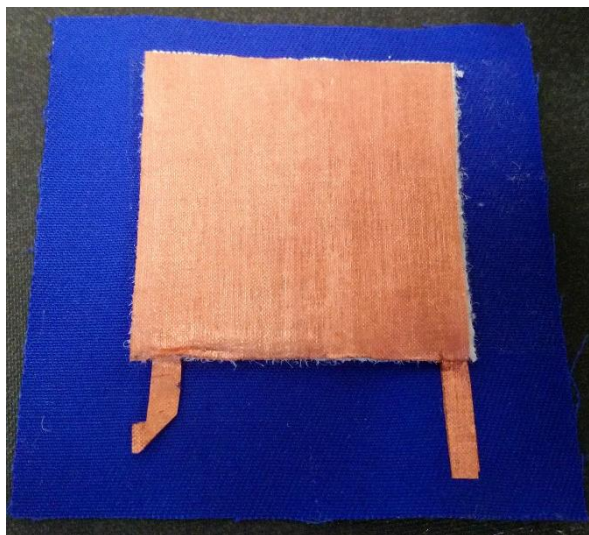


Obr. 3.11: Výsledný tlakový senzor z profilu.

Na Obr. 3.13 je zobrazen první návrh a vyrobený senzor. Bohužel vodivé vrstvy nalepené na spékající vrstvě se při výrobě senzoru zkratovaly a senzor byl nepoužitelný. Bylo proto zvoleno, že vodivá vrstva bude menší (viz Obr. 3.1 a Obr. 3.2) než dielektrická flexibilní distanční pletenina, aby nedocházelo ke zkratování vrstev při výrobě senzoru.



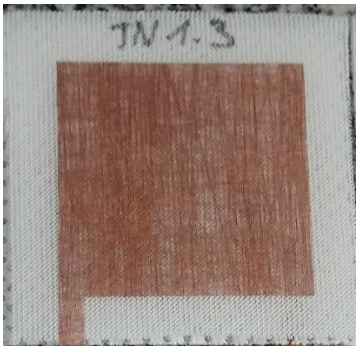



Obr. 3.12: Zkratované vodivé vrstvy.

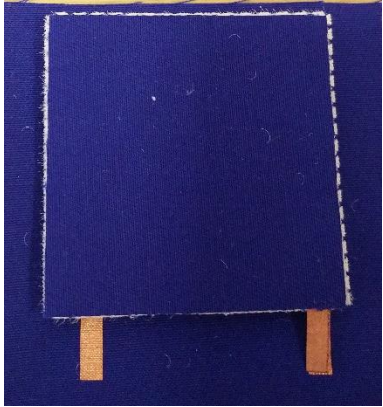

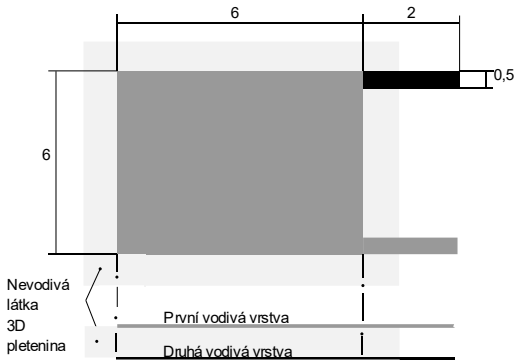



Obr. 3.13: První vyrobený kus, před úpravou návrhu.

Celkem bylo vyrobeno 6 senzorů. První měření hotového senzoru před pracím cyklem byly výsledky o poznání lepší než v případě prvního návrhu textilních tlakových senzorů. Rozptyl kapacit byl v jednotkách procent a linearita naměřených hodnot byla mnohem lepší než předchozí návrh.

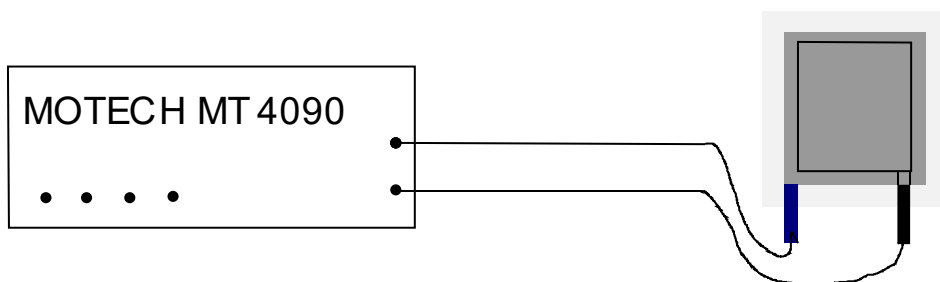
Tab. 1: Přehled textilních kapacitních senzorů.

 <p>A photograph of a textile capacitor sensor labeled 'TN 1.3'. It features a central square electrode made of a reddish-brown woven fabric, mounted on a white mesh substrate.</p>	<p><b>Senzor TYP 1</b></p> <p>Netkaná pokovená textilie Meftex 10</p> <p>Sendvičová struktura, paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání</p> <p>Rozměr elektrod: 6 cm x 6 cm</p>
 <p>A photograph of a textile capacitor sensor labeled 'TN 2.4'. It features a central square electrode made of a reddish-brown woven fabric, mounted on a white mesh substrate.</p>	<p><b>Senzor TYP 2</b></p> <p>Netkaná pokovená textilie Meftex 30</p> <p>Sendvičová struktura, paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání</p> <p>Rozměr elektrod: 6 cm x 6 cm</p>
 <p>A photograph of a textile capacitor sensor labeled '1'. It features a central square electrode made of a greyish-brown woven fabric, mounted on a white mesh substrate.</p>	<p><b>Senzor TYP 3</b></p> <p>Ošlichtovaná vodivá textilie</p> <p>Sendvičová struktura, paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání</p> <p>Rozměr elektrod: 6 cm x 6 cm</p>
 <p>A photograph of a textile capacitor sensor labeled '55'. It features a central square electrode made of a greyish-brown woven fabric, mounted on a white mesh substrate.</p>	<p><b>Senzor TYP 4</b></p> <p>Šlichtovaná vodivá textilie</p> <p>Sendvičová struktura, paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání</p> <p>Rozměr elektrod: 6 cm x 6 cm</p>

	<p><b>Senzor TYP 5</b></p> <p>Netkaná pokovená textilie</p> <p>Sendvičová struktura, paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání</p> <p>Navržený senzor s vnitřní elektrodou 6 cm x 6 cm</p> <p>Vnější elektrody 7 cm x 7 cm</p>
	<p><b>Senzor TYP 6</b></p> <p>Vodivá textilie šlichtovaná</p> <p>Sendvičová struktura, paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání</p> <p>Navržený senzor s vnitřní kruhovou elektrodou <math>\varnothing</math> 5 cm</p> <p>Vnější elektrody 6 cm x 6 cm</p>
	<p><b>Senzor TYP 7</b></p> <p>Měděná folie</p> <p>Vnější elektrody 6 cm x 6 cm</p>
	<p><b>Senzor TYP 8</b></p> <p>Měděná folie</p> <p>Sendvičová struktura, paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání</p> <p>Navržený senzor s vnitřní elektrodou 6 cm x 6 cm</p> <p>Vnější elektrody 7 cm x 7 cm</p>

## 4 Měření a testování kvality senzorů, testování odolnosti vůči pracím cyklům.

V této kapitole bude popsáno samotné fyzické měření na zhotovených kapacitních tlakových senzorech, které budou v následujících kapitolách podrobně popsány. Měřena byla i vodivá textilie, z které je tlakový senzor vyroben. Pro měření byl použitý LRC Meter MT 4090 od společnosti MOTECH. Každý textilní senzor byl postupně zatěžován závažím od 0,128 kg až do celkového zatížení 5,128 kg. Měřicí přístroj byl nastaven na měřicí frekvenci 200 kHz a napětí 1 V. Frekvenční odezva byla zkoušena v rozmezí několika frekvencí. Použitá frekvence byla zvolena kvůli nejlepší odezvě při měření. Aby bylo eliminováno zkreslení a kontakt vodivých vrstev od kovového používaného závaží, byl zvolen dřevěný podstavec viz Obr. 4.3. V souvislosti na aplikaci, kde by bylo možné tyto senzory použít, tak byly zvoleny tyto rozmezí zatížení. Při měření viz Obr. 4.2 byly použity prodlužovací izolované kabely z důvodu flexibility. Měření bez prodlužovacích kabelů či s kabely nemělo vliv na výslednou kapacitu (měřeno s normovaným keramickým kondenzátorem).



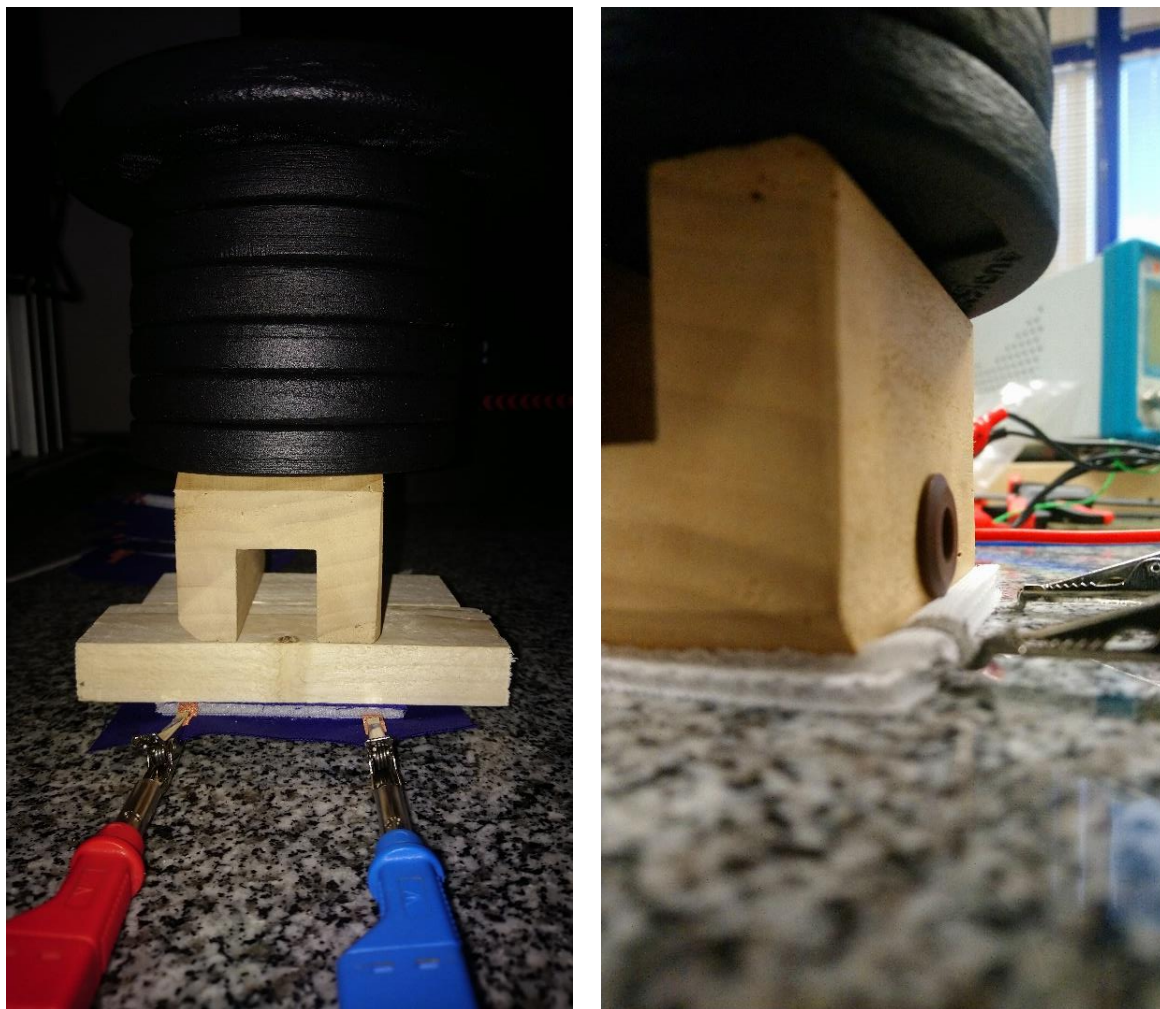
Obr. 4.1: Schéma zapojení, měření tlakového kapacitního senzoru.



Obr. 4.2: Ukázka reálného zapojení při měření.

Nejdříve byly senzory vyrobeny a následně změřeny pro zjištění kapacity, ale také proto, jestli se senzor chová dle předpokladů. Měření bylo provedeno na každém senzoru dvakrát. Na každé vodivé stuze bylo měřeno čtyřikrát pro vyloučení měřicí chyby a také, jestli senzor či vodivá látka nevykazují nějaké anomálie.

Poté byly senzory vyprány dle prací normy ČSN EN 6330. Po každém pracím cyklu byl následně senzor vizuálně zkontrolován a znovu dvakrát změřen. Praní bylo prováděno na program syntetika při 40 °C a odstředování 400 ot/min. Prací prášek byl použit Bonux 3v1. Testované motivy jsou prané v oddělovacích pracích vacích na zip. V pračce jsou dodány pruhy textilie pro zatížení min 2 kg prádla vyplývající z normy. [18]



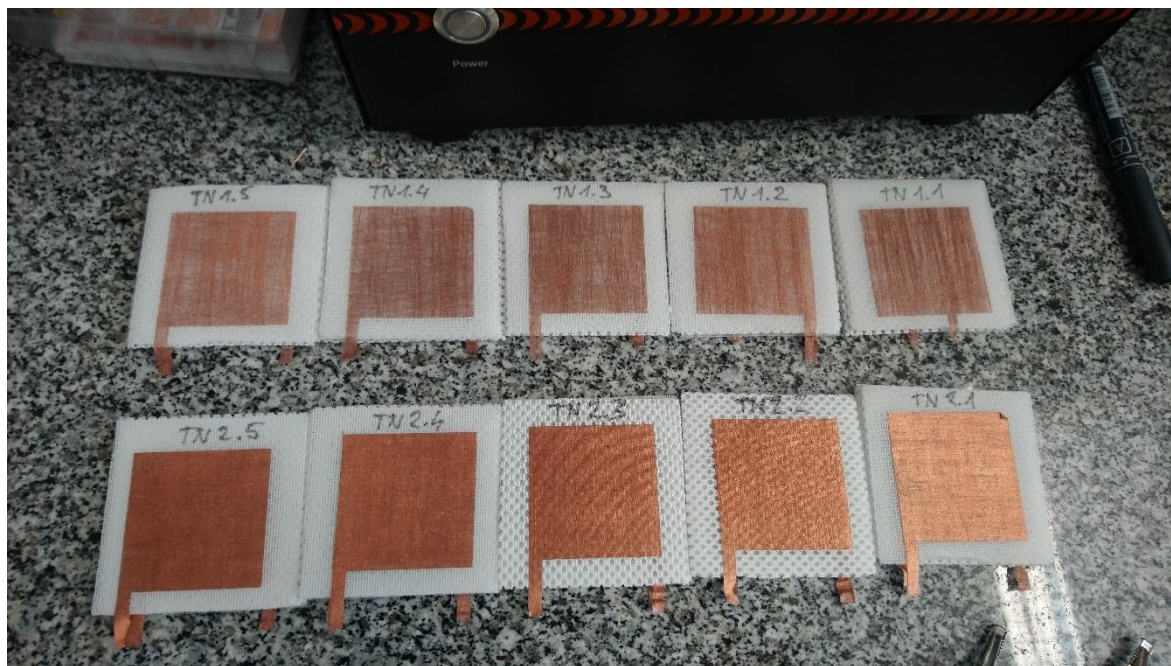
Obr. 4.3: Deformování senzorů pod působením postupného zatěžování.



Obr. 4.4: Ochranný vak určený pro praní senzorů.

#### 4.1 Netkaná pokovená textilie

Měření bylo provedeno na senzorech vyrobených z netkané textilie a dvou vrstev 3D pleteniny. Zde bylo k dispozici pět vzorků s vodivou netkanou textilií s označením Meftex 10 a pět vzorků s netkanou textilií Meftex 30 (viz Tab. 4-3) od firmy Bochemie a.s. Senzory byly označeny viz Obr. 4.5. Senzory byly čtvercového tvaru o straně 7 cm s aktivní plochou 6 cm x 6 cm a výšce přibližně 8 mm. Senzory byly vyrobeny sendvičovou strukturou. Pro tyto senzory byly dvě varianty s textilií Meftex 10 a Meftex 30. Netkané textilie byly zalaminovány z horní i spodní strany senzoru pomocí termoplastické mřížky (Vliesofix Bondaweb). Ke zlepšení citlivosti senzoru byla provedena paralelní kombinace ve vertikálním uspořádání. Dále byl senzor sestaven viz kapitola **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**4. Měření bylo provedeno postupně po jednotlivých senzorech v průběhu několika hodin. Senzory byly měřeny jednotlivě a závaží na ně bylo pokládáno po ustálení hodnoty kapacity předchozího závaží. Aby bylo zamezeno vlivům parazitních kapacit byl zvolen stůl vyrobený z žuly a měřicí kabely byly zvoleny co nejkratší. Po dosažení maximální hodnoty zatížení se následně závaží odebíralo a všechny hodnoty byly zaznamenávány do tabulky a byl vytvořen graf pro lepší přehled naměřených hodnot.



Obr. 4.5: Senzory s elektrodou z Cu pokovené netkané textilie TYP 1 - Meftex 10 (nahore) a TYP 2 - Meftex 30 (dole).

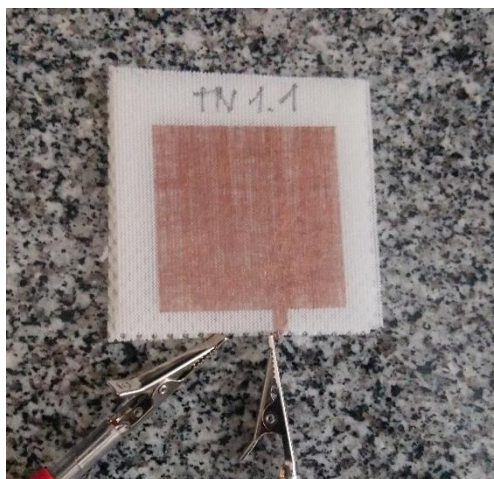
#### 4.1.1 Netkaná pokovená textilie Meftex 10 – TYP 1

Z Graf 4-1 lze vyčíst rostoucí hodnotu kapacity postupně, téměř lineárně, od hodnoty 0,128 kg s přidávaným závažím. Při maximálním zatížení 5,128 kg a následném odebrání zátěže je patrné, že se zde projevuje hystereze. Hodnoty při odebrání závaží se téměř lineárně snižují. Ze vzorku TN 1.1 je patrné, že v oblasti zatížení 2–3 kg se kapacita vychýlila od lineárního růstu kapacity. Mohlo to být způsobeno pravděpodobně nerovnoměrným deformováním v textilií mezi vodivými textiliemi tvořícími elektrodu. Z naměřených hodnot je zřejmé, že senzor v průběhu svého měření a zatěžování mění své fyzikální rozměry, protože jeho kapacita se nevrací po stejné křivce (důsledek hysterezního charakteru senzoru) na původní hodnoty jeho kapacity a ani bez zatížení se kapacita senzoru nerovná hodnotě před měřením Tab. 4-1. Aby byly eliminovány chyby měření, tak bylo měření provedeno na každém vzorku dvakrát. Rozmezí mezi měřením prvního a posledního vzorku bylo přibližně hodinu a půl.

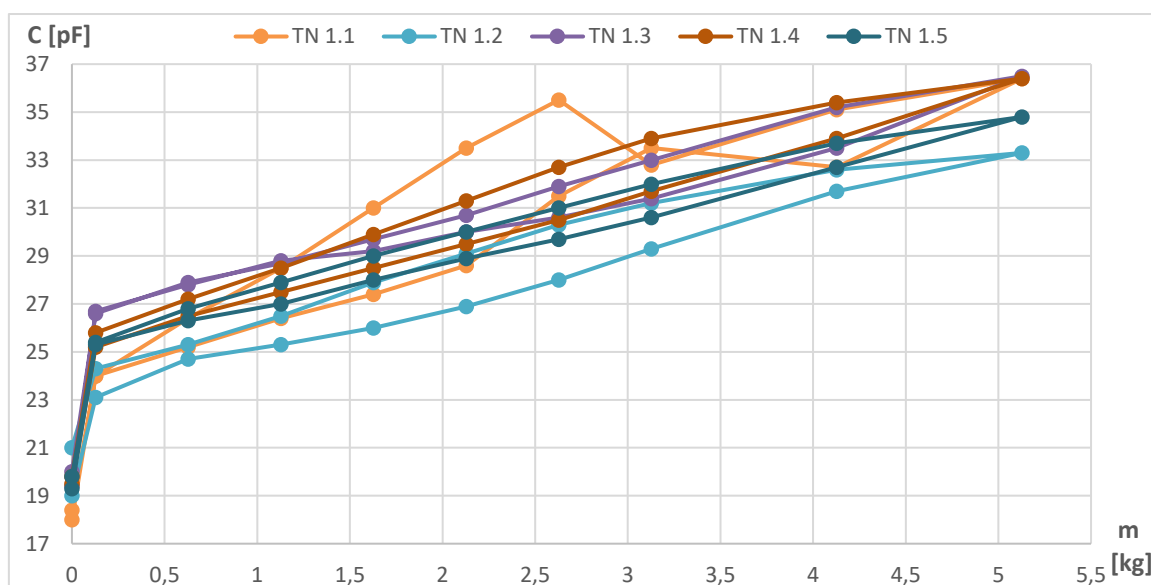
Druhé měření nemělo již lineární průběh při vyšších hodnotách zatížení na rozdíl od prvního měření. Dva vzorky vykazovaly v rozmezí 2-3 kg vychýlení z linearitu (viz naměřené hodnoty uvedené v Přílohy). Měření bylo navrženo s větší zátěží, ale kdyby byl senzor používán pouze do 2,5 kg zatížení (pracovní oblast zamýšlené aplikace – inteligentní



kompresní terapie), zkreslení kapacity či nelinearita se dají zanedbat a všechny senzory by bylo relevantní použít za předpokladu, že rozptyl kapacit by byl velice malý či vůbec žádný. Tyto rozptylové hodnoty kapacit jsou způsobeny nepřesnostmi při výrobě, kdy vodivé textilie vystřižené do čtverce ve výsledné sendvičové struktuře se ne vždy perfektně překrývají.



Obr. 4.6: TYP 1 - Kapacitní tlakový senzor s elektrodou z netkané textilie Meftex 10.



Graf 4-1: TYP 1 - Změřené hodnoty senzorů TN1.1 - TN1.5 před pracími sériemi – 1. cyklus měření.

Tab. 4-1: Naměřené hodnoty před vypráním - 1. cyklus měření – TYP 1.

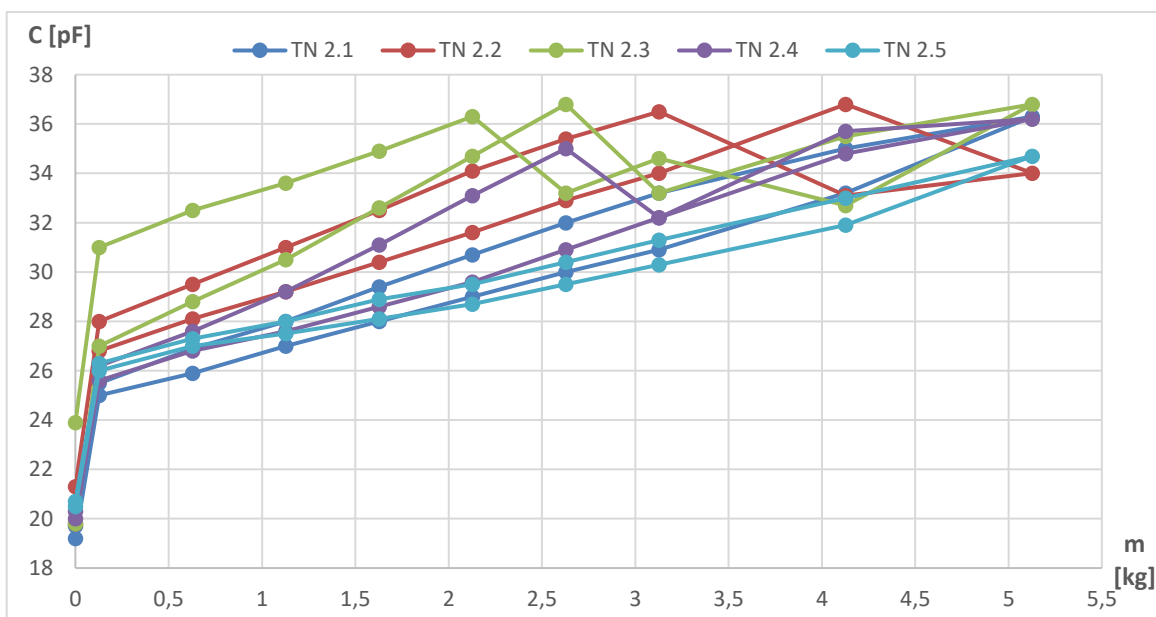
zatížení [kg]	TN 1.1 [pF]	TN 1.2 [pF]	TN 1.3 [pF]	TN 1.4 [pF]	TN 1.5 [pF]
0	18	19	19,4	19,5	19,3
0,128	24	23,1	26,7	25,2	25,3
0,628	25,2	24,7	27,8	26,5	26,3
1,128	26,4	25,3	28,8	27,5	27
1,628	27,4	26	29,2	28,5	28
2,128	28,6	26,9	30	29,5	28,9
2,628	31,5	28	30,6	30,5	29,7
3,128	33,5	29,3	31,4	31,7	30,6
4,128	32,7	31,7	33,5	33,9	32,7
5,128	36,4	33,3	36,5	36,4	34,8
4,128	35,1	32,6	35,2	35,4	33,7
3,128	32,8	31,2	33	33,9	32
2,628	35,5	30,3	31,9	32,7	31
2,128	33,5	29,1	30,7	31,3	30
1,628	31	27,9	29,7	29,9	29
1,128	28,5	26,5	28,7	28,5	27,9
0,628	26,4	25,3	27,9	27,2	26,8
0,128	24	24,3	26,6	25,8	25,4
0	18,4	21	20	19,8	19,8

#### 4.1.2 Netkaná pokovená textilie Meftex 30 – TYP 2

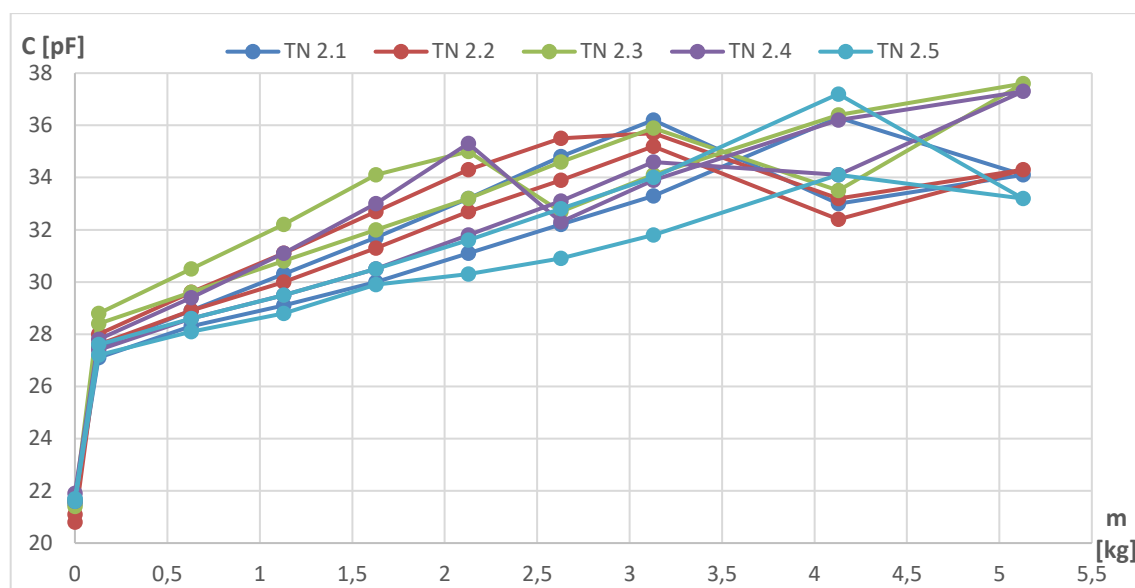
Identické měření jako v předchozím případě bylo provedeno na vzorcích TN 2.1 až TN 2.5. Zde byla použita vodivá netkaná textilie Meftex 30 a dle naměřených hodnot je patrné, že se tlakový senzor chová odlišně a jeho fyzikální vlastnosti jsou také jiné. Z Graf 4-2, Tab. 4-2 a Graf 4-3 je zřejmé, že zkrácení hodnot kapacit je u všech měřených vzorků na hodnotě zatížení 2 kg zkrácené a hodnoty nejsou lineárně rostoucí. Oproti senzorům s netkanou textilií Meftex 10 se kapacita senzorů po odebrání zátěže vrací na původní kapacitu s odchylkou pouze několik desetin pF. Je vidět, že při druhém měření se všem vzorkům snížila mez linearitu už při menším zatížení o 0,5 kg. Stejný problém jako u TYP 1 se zde kapacita senzoru zvýšila po prvním měření. Senzor se tedy při větší zátěži nevratně deformuje a mění své fyzikální rozměry čímž i výslednou vlastní kapacitu.



Obr. 4.7: Zatížený senzor – TYP 2.



Graf 4-2: TYP 2 - Změřené hodnoty senzorů, měření před pracími sériemi – 1. cyklus měření.



Graf 4-3: TYP 2 - Změřené hodnoty senzorů, měření před pracími sériemi – 2. cyklus měření.

Tab. 4-2: Naměřené hodnoty před vypráním 1. cyklus měření – TYP 2.

zatížení [kg]	TN 2.1 [pF]	TN 2.2 [pF]	TN 2.3 [pF]	TN 2.4 [pF]	TN 2.5 [pF]
0	19,2	19,8	23,9	20	20,5
0,128	25	26,8	31	25,6	26
0,628	25,9	28,1	32,5	26,8	27
1,128	27	29,2	33,6	27,6	27,5
1,628	28	30,4	34,9	28,6	28,1
2,128	29	31,6	36,3	29,6	28,7
2,628	30	32,9	33,2	30,9	29,5
3,128	30,9	34	34,6	32,2	30,3
4,128	33,2	36,8	32,7	35,7	31,9
5,128	36,3	34	36,8	36,2	34,7
4,128	35	33,1	35,5	34,8	33
3,128	33,2	36,5	33,2	32,2	31,3
2,628	32	35,4	36,8	35	30,4
2,128	30,7	34,1	34,7	33,1	29,5
1,628	29,4	32,5	32,6	31,1	28,9
1,128	28	31	30,5	29,2	28
0,628	26,9	29,5	28,8	27,6	27,3
0,128	25,5	28	27	26,2	26,3
0	19,7	21,3	19,8	20,3	20,7

Zde je ukázka výpočtu přibližné kapacity navrženého textilního tlakového senzoru. Jako dielektrikum byl zvolen materiál 3D distanční pleteniny s  $\epsilon_r = 3$  F/m [23]. Tloušťka 3D pleteniny je 4,6 mm a plocha elektrod 36 mm<sup>2</sup>.

$$C = C_1 + C_2 = 2 \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (3)$$

$$C = 2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot \frac{0,0036}{0,0046}$$

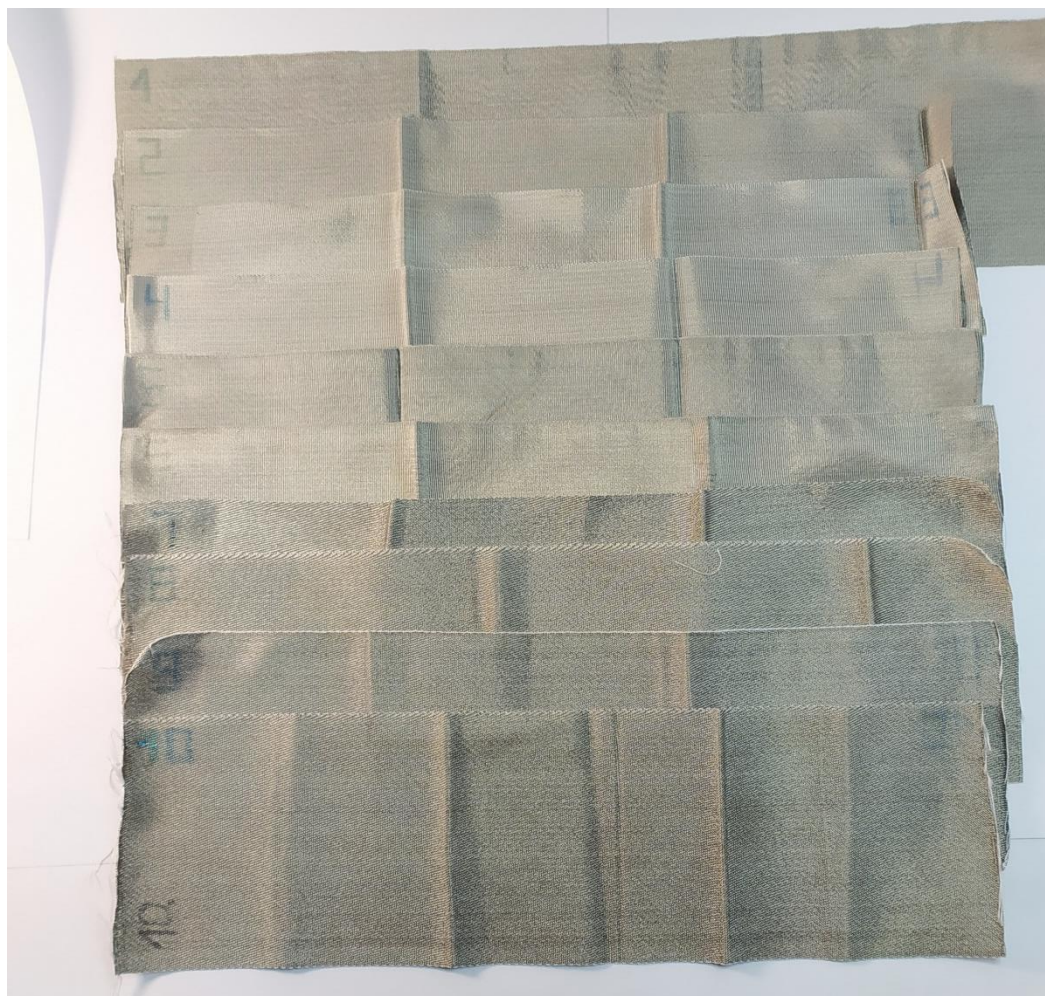
$$C = 41,57 \text{ pF}$$

## 4.2 Měření vodivých textilních materiálů – vodivé stuhy

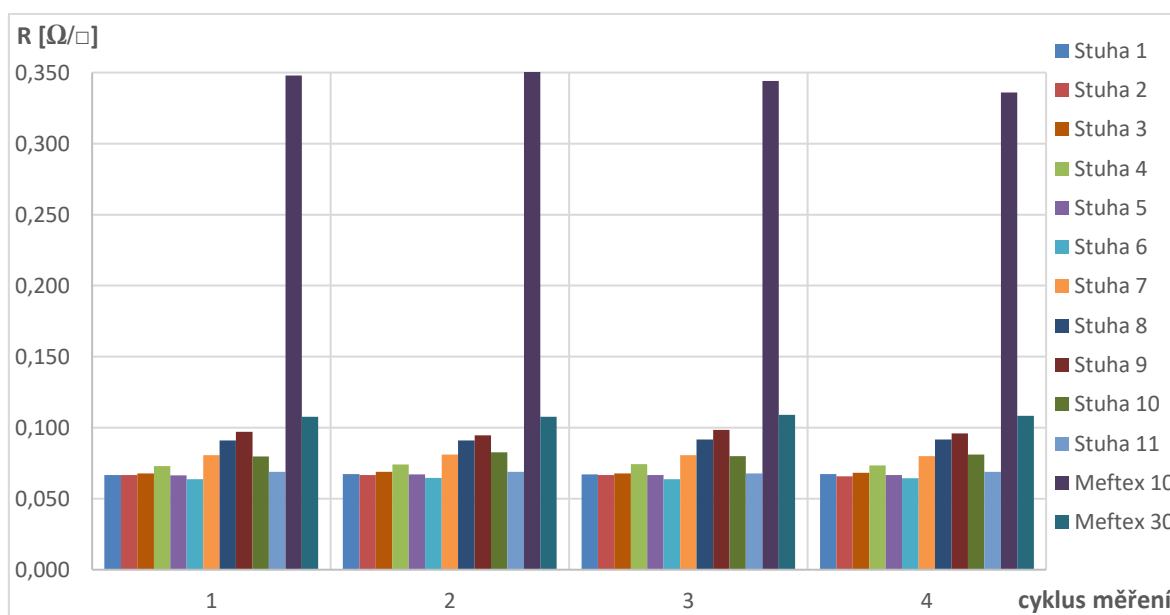
Měření vodivých stuh bylo provedeno na měřícím přístroji KEITHLEY 2701 multimeter. Byla zde použita proudovo-napěťová metoda měření ke zjištění odporu vodivého materiálu. K dispozici bylo 10 vzorků vodivých textilních stuh a 2 pokovené netkané textile Meftex. Každá stuha má své specifické vlastnosti, byla vyrobena jinou metodou viz Tab. 4-3 a byla měřena čtyřikrát. Délka stuh byla různá, ale jejich šířka byla shodná - 10 cm. Kvůli zjištění správné hodnoty odporu stuhy, byly vodivé pásy proudových sond umístěny přesně 30 cm od sebe. Následně se po vydělení třemi výsledná hodnota odporu určila na čtverec o rozměru 10 cm x 10 cm. Na Obr. 4.8 je zobrazeno, jak probíhalo měření stuh. Teflonové solenoidy byly použity pouze jako zátěž pro udržení napnutí stuh, aby byl kontakt s elektrodami a plocha stále konstantní. V Graf 4-4 je přehled všech měřených vodivých textilních stuh a jejich hodnoty odporů při každé sérii měření před plánovacími pracími cykly.



Obr. 4.8: Ukázka měření vodivých stuh napěťovo-proudovou metodou.



Obr. 4.9: Vodivé textilie – Vzorky stuh.



Graf 4-4: Naměřené hodnoty odporu na čtverec vodivých stuh – před pracími sériemi.

Tab. 4-3: Přehled parametrů jednotlivých vodivých stuh.

	Použitý materiál v útku (včetně jemnosti decitex)	Použitý materiál v osnově
Stuha 1	4x61 dtex f24 PESH S10, Typ 712+1 x 110, SilverR stat	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 2	2x61 dtex f24 PESH S10, Typ 712+1 x 110, SilverR stat	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 3	4x61 dtex f24 PESH S10	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 4	Suprim 120_74 1x3 61 dtex f24 S10, typ 712	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 5	Suprim 120_74 ; 1x 110 dtex SilverRstat	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 6	2x110 dtex SilverR stat	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 7 - Kepr	4x61 dtex f24 PESH S10	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 8 - Kepr	100% ba 29,5tex OE	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 9 - Kepr	2x20 tex PESH	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 10 - Kepr	2x167 dtex PESH prověřený	2x110 dtex SilverR stat
Stuha 11 - Ošlichtovaná vodivá látka	40% SilverR.STAT / 60% PES, 29,5 dtex	40 % SilverR.STAT / 60 % PES
Vzorek 1 – meftex10 [19]	3-7 g/m <sup>2</sup> naneseného kovu, NW PES MILIFE + Cu/Ni + dodatečná povrchová úprava	100% polyesterová netkaná textilie
Vzorek 2 – meftex30 [20]	1-7 g/m <sup>2</sup> naneseného kovu, NW PES MILIFE + Cu/Ni + dodatečná povrchová úprava	100% polyesterová netkaná textilie

Tex je jednotka užívaná v textilním průmyslu pro jemnost přize. Představuje délkovou hustotu, konkrétně hmotnost 1 kilometru přize v gramech. [21][22]

$$T = \frac{M}{L} = \frac{m}{l} \quad (4)$$

Tabulka 4-4: Naměřené hodnoty odporu na čtverec jednotlivých vodivých stuh.

Cyklus měření	Stuha 1 [Ω/□]	Stuha 2 [Ω/□]	Stuha 3 [Ω/□]	Stuha 4 [Ω/□]	Stuha 5 [Ω/□]	Stuha 6 [Ω/□]	Stuha 7 [Ω/□]	Stuha 8 [Ω/□]	Stuha 9 [Ω/□]	Stuha 10 [Ω/□]	Stuha 11 [Ω/□]	Meftex 10 [Ω/□]	Meftex 30 [Ω/□]
1	0,067	0,067	0,068	0,073	0,066	0,064	0,081	0,091	0,097	0,080	0,069	0,348	0,108
2	0,067	0,067	0,069	0,074	0,067	0,065	0,081	0,091	0,095	0,083	0,069	0,351	0,108
3	0,067	0,067	0,068	0,074	0,067	0,064	0,081	0,092	0,098	0,080	0,068	0,344	0,109
4	0,067	0,066	0,068	0,073	0,067	0,064	0,080	0,092	0,096	0,081	0,069	0,336	0,108

### 4.3 Šlichtované tlakové senzory – TYP 3

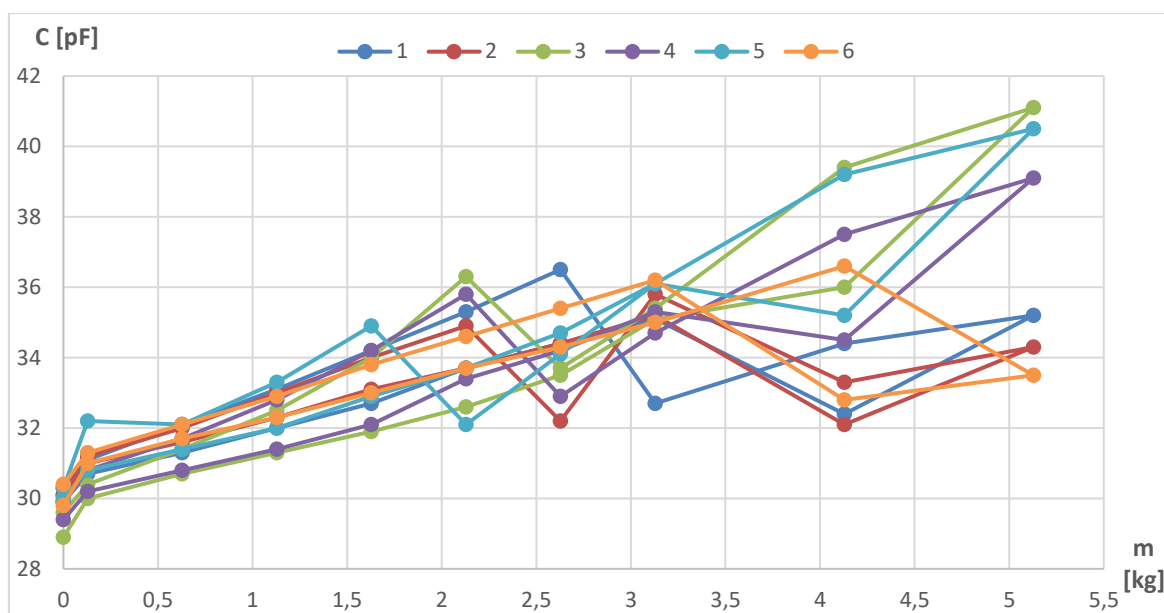
Tyto textilní tlakové senzory byly podrobeny zátěžové zkoušce stejným způsobem jako senzory z netkané textilie TYP 1 a TYP 2.

Měření bylo znovu provedeno dvakrát pro každý senzor. Oproti TYP 1 a TYP 2 bylo hned z naměřených hodnot viditelné, že senzory se šlichtovanou vodivou textilií mají o mnoho lepší reakci na zátěž a její následné odebrání.

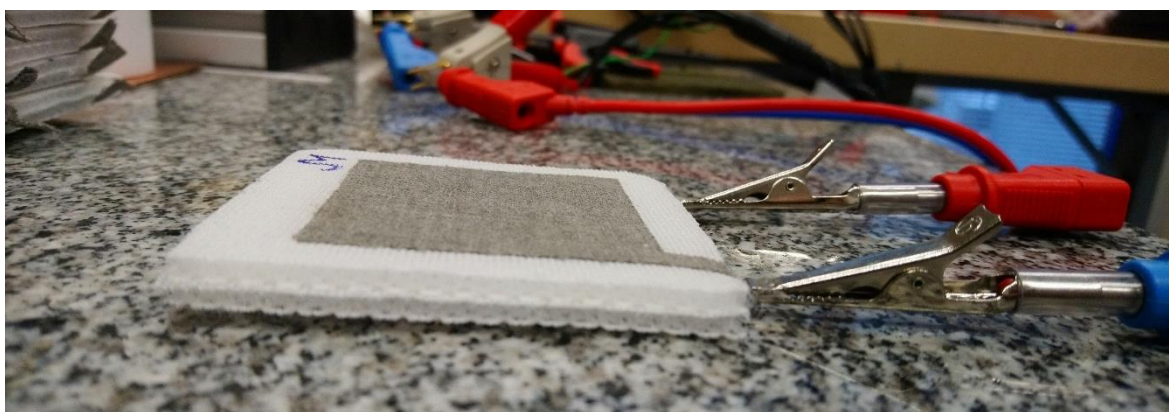
Tab. 4-5: Naměřené hodnoty před vypráním - 1. cyklus měření – TYP 3.

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	29,9	30,1	28,9	29,4	30	29,8
0,128	30,7	31	30	30,2	30,8	31
0,628	31,3	31,6	30,7	30,8	31,4	31,7
1,128	32	32,3	31,3	31,4	32	32,3
1,628	32,7	33,1	31,9	32,1	32,9	33
2,128	33,7	33,7	32,6	33,4	33,7	33,7
2,628	34,4	34,4	33,5	34,2	34,7	34,3
3,128	35,1	35,2	35,1	35,3	36,1	35
4,128	32,4	32,1	36	34,5	35,2	36,6
5,128	35,2	34,3	41,1	39,1	40,5	33,5
4,128	34,4	33,3	39,4	37,5	39,2	32,8
3,128	32,7	35,8	35,4	34,7	36,1	36,2
2,628	36,5	32,2	33,7	32,9	34,1	35,4
2,128	35,3	34,9	36,3	35,8	32,1	34,6
1,628	34,2	34	34	34,2	34,9	33,8
1,128	33,1	33	32,5	32,8	33,3	32,9
0,628	32,1	32	31,4	31,7	32,1	32,1
0,128	31,1	31,2	30,4	30,8	32,2	31,3
0	30,1	30,3	29,6	29,9	30,3	30,4





Graf 4-5: TYP 3 - Zobrazení chybovosti senzoru při vyšším zatížení – 1. cyklus měření.



Obr. 4.10: Měřený tlakový senzor bez zatížení – TYP 3.

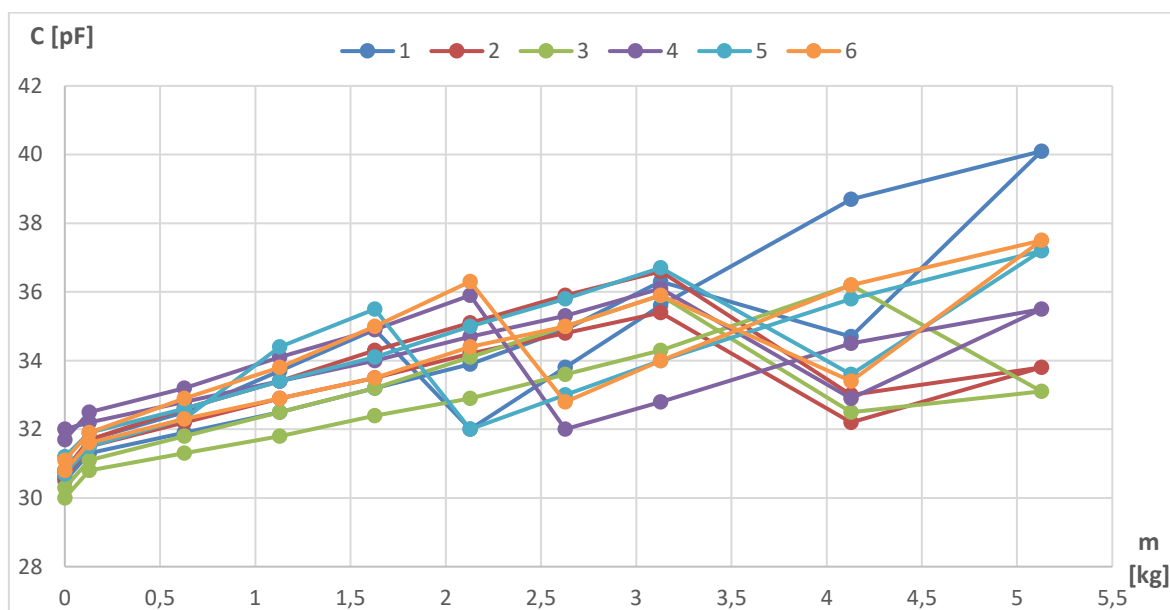
#### 4.4 Ošlichtované tlakové senzory – TYP 4

Pro toto měření bylo k dispozici opět šest tlakových kapacitních senzorů. Ošlichtované senzory, stejně jako u předchozích senzorů (TYP 2, TYP 2), byly měřeny se stejným zatížením od 0,128 kg do 5,128 kg. Tyto senzory byly vyrobeny se stejnou sendvičovou strukturou, ale za použití jiných vodivých materiálů. Z naměřených hodnot je patrné, že senzory jsou velice dobře fyzicky odolné. Hodnoty při měření se zatížením a po odebrání zátěže jsou téměř totožné a hystereze těchto tlakových senzorů lze považovat za uspokojivou.

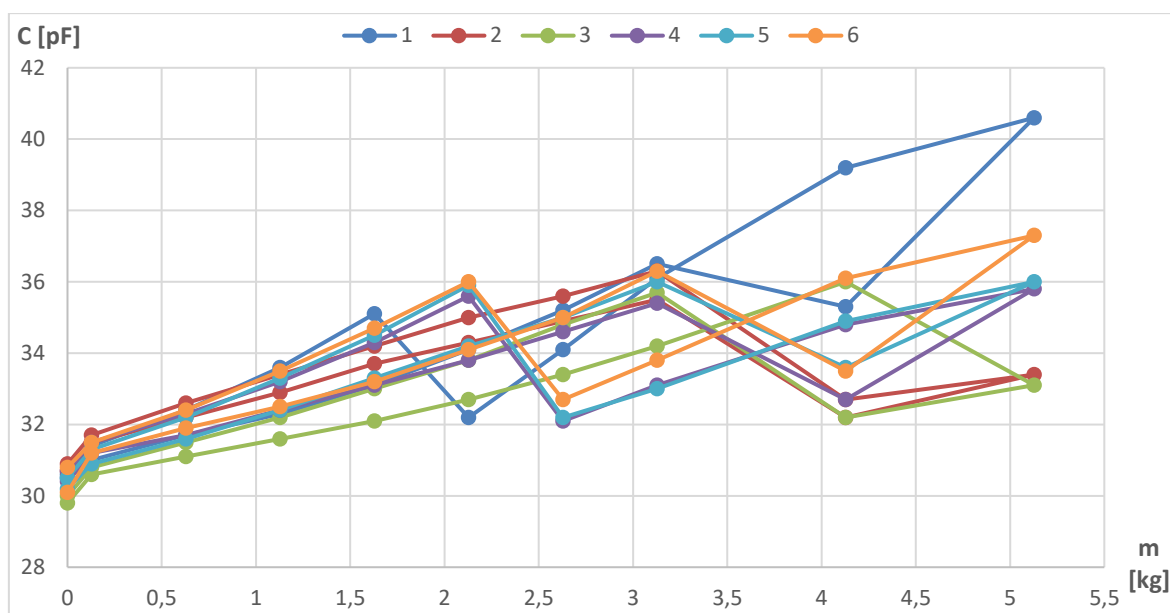
Při prvním měření a zatížení senzorů se nelinearita projevila už u pěti senzorů, a to již při 3 kg zátěže. Všechny senzory téměř identicky zareagovali poklesem kapacity. U senzoru 3 byl pokles kapacity zaznamenán až při čtyřech kilogramech zátěže. Při odebrání zátěže prvního měření se linearita u senzorů projevila až u zatížení 2 kg. Tím se projevila deformace senzoru vlivem zátěže, ale po odebrání zátěže se senzor vrátil na svou hodnotu kapacity téměř stejnou jako před začátkem měření.

Při porovnání naměřených hodnot grafů Graf 4-6 a Graf 4-7 je patrné, že při druhém měření se šlichtované tlakové senzory chovají téměř identicky. Hodnoty kapacit jsou při opakovaném zatížení stejné, liší se pouze o desetiny pF. Při porovnání křivek senzorů jsou vidět stejné charakteristiky chování každého senzoru.

Tyto senzory by bylo možné použít spolehlivě do 2 kg zátěže, kde se hodnoty kapacit při přidávání i uvolňování zátěže téměř rovnají.



Graf 4-6: TYP 4 - Zobrazení chybovosti senzoru při vyšším zatížení – 1. cyklus měření.



Graf 4-7: TYP 4 - Zobrazení chybovosti senzoru při vyšším zatížení – 2. cyklus měření.

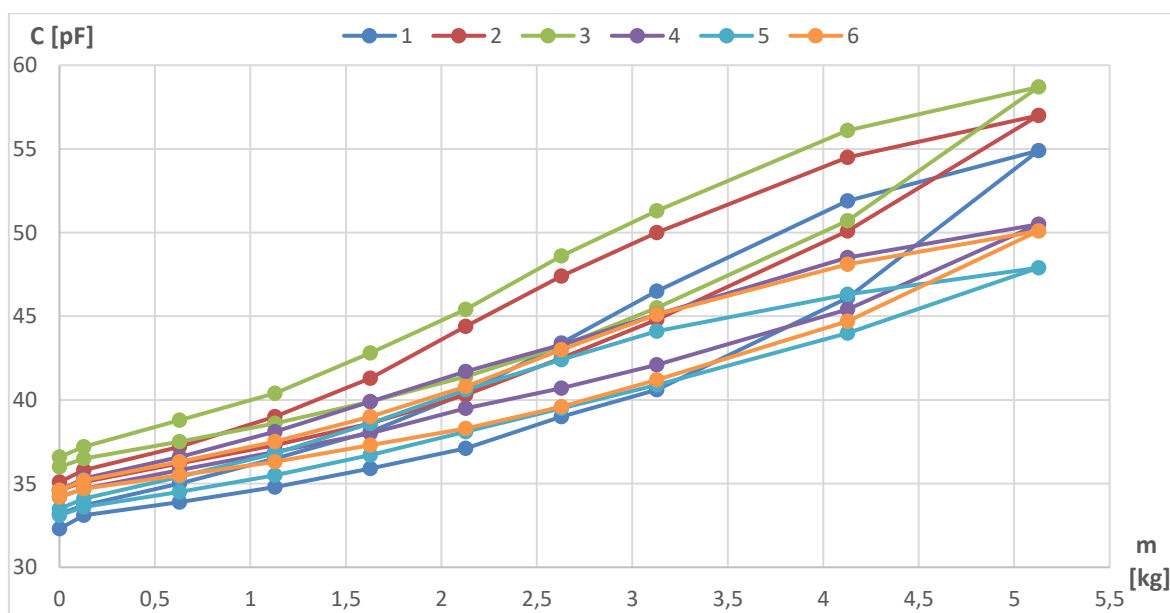
Tab. 4-6: Naměřené hodnoty před vypráním 1. cyklus – TYP 4.

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	30,5	30,6	30	32	31,2	30,8
0,128	31,3	31,5	30,8	32,2	31,9	31,6
0,628	31,9	32,2	31,3	32,8	32,6	32,3
1,128	32,5	32,9	31,8	33,4	33,4	32,9
1,628	33,2	33,5	32,4	34	34,1	33,5
2,128	33,9	34,2	32,9	34,7	35	34,4
2,628	34,9	34,8	33,6	35,3	35,8	35
3,128	36,3	35,4	34,3	36,1	36,7	35,9
4,128	34,7	32,2	36,2	32,9	33,6	33,4
5,128	40,1	33,8	33,1	35,5	37,2	37,5
4,128	38,7	33	32,5	34,5	35,8	36,2
3,128	35,6	36,6	35,9	32,8	34	34
2,628	33,8	35,9	35	32	33	32,8
2,128	32	35,1	34,1	35,9	32	36,3
1,628	34,9	34,3	33,2	34,9	35,5	35
1,128	33,7	33,4	32,5	34,1	34,4	33,8
0,628	32,5	32,6	31,8	33,2	32,3	32,9
0,128	31,7	31,7	31,1	32,5	31,5	31,9
0	30,8	30,8	30,3	31,7	30,7	31,1

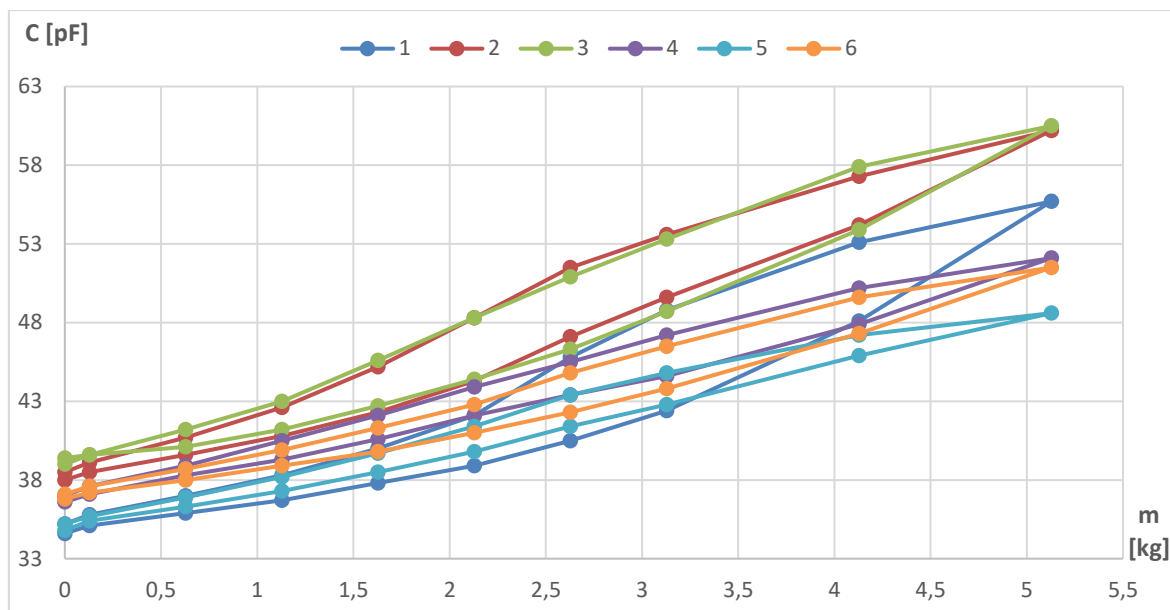
#### 4.5 Navržený senzor – TYP 5

Tyto senzory byly navrženy konstrukčně stejně jako senzory předchozí. Změna byla pouze u vnitřní elektrody, která byla o 0,5 cm z každé strany užší než elektrody vnější. Tento krok byl proveden z důvodu procesu přípravy testovacích vzorků. Když byly elektrody stejně velké, tak při laminování docházelo k posunu vnitřní vrstvy oproti vnějším a nebyla zaručena totožná konstrukce každého vyrobeného vzorku.

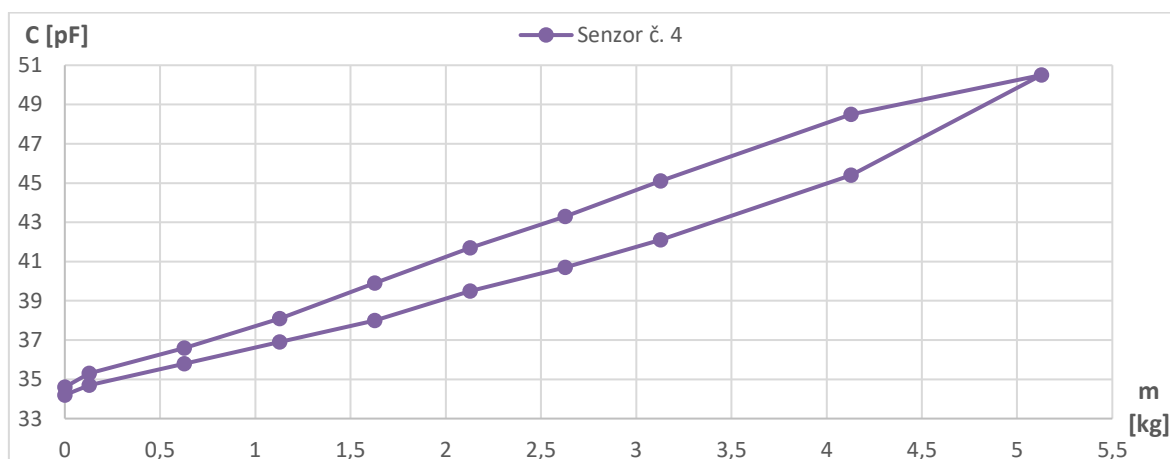
Po prvních hodnotách, naměřených po sestavení celé sady šesti kusů senzorů, bylo zřejmé, že se podařilo sestavit téměř totožné senzory. Z opakovaného měření v grafech (Graf 4-8 a Graf 4-9) je zřejmé, že tímto by byla zaručena sériovost a senzory by bylo možné použít a očekávat, že se budou chovat lineárně v závislosti na zátěži. Hodnoty však stále neukazovaly, že by se podařilo vyrobit totožné kapacitní senzory se stejnými fyzikálními vlastnostmi a rozměry. Přesnost uspořádání jednotlivých vrstev a samotný proces termokomprese má stále velký vliv na uspořádání jednotlivých vrstev. Proces laminace termolisů stále přidává při výrobě do senzoru chybovost, kvůli čemuž nebylo docíleno nízké variability vzorků.



Graf 4-8: TYP 5 - Naměřené hodnoty na navrženém senzoru – 1. cyklus měření.



Graf 4-9: TYP 5 - Naměřené hodnoty na navržených senzoru – 2. cyklus měření.



Graf 4-10: TYP 5 – Ukázka hystereze senzoru číslo 4 – 1. cyklus měření.

#### 4.6 Navržený senzor – TYP 6

Tento návrh vznikl v reakci na naměřené hodnoty senzoru s menší vnitřní elektrodou. Na laserové řezačce byly vytvořeny kulaté elektrody s průměrem 55 mm viz Obr. 4.11. Změna byla, že při výrobě tohoto senzoru byla použita nová termoplastická mřížka. Od použití této termoplastické mřížky bylo očekáváno, že vydrží více pracích cyklů a zlepší se pevnost či pružnost kapacitního senzoru, než bylo u doposud používané termoplastické mřížky (Vliesofix Bondaweb).

Z naměřených hodnot viz Tab. 4-7 stojí za povšimnutí senzor číslo 4 a číslo 5. Poprvé ze všech vyrobených a měřených senzorů se zde jednalo o shodu naměřených hodnot. U senzorů 1 a 2 jsou zde také velmi podobné hodnoty, které jsou rozdílné pouze v jednotkách

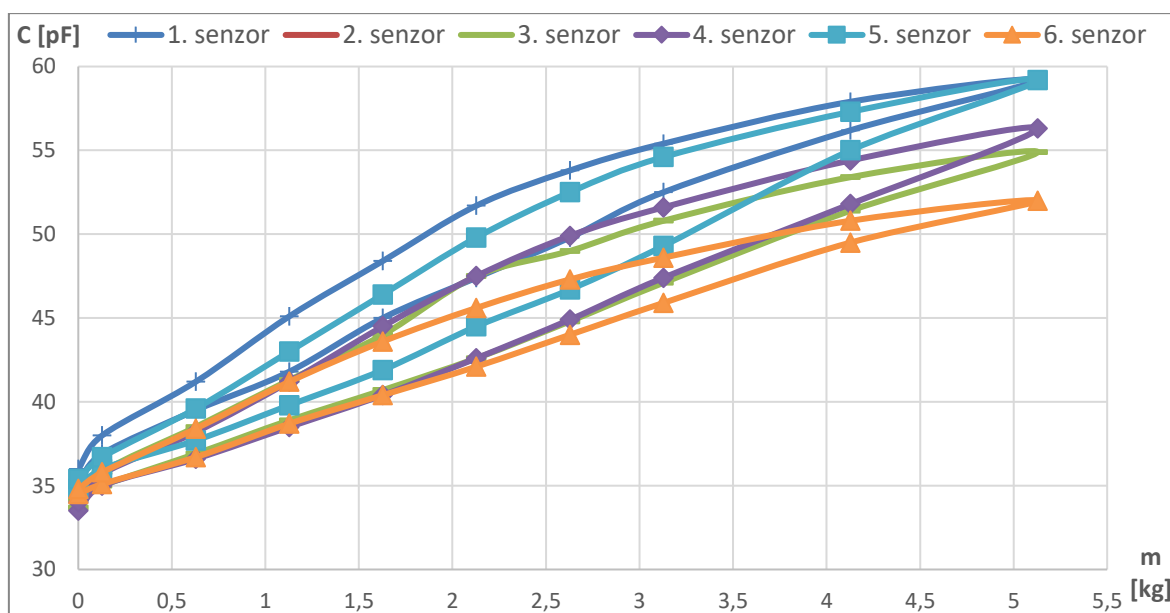
procent. Předpokládané zlepšení citlivosti senzoru a větší přesnosti je zde znatelné. Naměřené hodnoty všech senzorů jsou velmi příznivé. Z Graf 4-11 a Graf 4-12 je patrné, že kapacita všech senzorů stoupá při lineárním zatížení také téměř lineárně.



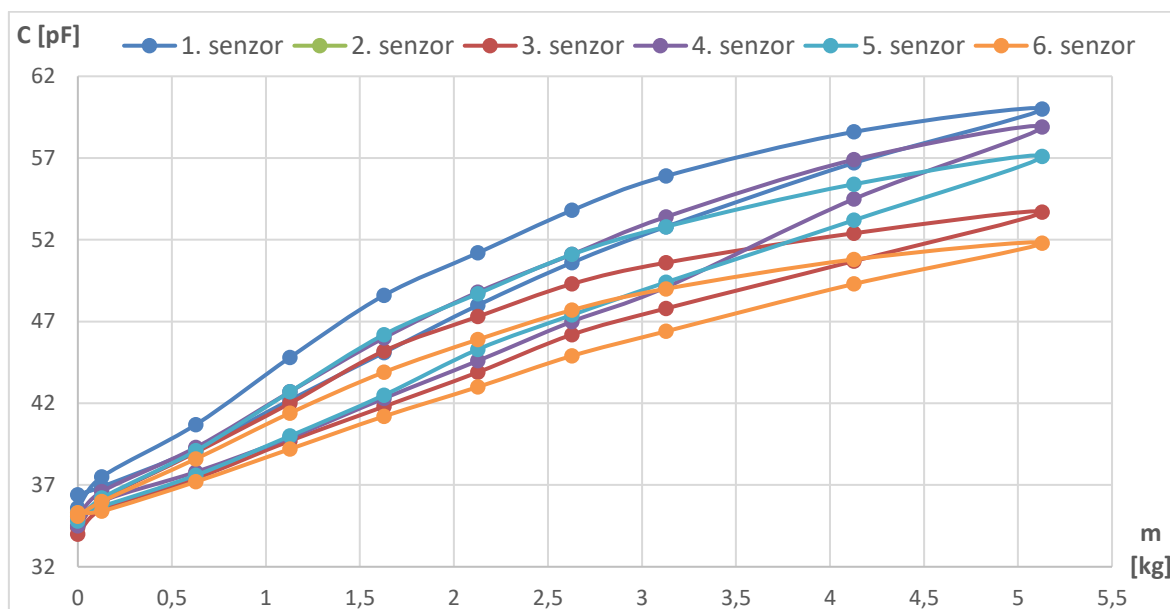
Obr. 4.11: Kruhová vnitřní vodivá textilie vyříznutá laserem.

Tab. 4-7: TYP 6 - měření před pracími cykly – 1. cyklus měření.

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	36	36,3	34,5	32,2	32,2	31,8
0,128	36,6	37,1	35,3	32,8	32,7	32,3
0,628	39,2	39,5	37,2	31,2	31,6	31,1
1,128	42,3	42	39,5	33,3	33,5	33
1,628	46	44,8	41,7	35,6	36	35,3
2,128	49,7	47,5	44,1	38,4	39	37,2
2,628	52,9	50,4	46,5	41,3	42,1	39,3
3,128	55,6	53,4	48,5	44,2	45	41,2
4,128	60,5	58,9	51,9	50	50	44,6
5,128	63	63	54,9	54,4	54,6	47,7
4,128	61,7	61,3	53,6	52,8	52,8	46,4
3,128	59	58,3	51,7	49,4	49,5	44,3
2,628	56,8	55,8	50,2	47,2	47,3	42,9
2,128	53,9	52,5	48,2	44,6	44,6	41,3
1,628	50,5	49,5	45,6	40,8	41,4	38,6
1,128	46	45,8	42,5	37,3	37,2	35,9
0,628	41,4	41,8	39,2	33,4	33,5	33
0,128	37,6	38,2	36,2	33,7	33,6	33,5
0	36,5	37	35,2	32,9	32,9	32,5



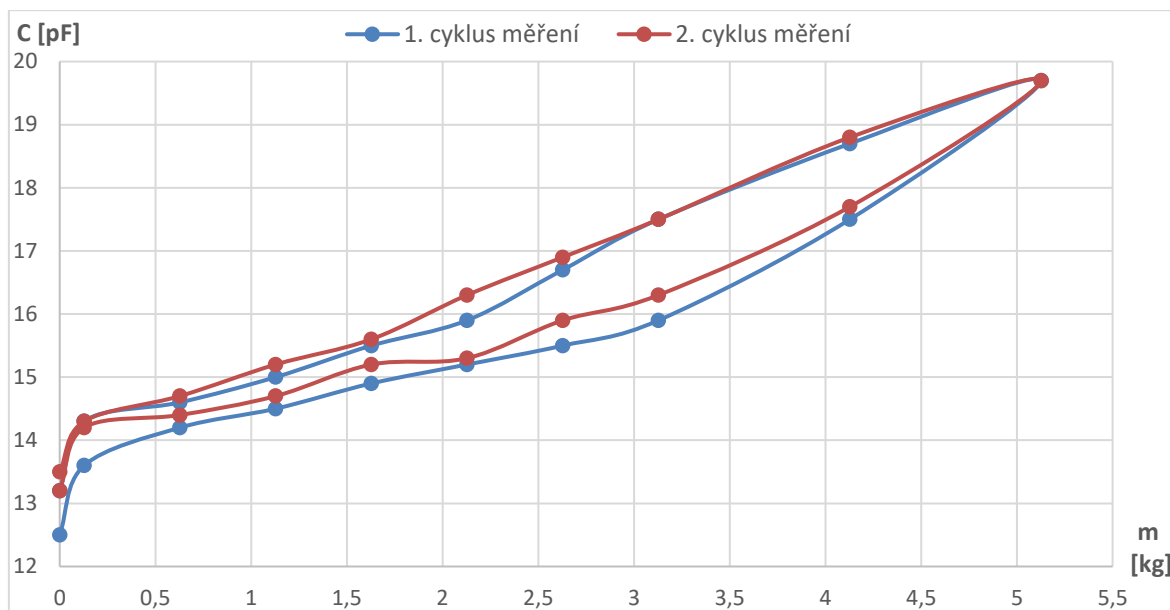
Graf 4-11: TYP 6 - Naměřené hodnoty senzorů s kruhovou vnitřní elektrodou – 1. cyklus měření.



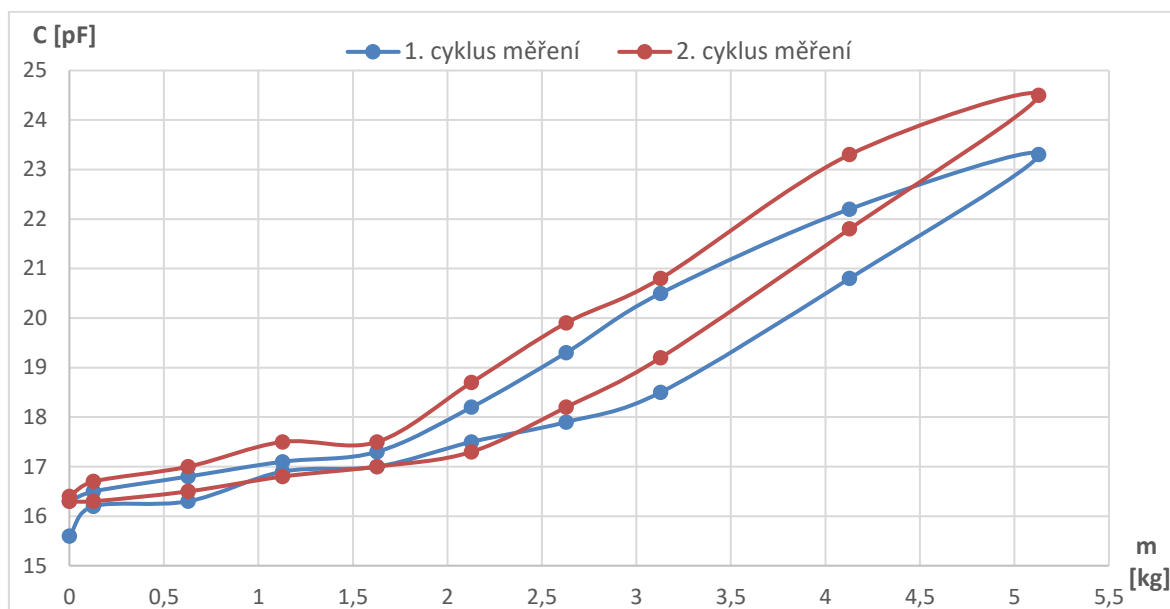
Graf 4-12: TYP 6 - Naměřené hodnoty senzoru s kruhovou vnitřní elektrodou – 2. cyklus měření.

## 4.7 Experimenty

V této části práce bylo navrženo několik experimentů pro ověření funkčnosti, paměťového efektu a vyloučení nerovnoměrného vlivu deformace 3D distanční pleteniny. Dva experimenty byly provedeny na sestavených kapacitních senzorech. Elektrody byly z měděné folie. Aby byla vyloučena deformace 3D pleteniny termokompresní laminací, byly všechny vrstvy k sobě slepeny oboustrannou lepicí páskou místo termoplastické mřížky. V Graf 4-13 je zobrazeno chování senzoru TYP 7 (viz Tab. 1). Druhý experimentální vzorek (TYP 8) měl stejnou konstrukci jako TYP 5.



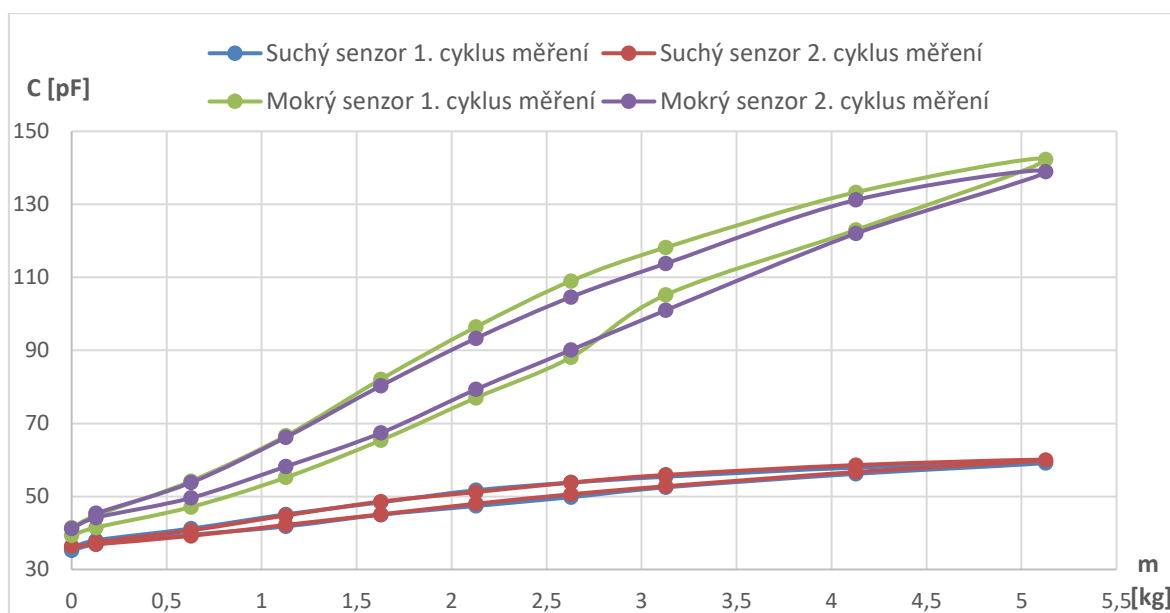
Graf 4-13: TYP 7 - Naměřené hodnoty senzoru s měděnými elektrodami – dva cykly měření.



Graf 4-14: TYP 8 - Naměřené hodnoty senzoru s měděnými elektrodami – dva cykly měření.

Jelikož se textilní senzor po dobu své životnosti s jistotou dostane do kontaktu s vlhkostí, byl experiment vyzkoušen s vlhkým senzorem, který obsahoval 8 g vody. Měření bylo provedeno se senzorem č. 6 senzoru TYP 5. Senzor prošel stejným procesem zatěžování jako senzory TYP1 – TYP6. V Graf 4-15 je zobrazen rozdíl mezi suchým a vlhkým senzorem. S vlhkostí dle předpokladů stoupá kapacita. Aby bylo zamezeno tomuto nárůstu kapacity, tento senzor je možné enkapsulovat membránou, aby byla zaručena nepropustnost vlhkosti.





Graf 4-15: TYP 5 – senzor č. 6 – experiment s vlhkým senzorem.

## 4.8 Senzory po pracích sériích

Textilní senzory mají výhodu své flexibility, ohebnosti a integrovatelnosti, ale jako každou jinou textilii je potřeba ji prát. Proto tyto senzory musí vydržet údržbu praním. Prací série byly dodržovány dle normy o praní [18]. Po každé sérii praní byl každý senzor znovu dvakrát změřen za stejných podmínek, jako byl měřen před pracími sériemi, aby byly zjištěny případné změny či nedostatky textilního kapacitního senzoru. Celkem byly senzory vyprány ve 4 pracích sériích, kde v každé sérii bylo provedeno 5 pracích cyklů. Výsledný počet pracích cyklů byl tedy 20 a některé senzory byly pracími cykly poznamenány více, některé méně.

### 4.8.1 Vodivé stuhy

Již po první prací sérii bylo znatelné fyzické poškození viz Obr. 4.12. Jednalo se o stuhu 7 (Tab. 4-3), která nesla jako jediná viditelné poškození. Ostatní stuhy nebyly viditelně poškozeny. Dle naměřených hodnot odporů na jednotlivých stuhách bylo zřejmé, že první prací cyklus měl vliv na každou stuhu. Hodnota odporu se u většiny z nich zvedla o 30 %.



Obr. 4.12: Stuha 7 po první sérii praní.

Po druhé prací sérii se hodnoty odporu u vodivých stuh, oproti předchozím hodnotám, zvedly pouze o 10 %. Problematické se staly netkané textilie Meflex, které po druhém pracím cyklu zvětšily svůj odpor téměř stonásobně. Po třetím pracím cyklu se odpor u vodivých stuh opět zvýšil o přibližně 10 %. Netkaná textilie Meflex 10 však ztratila své vlastnosti vodivé textilie a vykazovala již neměřitelný odpor. Netkaná textilie Meflex 30 znovu svoji hodnotu odporu stonásobila. Po čtvrtém cyklu praní se i netkaná textilie Meflex 30 změnila na nevodíč. Na Obr. 4.13 vidíme stuhu 7, na kterou měly prací cykly velký vliv, zejména na strukturu a její vzhled. Také na stuze 8 viz Obr. 4.14 je viditelné poškození.

Naměřené hodnoty po pracích sériích u netkané textilie Meflex byly očekávané. Sám výrobce si je vědom nedostatečné ochrany proti pracím cyklům.



Obr. 4.13: Stuha 7 po čtyřech pracích sériích.

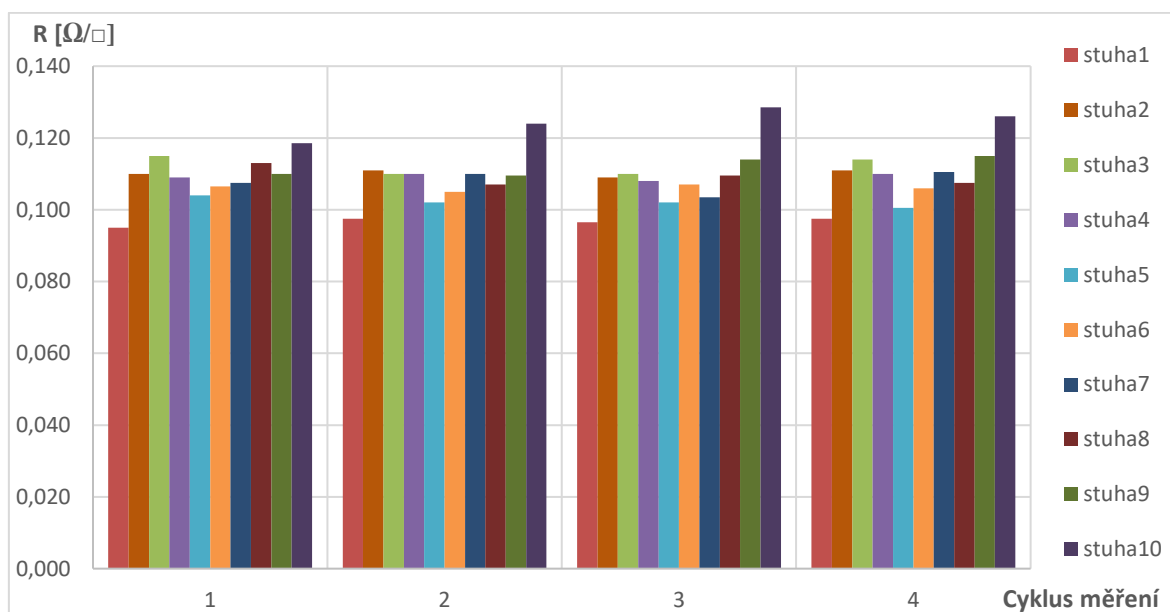


Obr. 4.14: Stuha 8 po čtyřech pracích sériích.

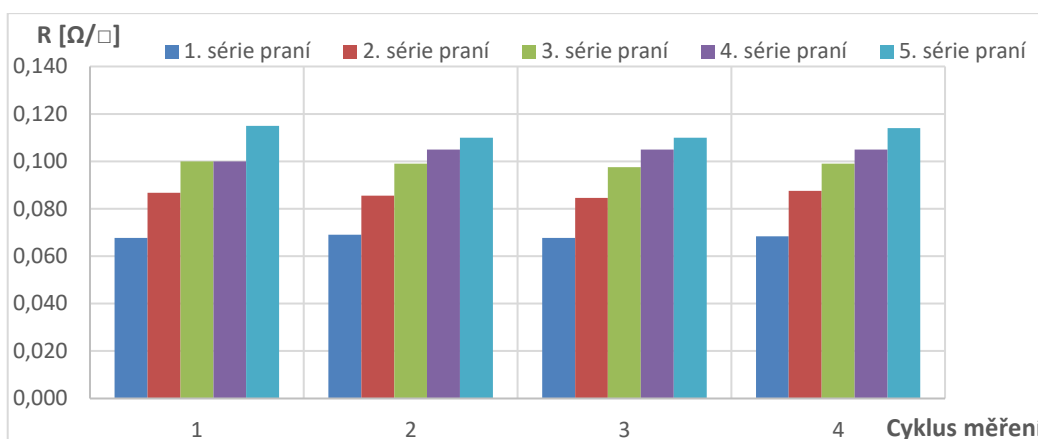
Výsledné naměřené hodnoty (Tabulka 4-8 a Graf 4-16) jsou oproti původním hodnotám zvýšené přibližně o 80 %. Nejlepší hodnoty vykazovala stuha 9 (Graf 4-18), kde se vodivý odpor stuhy po čtyřech sériích praní změnil pouze o 2 setiny ohmu. Naopak nejhůře dopadla stuha 3 (Graf 4-17), která svou hodnotu odporu téměř zdvojnásobila.

Tabulka 4-8: Naměřené hodnoty vodivých stuh po čtyřech pracích sériích.

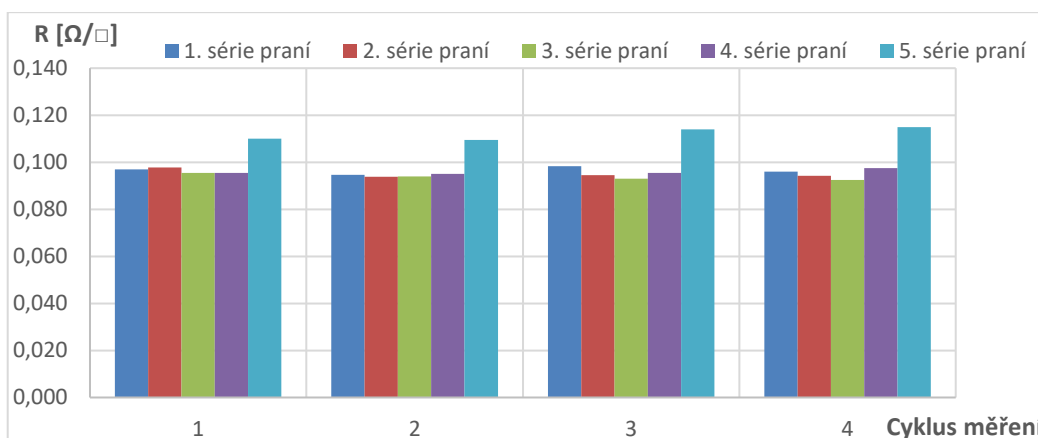
Cyklus měření	Stuha 1 [Ω/□]	Stuha 2 [Ω/□]	Stuha 3 [Ω/□]	Stuha 4 [Ω/□]	Stuha 5 [Ω/□]	Stuha 6 [Ω/□]	Stuha 7 [Ω/□]	Stuha 8 [Ω/□]	Stuha 9 [Ω/□]	Stuha 10 [Ω/□]	Meftex 10 [Ω/□]	Meftex 30 [Ω/□]
1	0,105	0,110	0,115	0,109	0,104	0,107	0,108	0,113	0,110	0,119	Inf.	Inf.
2	0,103	0,111	0,110	0,110	0,102	0,105	0,110	0,107	0,110	0,124	Inf.	Inf.
3	0,104	0,109	0,110	0,108	0,102	0,107	0,104	0,110	0,114	0,129	Inf.	Inf.
4	0,105	0,111	0,114	0,110	0,101	0,106	0,111	0,108	0,115	0,126	Inf.	Inf.



Graf 4-16: Hodnoty odporů všech měřených stuh po čtyřech pracích cyklech.



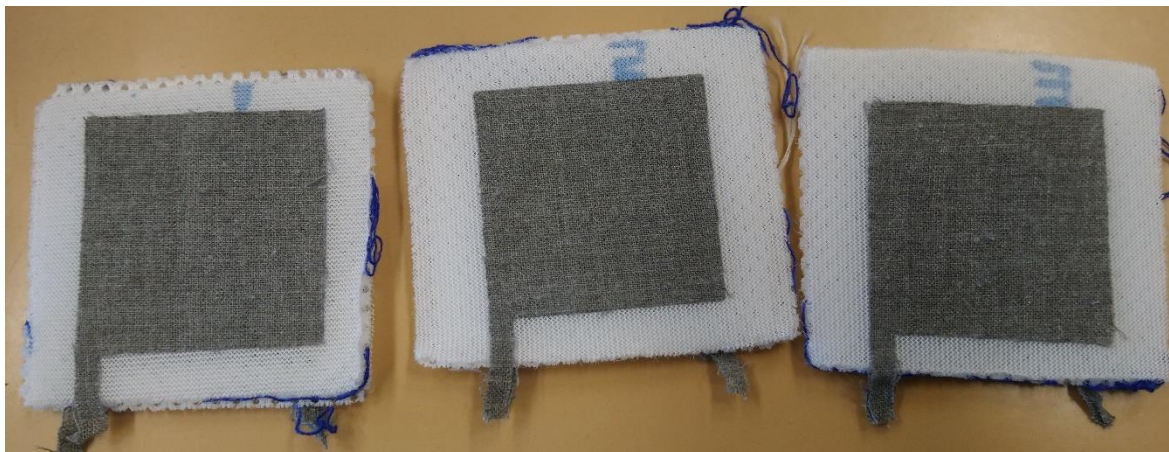
Graf 4-17: Stuha 3 – Velké rozdíly naměřených odporů po každém pracím cyklu.



Graf 4-18: Stuha 9 – Nepatrné rozdíly naměřených odporů po každém pracím cyklu.

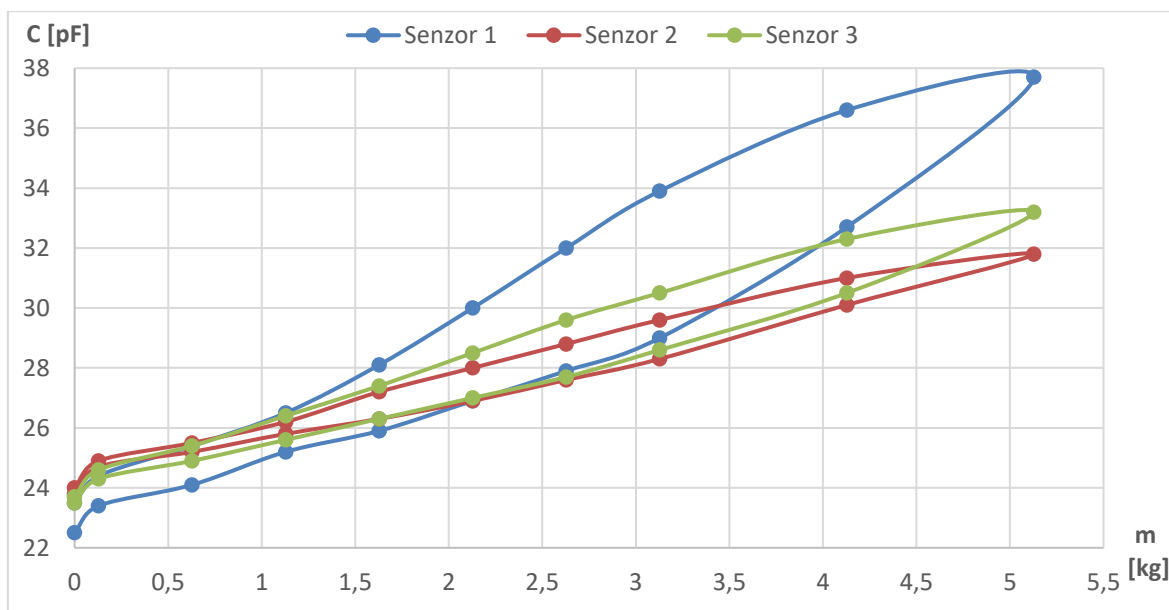
#### 4.8.2 Ošlchtované tlakové senzory – TYP 4

Z původních šesti senzorů byly vybrány tři senzory, které prošly všemi pracími sériemi. Na Obr. 4.15 lze vidět, že senzory vydržely mechanické působení sil a působení vody při pracích cyklech. Vizualně senzory nejevily velké poškození. S každým pracím cyklem se postupně zvyšovala kapacita senzorů, a to vlivem deformace 3D pleteniny mezi vrstvami. Po třetím pracím cyklu (viz Graf 4-19) je patrné, že vlastnosti senzoru byly stále zachovány. Senzory byly ještě vyprány ve čtvrtém cyklu. Zde se projevila únava materiálu a deformace senzoru. Naměřené hodnoty jeví známky nelinearity (viz Graf 4-20).

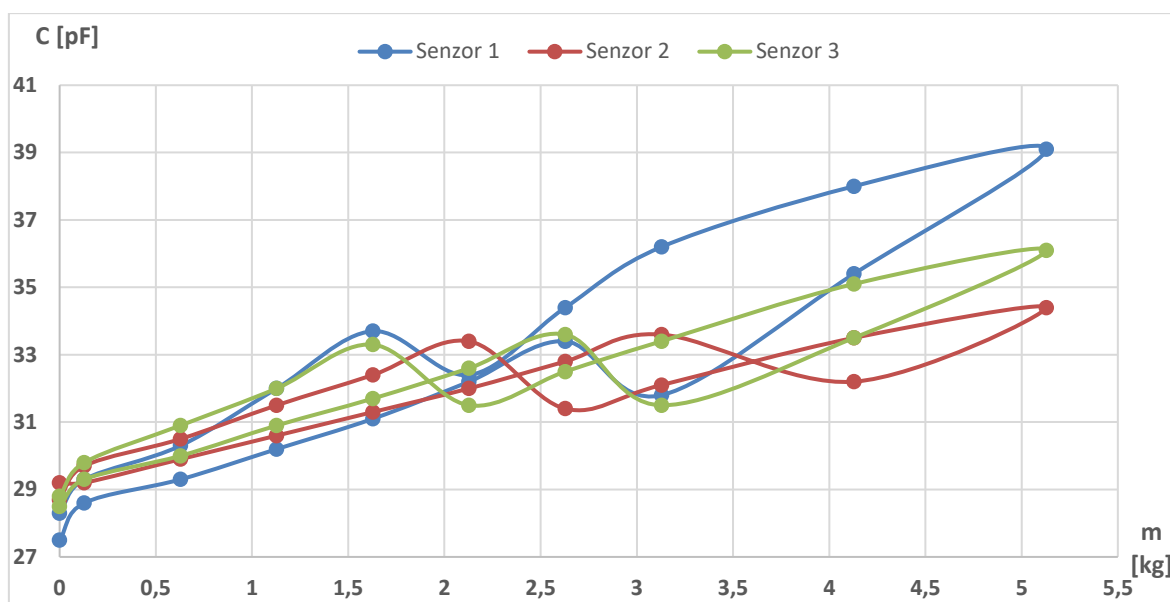


Obr. 4.15: TYP 4 – po čtyřech pracích sériích.

I přes ztrátu původní tuhosti a vlastností 3D pleteniny, po čtvrté práci sérii tyto senzory obstály ze všech vyrobených a měřených senzorů nejlépe, dle konstrukční odolnosti či naměřených hodnot.



Graf 4-19: TYP 4 - po třech pracích sériích – 1. cyklus měření.

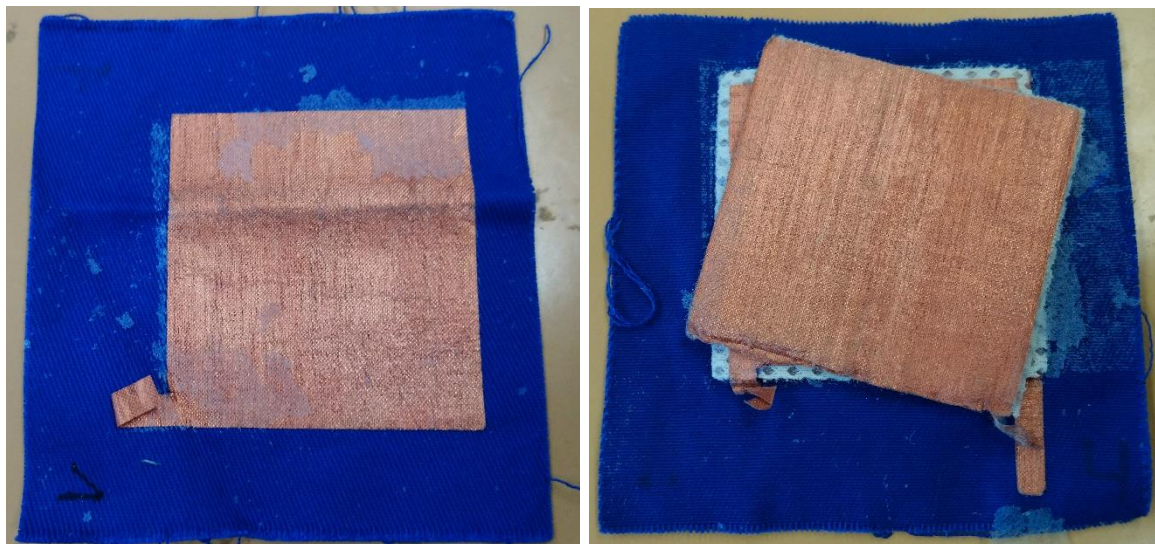


Graf 4-20: TYP 4 - po čtyřech pracích sériích – 1. cyklus měření.

#### 4.8.3 Navržený senzor – TYP 5

Senzory prošly první sadou prací série a stav senzorů nebyl podle očekávání. Výsledek byl neuspokojivý viz Obr. 4.16 a Obr. 4.17. Dle obrázků je zřejmé, že termoplastická mřížka nevydržela ani jeden prací cyklus (informace od asistenta) a pět senzorů bylo nutné vyřadit z měřicího procesu. Výjimkou se stal pouze senzor číslo 2, který zůstal v celku a vydržel celou první sérii nepoškozen. Ale i senzor číslo 2 se po druhém pracím cyklu rozpadl a hodnoty kapacit nebylo možné změřit.

Viníkem je pravděpodobně termoplastická mřížka, která měla špatnou adhezi s vodivou textilií a 3D pleteninou. Každý senzor byl rozložen v jiné vrstvě spoje, čímž nelze přesně říci co bylo přesně příčinou rozlepení spojů senzoru.



Obr. 4.16: TYP 5 – Poškození senzoru č. 1 po prvním pracím cyklu.



Obr. 4.17: TYP 5 – Poškození senzoru č. 4 po prvním pracím cyklu.

#### 4.8.4 Navržený senzor – TYP 6

V tomto navrhovaném senzoru došlo ke změně materiálu termoplastické mřížky. Bylo očekáváno, že pevnější a flexibilnější termoplastická mřížka, která obsahovala tavné polyamidové částice, bude po zalaminování držet pevněji jednotlivé vrstvy senzoru oproti

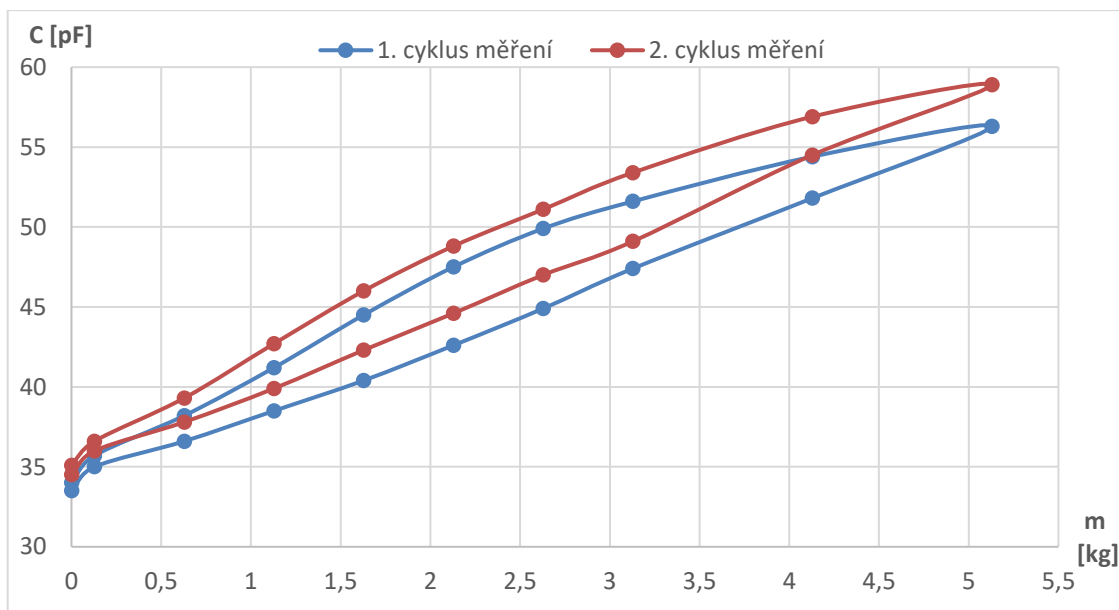
předchozímu typu termoplastické mřížky. Z Obr. 4.18 je zřejmé, že senzory byly nenávratně poškozeny. Nevyhovující výsledek se dostavil již po prvním cyklu praní z pěti. Jednalo se o senzory jedna, tři a pět. Senzor dva byl zcela zničen. Senzory čtyři a šest prací sérii úspěšně zvládly a bylo možné je použít pro další měření.



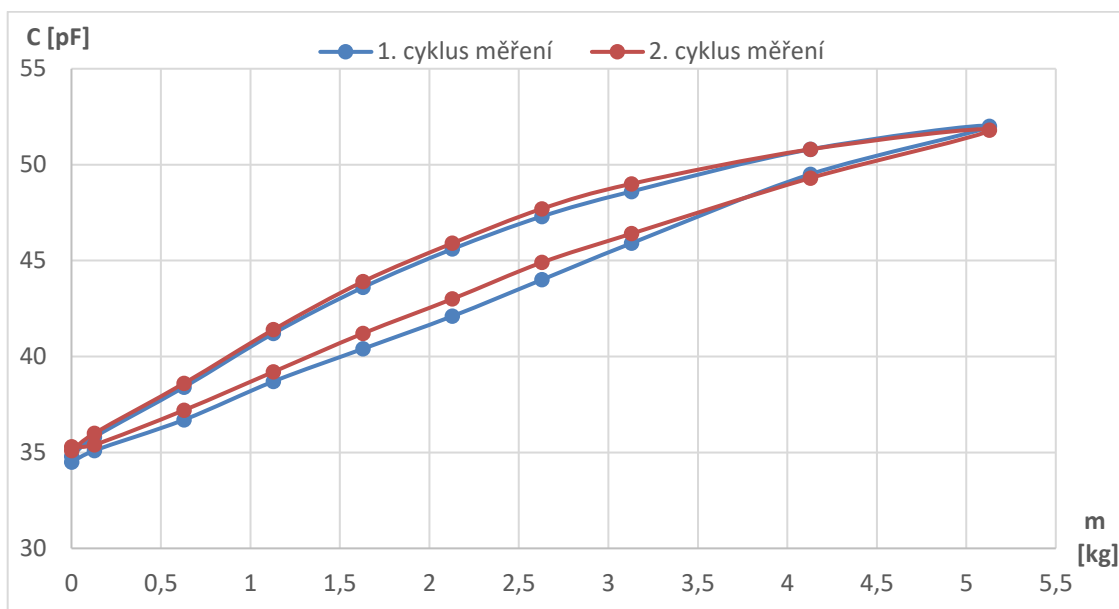
Obr. 4.18: TYP 6 – Poškození senzorů po první práci sérii.

Z následujících grafů je zřejmé, že si senzory zachovaly své kapacitní vlastnosti. Oproti původním naměřeným hodnotám je zde patrná změna kapacity senzorů z důvodu deformování flexibilní dielektrické vrstvy (3D pleteniny).





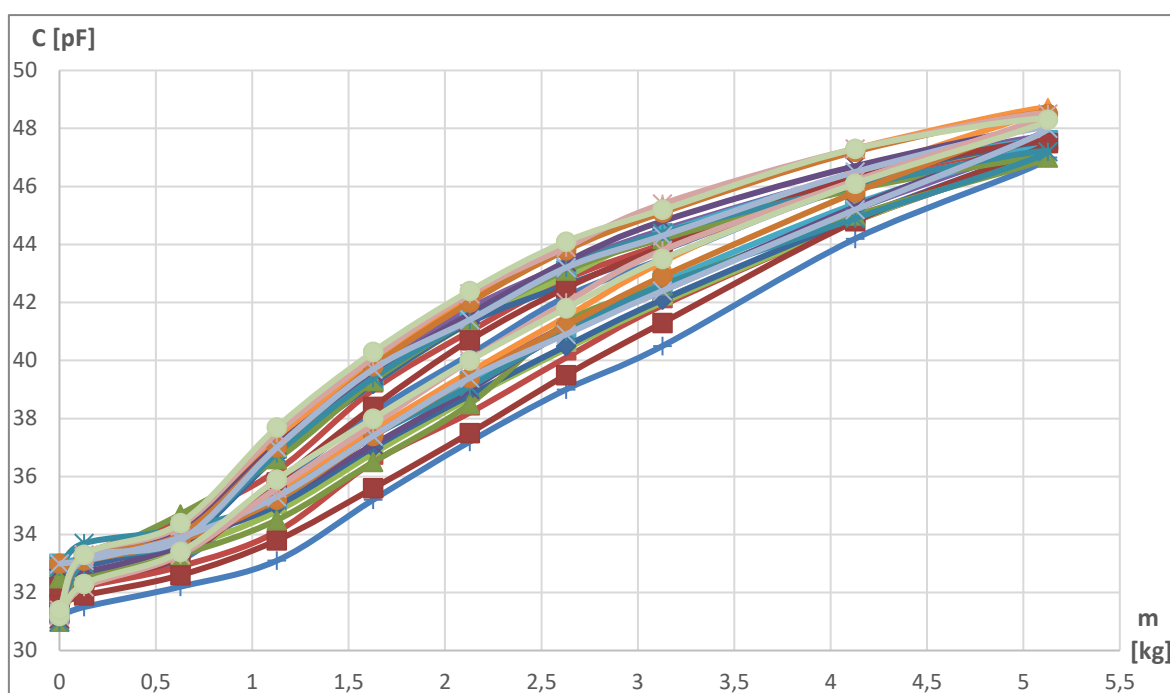
Graf 4-21: TYP 6 - senzor č. 4 po 1. prací sérii.



Graf 4-22: TYP 6 - senzor č. 6 po 1. prací sérii.

#### 4.9 Měření odolnosti vůči stlačení 3D pleteniny

V této části byla měřena odolnost vůči stlačení a rychlost zotavení 3D flexibilní pleteniny. Tato odolnost byla testována celkem šestnáctkrát za sebou. K měření byl vybrán senzor číslo šest TYPU 6. Z naměřených hodnot v Tab. 4-9 lze vyčíst, že tento senzor byl sestaven velmi dobře. V porovnání při nulovém zatížení, je rozptyl naměřených hodnot pouze 7,4 %. Hodnoty v bodě největšího zatížení jsou v 3,5 % rozptylu. Střední hodnoty se liší o 12,3 %.



Graf 4-23: TYP 6 – senzor č. 6 – odolnost vůči stlačení a rychlosti zotavení 3D flexibilní pleteniny.

Tab. 4-9: Test odolnost vůči stlačení a rychlost zotavení 3D flexibilní pleteniny na senzoru TYP 6.

zatížení [kg]	1. měření [pF]	2. měření [pF]	3. měření [pF]	4. měření [pF]	5. měření [pF]	6. měření [pF]	7. měření [pF]	8. měření [pF]
0	31,2	31,6	31,9	32,5	32,6	32,8	32,8	32,9
0,128	31,5	31,9	32,2	32,5	32,6	32,7	32,9	33,7
0,628	32,2	32,6	32,9	33,3	33,5	33,6	33,8	33,9
1,128	33,1	33,8	34,1	34,5	34,8	35,2	35	35,2
1,628	35,2	35,6	36,5	36,5	36,8	37,1	37	37,4
2,128	37,2	37,5	38,2	38,5	38,7	39	38,8	39,1
2,628	39	39,5	40,1	41,3	40,4	41	40,5	41
3,128	40,5	41,3	41,9	42,6	42	42,4	42,1	42,6
4,128	44,2	44,8	44,8	45	44,8	45,3	44,9	44,9
5,128	47	47,5	47,3	47	47,4	48	47,5	47,2
4,128	46	46,3	46,2	45,9	46,3	46,7	46,2	46
3,128	43,5	43,9	44	44,2	44,4	44,8	43,8	44,4
2,628	42,2	42,5	42,8	43,1	42,9	43,4	42,6	43,2
2,128	40,2	40,7	41	41,4	41,3	41,6	41,3	41,4
1,628	38,2	38,4	39	39,3	39,2	39,6	39,2	39,4
1,128	35,7	35,8	36,2	36,6	36,7	37,1	36,7	36,8
0,628	33,1	33,2	33,5	33,7	33,8	34,1	33,7	33,8
0,128	32,8	33	33,3	32,9	32,9	33	32,9	33
0	32	32,2	32,3	31	31	31,1	31	31
zatížení [kg]	9. měření [pF]	10. měření [pF]	11. měření [pF]	12. měření [pF]	13. měření [pF]	14. měření [pF]	15. měření [pF]	16. měření [pF]
0	32,9	33	33	33	31,1	31,2	33,4	31,2
0,128	32,9	33,1	33,2	33,1	33,2	32,2	33,3	33,3
0,628	33,8	33,8	33,9	33,9	33,3	33,3	31,4	33,4
1,128	35,4	35,2	35,3	35,3	35,5	35,6	35,2	35,9
1,628	37,4	37,4	37,5	37,4	37,6	37,8	37,7	38
2,128	39,4	39,4	39,3	39,4	39,6	40	40	40
2,628	41,2	41,2	41,1	40,9	41,5	42	41,5	41,8
3,128	42,5	42,9	42,7	42,4	43,4	43,8	43,3	43,5
4,128	45,2	45,8	45,4	45,2	46,4	46,2	45,7	46,1
5,128	47,7	48,5	47,6	48	48,7	48,5	48,3	48,3
4,128	46,4	47,2	46,4	46,5	47,3	47,3	47	47,3
3,128	44,5	45,1	44,4	44,3	45,3	45,4	44,9	45,2
2,628	43,3	43,8	43,1	43,2	43,9	43,9	43,6	44,1
2,128	41,8	42	41,6	41,4	42,2	42,3	42	42,4
1,628	39,8	39,8	39,3	39,7	40	40,1	40	40,3
1,128	37,4	37	37,1	37	37,3	37,5	37,7	37,7
0,628	34,1	34	34,1	33,8	34,3	34,3	34,5	34,4
0,128	33,1	33,2	33,1	33,2	33,3	33,3	33,3	33,3
0	31,2	31,2	31,3	31,3	31,3	31,4	31,4	31,4

## 5 Kriticky zhodnoťte navržený textilní tlakový senzor a navrhňte jeho aplikaci v praxi.

### 5.1 Nedostatky

Největší vliv na celkovou kapacitu senzoru má bezpochyby 3D distanční pletenina, která určuje parametr vzdálenosti při výpočtu a měření kapacity. V průběhu měření se tento materiál jevil jako jedna z největších slabin u všech kapacitních senzorů. Kapitola Měření 4.9 byla věnována tomuto problému. Opakované měření a zatěžování každý senzor deformovalo, a tím se měnily i jejich kapacity bez přiloženého zatížení. Příčinou je malý paměťový efekt 3D pleteniny – žádný ze vzorků se tak nechoval.

Při výrobě senzorů byly použity různé nástroje na řezání, oddělování a stříhání materiálů (laser, rotační řezací nůž, plotr). Po bližším prozkoumání vyšlo najevo, že na přesnost a funkci kapacitních senzorů nemá výrazný vliv způsob vyřezávání vodivých textilních elektrod.

Při výrobě byly použity dva druhy termoplastické mřížky (Vliesofix Bondaweb – bílá, lanier pickard, DHJ32000/X27 – černá). Ani jeden z těchto spojovacích materiálů není zatím dostatečně odolný vůči pracím cyklům, kde DHJ32000/X27 (černá) vykazoval výrazně horší vlastnosti oproti Vliesofix Bondaweb (bílá). Výjimkou zde byly senzory se šlichtovanou osnovou, kde se pravděpodobně setkaly dva vysoce adhezivní materiály. Černá termoplastická mřížka vykazovala dobré vlastnosti při laminaci s krycí modrou látkou senzorů. Řešením této problematiky by bylo vhodné najít materiál, který bude vykazovat znatelně lepší adhezi s termoplastickou mřížkou než námi použité materiály.

Navržené senzory byly dvouvrstvé (sendvičové), paralelně a vertikálně uspořádány nad sebou. Tento princip byl navržen kvůli větší citlivosti paralelního senzoru oproti sériovému, a také kvůli nadměrnému deformování a malému paměťovému efektu v případě jednovrstvého senzoru. Není zcela jisté, zda se 3D pletenina stlačuje sama do sebe či vzájemně do druhé vrstvy 3D pleteniny.

V kapacitních senzorech je důležité, aby zde byla nějaká záruka stálých hodnot kapacit a linearita hysterezních křivek. Prozatím je nutné najít kompromis mezi nejlepší citlivostí senzoru na malou zátěž (požadavek na měkkou 3D pleteninu). Naopak je potřeba vyšší tuhost 3D pleteniny pro zachování hysteréznosti.

Dalším nedostatkem se zde objevila důležitá vlastnost, kterou by textilní senzor měl

mít spíše jako výhodu, což je pratelnost. V průběhu celého experimentu se ukázalo, že na pratelnost a zároveň použitelná funkčnost senzoru, jsou tři prací série, tedy patnáct pracích cyklů pomyslnou stopkou. Další prací cyklus už vyřadil i prozatím nejodolnější šlichtované senzory. Senzory nebyly nijak fyzicky viditelně poškozeny, avšak své elektronické vlastnosti vykazovaly špatné hodnoty.

Pokovené netkané vodivé textilie po čtyřech pracích sériích již nevykazovaly žádnou elektronickou vodivost. Materiál Meftex 30 byl díky svým vlastnostem (vyšší míra pokovení mědi) o jednu prací sérii (3. prací série) lepší než Meftex 10. (2. prací série). Oba tyto materiály, po každém pracím cyklu měly veliké zvýšení odporu v násobcích stovek. Vizuálně se tyto senzory rapidně měnily.

Dle výsledků (provedených experimentů) se prozatím nedají navržené a vyrobené senzory používat, a to za přesné měření tlaku. Z téměř padesáti vyrobených textilních tlakových senzorů se podařilo vyrobit, s přijatelnými hodnotami, pouze dva páry senzorů, které by se daly považovat za identické, a tím i za spolehlivé senzory.

Výroba každého senzoru byla velice individuální. Byl kladen velký důraz na přesnost a pečlivost při laminaci senzorů. I přes snahu třech pracovníků se nepodařilo nezávisle na sobě vyrobit identické senzory.

Nevýhoda jakéhokoliv kapacitního senzoru, včetně tlakového, je rušení vnějšími vlivy. Jakákoliv parazitní kapacita či statický náboj v blízkosti senzoru může měřené údaje znehodnotit nebo dokonce senzor nenávratně poškodit.

## 5.2 Výhody:

Vodivé tkané textilie byly pracími cykly namáhány mechanicky, teplotně a chemicky. Lze označit za uspokojivé, že všechny tkané textilie měly po pracích cyklech stále dobré elektronické parametry, zejména elektrickou vodivost.

Potřebná pružnost u tlakových senzorů je zajištěna 3D distanční pleteninou. Ze zátěžového testu 4.9 lze říci, že i přes mírnou fluktuaci hodnot kapacity senzoru, je při stejném zatížení stále patrný mírný paměťový efekt 3D pleteniny. Takovéto tlakové senzory lze využít s určitou mírou tolerance v praxi.

Pozitivním výsledkem je, že všechny navržené a sestavené senzory jsou funkční. Kapacita každého senzoru reaguje dle předpokladů. Při zvyšování zátěže se elektrody k sobě

přibližují a roste kapacita senzoru. Při snižování zátěže se kapacita senzoru opět snižuje a kapacita se postupně vrací na svou původní hodnotu senzoru.

Tím byl plně splněn třetí bod zadání diplomové práce. Zvládlo se realizovat, změřit, vyprat a znovu proměřit textilní tlakový senzor.

Tento typ senzorů je možné integrovat do jakékoliv textilie, protože je možné vyrobit různé tvary a rozměry. Senzor je také velice flexibilní a do jisté míry i prateľný. Zcela určitě jsou textilní senzory zdravotně nezávadné, vyjma senzorů s elektrodami vyrobených z netkané textilie pokovené mědí. Zde je nutné zamezit přímého kontaktu s pokožkou např. přelaminování elektrody viz TYP 5.

Celková hmotnost senzoru je zanedbatelná. Senzor s vnitřní kruhovou elektrodou (TYP 6) s aktivní plochou  $24 \text{ cm}^2$ , kde se nachází 13 vrstev různých materiálů. váží pouze 8 g, což je nepatrná zátěž.

Realizaci senzoru s domácími pomůckami teoreticky zvládne doma každý. Výroba textilního senzoru je velmi jednoduchá.

Pokud by byl k dispozici vysoce adhezivní materiál ke spojení každé vrstvy, otevřely by se nové možnosti aplikace textilních kapacitních tlakových senzorů.

Nesporná výhoda textilních senzorů je jejich možné použití i pro velkoplošná měření. Pomocí maticového uspořádání senzorů, lze teoreticky sledovat nekonečně velkou plochu. V reálném měřítku lze tyto senzory použít pro monitorování plochy o několika metrů čtverečních, a zároveň je možné tento senzor vytvořit velice levně, oproti konvenčně dostupným tlakovým senzorům.

### **5.3 Vhodné aplikace:**

Díky textilnímu provedení se zde nabízí mnoho různých aplikací. Textilní tlakové kapacitní senzory lze aplikovat v oblasti automotive, například v sedačkách jako indikace přítomnosti osob či rozložení váhy na sedačkách. Senzory jsou také prodyšné a lépe odvádějí teplo.

Díky mechanickým vlastnostem 3D pleteniny, lze senzor využít jako spolehlivé monitorování trendu změny přítlaku. Tento senzor lze aplikovat ve zdravotnictví (sledování otoků různých končetin – otok se zvětšuje/zmenšuje).

Vlastnosti textilních senzorů jsou vhodné pro velkoplošné aplikace.

Tab. 10: Výhody a nevýhody textilních senzorů.

Výhody	Nevýhody
Flexibilita	Nutnost napájení
Nízká hmotnost	Mírný paměťový efekt 3D pleteniny
Nízká cena	Malá odolnost vůči
Možnost aplikace na velké plochy	Doposud málo dostupných materiálů
Snadná výroba	Malá mechanická odolnost
Široké možnosti využití	Nedostatečná odolnost vůči praní

## Závěr

Hlavním cílem předložené diplomové práce bylo navrhnout, realizovat a otestovat textilní tlakový senzor. Aby byla možná realizace takového senzoru, bylo nutné nastudovat problematiku chytrých textilií a jejich možné aplikace. Byla provedena rešerše, která se zabývala seznámením všech už již vytvořených textilních senzorů. Dalším krokem bylo vypracování rešerše, která se zabývá seznámením se se stávajícími aplikacemi a systémy, které již s touto problematikou pracují. Zde je popsáno několik experimentálních aplikací, které jsou již reálně vytvořené, ale ne komerčně dostupné. Všechny představené systémy a poznatky jsou shrnuty do literární rešerše v teoretické části této práce. Praktická část se věnuje samotnému návrhu a realizaci textilního tlakového senzoru. Je zde navrženo několik funkčních řešení. Realizované senzory byly podrobeny zátěžovým zkouškám, včetně pracích cyklů. Následně byly zhodnoceny naměřené výsledky a bylo navrženo několik vhodných aplikací týkající se realizovaných senzorů. Touto poslední kapitolou byly splněny všechny body zadání diplomové práce.

Praktická část a samotný návrh senzoru vycházel z klasické znalosti deskového kondenzátoru, kde se desky kondenzátoru navzájem překrývají. Byl zvolen senzor, který se skládá ze dvou kondenzátorů v paralelním zapojení, kde elektrody jednotlivých kondenzátorů jsou ve vertikálním uspořádání nad sebou. Tento návrh byl později upraven, byla zvolena menší vnitřní elektroda vůči elektrodám vnějším. Důvodem bylo dle Obr. 3.12 zamezit zkratování desek při výrobě senzoru. Tento krok byl vyhodnocen jako správný. Dále postupným zkoumáním senzorů byl senzor ještě mírně optimalizován, kdy vnitřní čtvercová elektroda byla nahrazena kruhovou. Toto opatření mělo eliminovat nepřesnosti při výrobě senzorů, což se prakticky ověřilo. Jelikož bylo snahou vytvořit tlakový senzor, který by byl použitelný v zdravotnickém prostředí, následná péče, byl brán zřetel na odolnost senzoru vůči pracím cyklům. Z provedených experimentů se ukázalo, že realizované senzory nemají dostatečnou odolnost vůči pracím cyklům, což je způsobeno zejména špatnou adhezí termoplastické mřížky vůči ostatním vrstvám senzoru.

Každý senzor byl zatěžován závažím od 0,128 kg do 5,128 kg. Byly zaznamenávány původní hodnoty každého senzoru ve dvou sériích měření. Dále byly senzory vystavovány pracím sériím po pěti pracích cyklech. Po každé sérii praní byl každý senzor znovu přeměřen ve dvou sériích měření. Jako nejodolnější a zároveň nejlepší adhezní materiál s termoplastickou mřížkou se jeví ošlichtovaná vodivá látka.



Současně s textilními senzory byly měřeny a prány textilní vodivé stuhu. Zde byla měřena a vyhodnocována vodivá látka vhodná pro další aplikace v chytrých textiliích. Z vyhodnocení naměřených hodnot se jako nejvhodnější jeví stuha 9 (viz Tab. 4-3), která po čtyřech pracích sériích zaznamenala nejmenší nárůst odporu na čtverec, což znamená změnu o méně než 10 %. V opačném případě nejhůře jeví stuha 3, kde byl nárůst odporu na čtverec 54 %.

Prací cykly nejvíce poznamenaly navržené senzory s vodivou netkanou textilií (3.2). Tyto senzory, s výjimkou jednoho, byly nenávratně poškozeny. Dále zde byly navrženy a vyrobeny senzory s ošlichtovanou vodivou textilií, které obsahovaly kruhovou vnitřní elektrodu a vrstvy byly k sobě laminovány jiným typem termoplastické mřížky. Tyto senzory také neobstály v zátěžové zkoušce pracími cykly. V souvislosti s pracími cykly se zde nabízí zcela jiná aplikace netkané textilie Meftex, kde bylo po každé práci sérii viditelné opotřebení vzorku. Tyto senzory by byly vhodné k indikaci počtu pracími cyklů.

V rámci práce bylo celkem provedeno 3242 měření. Po zkušenostech s touto četností měření se jeví jako nejproblémovější část kapacitního tlakového senzoru 3D distanční pletenina. Ta má, po každém měřícím cyklu, snahu se vracet do své výchozí polohy. Z výsledků je patrné, že každý měřící cyklus měl na distanční pleteninu vliv, kdy nenávratně o několik desetin procent zmenšoval její tloušťku viz experiment s touto problematikou - Tab. 4-9 – paměťový efekt viz nevýhody.

Textilní tlakové senzory mají širokou škálu použití a mnoho výhod, avšak je zde stále mnoho nevýhod, které prozatím nelze zanedbat. Omezení těchto senzorů se váže především na základní fyzikální principy a musí se s nimi správně manipulovat na samou hranu jejich správné funkčnosti k dosažení správného výsledku. Materiálové vlastnosti chytré textilie se postupným vývojem a výzkumem dostaly na dobrou úroveň a přináší lidem pozitivní přínos.

Zjištěné poznatky z předkládané práce mohou být vhodným podkladem pro další výzkum v oblasti kapacitních tlakových senzorů. V budoucnu by bylo vhodné zaměřit se na mechanickou odolnost těchto senzorů, které jsou v rámci pracími cyklů mezi termoplastickou mřížkou a vodivou textilií.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] “Soukup, R., Hamacek, A., Řeboun, J., Blecha, T., ‘Smart Textile-Based Protective System for Firefighters’. In Proceedings of the 5th Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC 2014. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engin.”
- [2] J. Kollár, “Diplomová Práce,” 2016.
- [3] C. C. Su, T. Liu, N. K. Chang, B. R. Wang, and S. H. Chang, “Two dimensional carbon nanotube based strain sensor,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 176, pp. 124–129, 2012.
- [4] J. Hofman, “Autor : Vedoucí práce ;,” 2015.
- [5] M. Schulz, “Einsatz kapazitiver Dehnungsmeßstreifen für statische Messungen bei hohen Temperaturen,” pp. 317–322, 1978.
- [6] Z. Li, L. Ye, J. Shen, K. Xie, and Y. Li, “Strain-gauge sensing composite films with self-restoring water-repellent properties for monitoring human movements,” *Compos. Commun.*, vol. 7, no. November 2017, pp. 23–29, 2018.
- [7] B. Morten, G. De Cicco, and M. Prudenziati, “Resonant pressure sensor based on piezoelectric properties of ferroelectric thick films,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 31, no. 1, pp. 153–158, 1992.
- [8] A. G. Leal-Junior *et al.*, “Polymer optical fiber strain gauge for human-robot interaction forces assessment on an active knee orthosis,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 41, no. February, pp. 205–211, 2018.
- [9] G. T. Pham, Y. Bin Park, Z. Liang, C. Zhang, and B. Wang, “Processing and modeling of conductive thermoplastic/carbon nanotube films for strain sensing,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 209–216, 2008.
- [10] X. Zhang, Y. Zhao, and X. Zhang, “Xuefeng Zhang, Yulong Zhao, Xuelei Zhang. Design and fabrication of a thin and soft tactile force sensor array based on conductive rubber [online]. 2012, , 273-279 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/02602281211257506>,” 2012.
- [11] B. Derby, “Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 395–414, 2010.
- [12] V. Kumar and S. Yadav, “Studies on use of lead iron tungstate-lead titanate relaxor binary system as a pressure sensing material,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 258, pp. 101–104, 2017.
- [13] Y. Huang *et al.*, “Self-similar design for stretchable wireless LC strain sensors,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 224, pp. 36–42, 2015.
- [14] M. McKnight, T. Agcayazi, H. Kausche, T. Ghosh, and A. Bozkurt, “Sensing textile seam-line for wearable multimodal physiological monitoring,” *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, vol. 2016-Octob, no. Layer 2, pp. 311–314, 2016.
- [15] J. Eom, W. Lee, and Y. H. Kim, “Textile-based wearable sensors using metal-nanowire embedded conductive fibers,” *Proc. IEEE Sensors*, vol. 1, pp. 1–3, 2017.

- 
- [16] J. Shi and S. Beeby, "Textile based ferroelectret for foot pressure sensor," *FLEPS 2019 - IEEE Int. Conf. Flex. Printable Sensors Syst. Proc.*, pp. 2–4, 2019.
- [17] X. Lin and B. C. Seet, "A Linear Wide-Range Textile Pressure Sensor Integrally Embedded in Regular Fabric," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 10, pp. 5384–5385, 2015.
- [18] "CSN EN 6330 Norma prani.pdf." .
- [19] Bochemie, "Meftex 10," 2020.
- [20] Bochemie, "Meftex 30," 2019.
- [21] F. E. Fajingbesi, A. W. Azman, Z. Ahmad, R. F. Olanrewaju, M. I. Ibrahimy, and Y. M. Mustafah, "Low Cost Piezoresistive Pressure Sensor Matrix for Pressure Ulcer Prevention and Management," *2019 7th Int. Conf. Mechatronics Eng. ICOM 2019*, no. 06, pp. 1–4, 2019.
- [22] Kießling/Matthes, "Textil- Fachwörterbuch," 1993.
- [23] V. P. R. O. Kompozity, "Obsah," pp. 1–57.

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Přehled textilních kapacitních senzorů.</i> .....	35
<i>Tab. 4-1: Naměřené hodnoty před vypráním - 1. cyklus měření – TYP 1.</i> .....	42
<i>Tab. 4-2: Naměřené hodnoty před vypráním 1. cyklus měření – TYP 2.</i> .....	44
<i>Tab. 4-3: Přehled parametrů jednotlivých vodivých stuh.</i> .....	47
<i>Tabulka 4-4: Naměřené hodnoty odporu na čtverec jednotlivých vodivých stuh.</i> .....	47
<i>Tab. 4-5: Naměřené hodnoty před vypráním - 1. cyklus měření – TYP 3.</i> .....	48
<i>Tab. 4-6: Naměřené hodnoty před vypráním 1. cyklus – TYP 4.</i> .....	51
<i>Tab. 4-7: TYP 6 - měření před pracími cykly – 1. cyklus měření.</i> .....	54
<i>Tabulka 4-8: Naměřené hodnoty vodivých stuh po čtyřech pracích sériích.</i> .....	59
<i>Tab. 4-9: Test odolnost vůči stlačení a rychlost zotavení 3D flexibilní pleteniny na senzoru TYP 6.</i> .....	67
<i>Tab. 10: Výhody a nevýhody textilních senzorů.</i> .....	71

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1: Diagram integrace chytrých textilií.</i> .....	13
<i>Obr. 1.2: Schéma funkčnosti e-technologie [2].</i> .....	14
<i>Obr. 1.3: Základní typy kapacitního senzoru [5].</i> .....	16
<i>Obr. 1.4: Maticová struktura [4].</i> .....	17
<i>Obr. 1.5: Popis principu tenzometrického prvku [6].</i> .....	17
<i>Obr. 1.6: Piezoelektrický senzor [7].</i> .....	18
<i>Obr. 1.7: Funkce optického senzoru [8].</i> .....	19
<i>Obr. 1.8: Působení sil na vlákno [8].</i> .....	19
<i>Obr. 1.9: Schéma piezoakustického prvku [10].</i> .....	20
<i>Obr. 1.10: Serpentinovitá struktura tlakového senzoru [11].</i> .....	20
<i>Obr. 1.11: Obecná struktura textilního tlakového senzoru [13].</i> .....	21
<i>Obr. 2.1: Průřez A-A ukazuje vlákno prošité skrz vnitřní tkaninu (vrstva 2) a vrstva textilie na straně kůže (vrstva 3). Průřez B-B ukazuje impedanční / kapacitní snímací vlákno prošité skrz vnitřní textilní vrstvu. Texel („textilní prvek“) adresující vlákna (tmavě šedá) jsou orientovány kolmo a jsou šity podél vnitřní textilní vrstvy [14].</i> ..	22
<i>Obr. 2.2: Pružný textilní senzor [15].</i> .....	24
<i>Obr. 2.3: Ferroelektrický senzor [16].</i> .....	26
<i>Obr. 2.4: Struktura ferroelektrického senzoru [16].</i> .....	26
<i>Obr. 2.5: Textilní tlakový senzor všitý do textilie [17].</i> .....	28
<i>Obr. 3.1: Schéma navrženého senzoru – TYP 1.</i> .....	29

Obr. 3.2: Schéma navrženého senzoru – TYP 5.....	30
Obr. 3.3: Struktura navrženého senzoru s kruhovou vnitřní elektrodou – TYP 6... 30	30
Obr. 3.4: Netkaná textilie pokovená Cu. ....	31
Obr. 3.5: Vyříznutá vodivá vrstva ze stuhy. ....	32
Obr. 3.6: Skládání vrstev před spečením. ....	32
Obr. 3.7: Třetí a druhá vrstva senzoru před přidáním první vodivé vrstvy. ....	32
Obr. 3.8: Výsledný tlakový kapacitní senzor bez textilní ochrany.....	33
Obr. 3.9: Výsledný tlakový kapacitní senzor bez textilní ochrany (z profilu).....	33
Obr. 3.10: Tlakový kapacitní senzor před dokončením (vlevo), dokončený (pravo). .....	33
Obr. 3.11: Výsledný tlakový senzor z profilu. ....	34
Obr. 3.12: Zkratované vodivé vrstvy. ....	34
Obr. 3.13: První vyrobený kus, před úpravou návrhu. ....	34
Obr. 4.1: Schéma zapojení, měření tlakového kapacitního senzoru.....	37
Obr. 4.2: Ukázka reálného zapojení při měření. ....	37
Obr. 4.3: Deformování senzorů pod působením postupného zatěžování. ....	38
Obr. 4.4: Ochranný vak určený pro praní senzorů. ....	39
Obr. 4.5: Senzory s elektrodou z Cu pokovené netkané textilie TYP 1 - Meftex 10 (nahore) a TYP 2 - Meftex 30 (dole).....	40
Obr. 4.6: TYP 1 - Kapacitní tlakový senzor s elektrodou z netkané textilie Meftex 10. .....	41
Obr. 4.7: Zatížený senzor – TYP 2. ....	43
Obr. 4.9: Ukázka měření vodivých stuh napětovo-proudovou metodou. ....	45
Obr. 4.8: Vodivé textilie – Vzorky stuh. ....	46
Obr. 4.10: Měřený tlakový senzor bez zatížení – TYP 3.....	49
Obr. 4.11: Kruhová vnitřní vodivá textilie vyříznutá laserem. ....	54
Obr. 4.12: Stuha 7 po první sérii praní. ....	58
Obr. 4.13: Stuha 7 po čtyřech pracích sériích.....	58
Obr. 4.14: Stuha 8 po čtyřech pracích sériích.....	59
Obr. 4.15: TYP 4 – po čtyřech pracích sériích.....	61
Obr. 4.16: TYP 5 – Poškození senzoru č. 1 po prvním pracím cyklu.....	63
Obr. 4.17: TYP 5 – Poškození senzoru č. 4 po prvním pracím cyklu.....	63
Obr. 4.18: TYP 6 – Poškození senzorů po první práci sérii.....	64

## Seznam grafů

Graf 4-1: TYP 1 - Změřené hodnoty senzorů TN1.1 - TN1.5 před pracími sériemi – 1. cyklus měření.....	41
Graf 4-2: TYP 2 - Změřené hodnoty senzorů, měření před pracími sériemi – 1. cyklus měření.....	43
Graf 4-3: TYP 2 - Změřené hodnoty senzorů, měření před pracími sériemi – 2. cyklus měření.....	44
Graf 4-4: Naměřené hodnoty odporu na čtverec vodivých stuh – před pracími sériemi.....	46
Graf 4-5: TYP 3 - Zobrazení chybovosti senzoru při vyšším zatížení – 1. cyklus měření.....	49
Graf 4-6: TYP 4 - Zobrazení chybovosti senzoru při vyšším zatížení – 1. cyklus měření.....	50
Graf 4-7: TYP 4 - Zobrazení chybovosti senzoru při vyšším zatížení – 2. cyklus měření.....	51
Graf 4-8: TYP 5 - Naměřené hodnoty na navrženém senzoru – 1. cyklus měření.....	52
Graf 4-9: TYP 5 - Naměřené hodnoty na navržených senzoru – 2. cyklus měření.....	53
Graf 4-10: TYP 5 – Ukázka hystereze senzoru číslo 4 – 1. cyklus měření.....	53
Graf 4-11: TYP 6 - Naměřené hodnoty senzorů s kruhovou vnitřní elektrodou – 1. cyklus měření.....	55
Graf 4-12: TYP 6 - Naměřené hodnoty senzoru s kruhovou vnitřní elektrodou – 2. cyklus měření.....	55
Graf 4-13: TYP 7 - Naměřené hodnoty senzor s měděnými elektrodami – dva cykly měření.....	56
Graf 4-14: TYP 8 - Naměřené hodnoty senzor s měděnými elektrodami – dva cykly měření.....	56
Graf 4-15: TYP 5 – senzor č. 6 – experiment s vlhkým senzorem.....	57
Graf 4-16: Hodnoty odporů všech měřených stuh po čtyřech pracích cyklech.....	59
Graf 4-17: Stuha 3 – Velké rozdíly naměřených odporů po každém pracím cyklu.....	60
Graf 4-18: Stuha 9 – Nepatrné rozdíly naměřených odporů po každém pracím cyklu.....	60
Graf 4-19: TYP 4 - po třech pracích sériích – 1. cyklus měření.....	61
Graf 4-20: TYP 4 - po čtyřech pracích sériích – 1. cyklus měření.....	62
Graf 4-21: TYP 6 - senzor č. 4 po 1. práci sérii.....	65
Graf 4-22: TYP 6 - senzor č. 6 po 1. práci sérii.....	65
Graf 4-23: TYP 6 – senzor č. 6 – odolnost vůči stlačení a rychlosti zotavení 3D flexibilní pleteniny.....	66

## Přílohy

### TYP 1 – 2. cyklus měření před vypráním

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]
0	21,6	20,8	20,9	21,5	21,4
0,128	27,9	25,9	27,3	27	26,7
0,628	29	26,8	28,7	28,1	28
1,128	29,9	27,4	29,3	29	28,9
1,628	31	28	30	30,2	29,7
2,128	32,6	28,9	30,7	31,2	30,7
2,628	34,7	29,8	31,5	32,2	31,6
3,128	32,5	30,9	32,4	33,1	32,5
4,128	37,1	33,7	34,6	35,1	34,8
5,128	40,8	36,1	34,8	37	37,1
4,128	39,4	35,1	33,2	36	35,9
3,128	36,9	33,6	34,8	34,6	34
2,628	34,7	32,2	33,3	33,5	33
2,128	37	30,9	32	32,3	31,9
1,628	34,1	29,4	31	31,1	30,7
1,128	31,6	28,2	30	29,8	29,6
0,628	29,8	27,2	29	28,7	28,5
0,128	28,4	26,2	27,4	27,1	26,9
0	21,9	21	21	21,4	21,6

### TYP 2 - 2. cyklus měření před vypráním

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]
0	21,5	20,8	21,4	21,6	21,6
0,128	27,1	27,6	28,4	27,4	27,2
0,628	28,3	28,9	29,6	28,6	28,1
1,128	29,1	30	30,8	29,5	28,8
1,628	30	31,3	32	30,5	29,9
2,128	31,1	32,7	33,2	31,8	30,3
2,628	32,2	33,9	34,6	33,1	30,9
3,128	33,3	35,2	35,9	34,6	31,8
4,128	36,3	32,4	33,5	34,1	34,1
5,128	34,1	34,3	37,6	37,3	33,2
4,128	33	33,2	36,4	36,2	37,2
3,128	36,2	35,7	34,1	33,9	34
2,628	34,8	35,5	32,7	32,3	32,8
2,128	33,2	34,3	35	35,3	31,6
1,628	31,7	32,7	34,1	33	30,5
1,128	30,3	31,1	32,2	31,1	29,5

0,628	28,9	29,6	30,5	29,4	28,6
0,128	27,5	28	28,8	27,8	27,6
0	21,7	21,1	21,6	21,9	21,7

**1. prací série – stuhy**

cyklus měření	Stuha 1 [Ω/□]	Stuha 2 [Ω/□]	Stuha 3 [Ω/□]	Stuha 4 [Ω/□]	Stuha 5 [Ω/□]	Stuha 6 [Ω/□]	Stuha 7 [Ω/□]	Stuha 8 [Ω/□]	Stuha 9 [Ω/□]	Stuha 10 [Ω/□]	Meftex 10 [Ω/□]	Meftex 30 [Ω/□]
1	0,084	0,082	0,087	0,090	0,087	0,084	0,098	0,091	0,098	0,090	1,308	0,387
2	0,083	0,081	0,086	0,091	0,096	0,084	0,090	0,092	0,094	0,089	1,338	0,666
3	0,087	0,082	0,085	0,092	0,090	0,086	0,089	0,090	0,095	0,087	1,290	0,399
4	0,088	0,088	0,088	0,092	0,099	0,089	0,090	0,093	0,094	0,088	1,356	0,744

**2. prací série – stuhy**

cyklus měření	Stuha 1 [Ω/□]	Stuha 2 [Ω/□]	Stuha 3 [Ω/□]	Stuha 4 [Ω/□]	Stuha 5 [Ω/□]	Stuha 6 [Ω/□]	Stuha 7 [Ω/□]	Stuha 8 [Ω/□]	Stuha 9 [Ω/□]	Stuha 10 [Ω/□]	Meftex 10 [Ω/□]	Meftex 30 [Ω/□]
1	0,095	0,098	0,100	0,100	0,094	0,092	0,094	0,095	0,096	0,105	120,000	26,000
2	0,093	0,096	0,099	0,094	0,093	0,091	0,094	0,092	0,094	0,105	230,000	37,250
3	0,093	0,096	0,098	0,096	0,091	0,090	0,091	0,092	0,093	0,098	177,500	37,500
4	0,093	0,096	0,099	0,095	0,090	0,091	0,105	0,092	0,093	0,099	55,000	37,500

**3. prací série – stuhy**

cyklus měření	Stuha 1 [Ω/□]	Stuha 2 [Ω/□]	Stuha 3 [Ω/□]	Stuha 4 [Ω/□]	Stuha 5 [Ω/□]	Stuha 6 [Ω/□]	Stuha 7 [Ω/□]	Stuha 8 [Ω/□]	Stuha 9 [Ω/□]	Stuha 10 [Ω/□]	Meftex 10 [Ω/□]	Meftex 30 [Ω/□]
1	0,095	0,100	0,100	0,100	0,094	0,097	0,100	0,100	0,096	0,109	Inf.	2000
2	0,098	0,100	0,103	0,105	0,094	0,098	0,110	0,105	0,095	0,097	Inf.	1750
3	0,097	0,100	0,100	0,105	0,093	0,097	0,100	0,105	0,096	0,109	Inf.	1900
4	0,098	0,100	0,103	0,105	0,094	0,098	0,110	0,105	0,098	0,097	Inf.	2050

**TYP 3 - 2. cyklus měření před vypráním**

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	31,2	31,2	30,4	30	30,7	30,3
0,128	32	31,8	31,3	30,9	31	31,1
0,628	32,5	32,5	32	31,4	31,6	31,8
1,128	33,2	33,2	32,6	32,2	32,3	32,5
1,628	34	34	33,3	32,9	33,4	33,3
2,128	34,9	34,7	34,2	33,9	34,2	33,7
2,628	35,7	35,4	35,2	34,9	35,4	35
3,128	36,6	36,3	36,8	36,3	32,1	39,6
4,128	33,6	33,4	37	35,4	35,8	32,2
5,128	37,6	35,3	41,5	40,3	41,5	34,3
4,128	36,5	34,4	39,8	38,8	39,7	33,5
3,128	34,4	33,1	37	35,8	36,4	32,2
2,628	33,2	32,2	35,6	33,8	34,4	36,2



2,128	32	36	32,7	36,5	32,4	35,1
1,628	35,5	35	35,2	34,7	35,1	34,1
1,128	34,3	34	33,8	33,2	33,6	33,2
0,628	33,1	33	32,7	32,1	32,3	32,4
0,128	32,1	32,2	31,7	31,2	31,3	31,5
0	31,2	31,3	30,7	30,4	30,4	30,6

**TYP 4 - 2. cyklus měření před vypráním**

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	30,5	30,7	29,8	30,4	30,2	30,1
0,128	31	31,5	30,6	31,2	30,9	31,2
0,628	31,7	32,2	31,1	31,7	31,6	31,9
1,128	32,3	32,9	31,6	32,4	32,4	32,5
1,628	33,1	33,7	32,1	33,1	33,3	33,2
2,128	34,1	34,3	32,7	33,8	34,2	34,1
2,628	35,2	34,9	33,4	34,6	35	35
3,128	36,5	35,5	34,2	35,4	36	36,3
4,128	35,3	32,2	36	32,7	33,6	33,5
5,128	40,6	33,4	33,1	35,8	36	37,3
4,128	39,2	32,7	32,2	34,8	34,9	36,1
3,128	36,1	36,3	35,7	33,1	33	33,8
2,628	34,1	35,6	34,8	32,1	32,2	32,7
2,128	32,2	35	33,8	35,6	35,9	36
1,628	35,1	34,2	33	34,3	34,5	34,7
1,128	33,6	33,4	32,2	33,2	33,3	33,5
0,628	32,4	32,6	31,5	32,3	32,2	32,4
0,128	31,4	31,7	30,8	31,5	31,3	31,5
0	30,6	30,9	30	30,7	30,5	30,8

**TYP 5 - 1. cyklus měření před vypráním**

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	30,5	30,6	30	32	31,2	30,8
0,128	31,3	31,5	30,8	32,2	31,9	31,6
0,628	31,9	32,2	31,3	32,8	32,6	32,3
1,128	32,5	32,9	31,8	33,4	33,4	32,9
1,628	33,2	33,5	32,4	34	34,1	33,5
2,128	33,9	34,2	32,9	34,7	35	34,4
2,628	34,9	34,8	33,6	35,3	35,8	35
3,128	36,3	35,4	34,3	36,1	36,7	35,9
4,128	34,7	32,2	36,2	32,9	33,6	33,4
5,128	40,1	33,8	33,1	35,5	37,2	37,5
4,128	38,7	33	32,5	34,5	35,8	36,2
3,128	35,6	36,6	35,9	32,8	34	34
2,628	33,8	35,9	35	32	33	32,8

2,128	32	35,1	34,1	35,9	32	36,3
1,628	34,9	34,3	33,2	34,9	35,5	35
1,128	33,7	33,4	32,5	34,1	34,4	33,8
0,628	32,5	32,6	31,8	33,2	32,3	32,9
0,128	31,7	31,7	31,1	32,5	31,5	31,9
0	30,8	30,8	30,3	31,7	30,7	31,1

**TYP 5 - 2. cyklus měření před vypráním**

zatížení [kg]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	4. senzor [pF]	5. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	34,6	38	39,4	36,6	34,8	36,8
0,128	35,1	38,5	39,6	37,1	35,4	37,2
0,628	35,9	39,6	40,1	38,3	36,3	38
1,128	36,7	40,8	41,2	39,3	37,3	38,9
1,628	37,8	42,3	42,7	40,6	38,5	39,8
2,128	38,9	44,3	44,4	42,1	39,8	41
2,628	40,5	47,1	46,3	43,4	41,4	42,3
3,128	42,4	49,6	48,7	44,6	42,8	43,8
4,128	48,1	54,2	53,9	47,9	45,9	47,3
5,128	55,7	60,2	60,5	52,1	48,6	51,5
4,128	53,1	57,3	57,9	50,2	47,2	49,6
3,128	48,8	53,6	53,3	47,2	44,8	46,5
2,628	45,8	51,5	50,9	45,5	43,4	44,8
2,128	42,1	48,3	48,3	43,9	41,4	42,8
1,628	40	45,2	45,6	42,1	39,7	41,3
1,128	38,3	42,6	43	40,5	38,2	39,9
0,628	37	40,7	41,2	38,9	36,9	38,7
0,128	35,8	39,1	39,6	37,6	35,7	37,6
0	35,2	38,5	39	37	35,2	37,1

**TYP 4 - 1. cyklus měření po 1. sérii praní**

zatížení [kg]	1. měření			2. měření		
	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]
0	21,1	21,57	21,3	20,2	21,2	21,1
0,128	21,4	22,4	21,9	20,8	22,4	21,8
0,628	22,37	22,9	22,4	21,4	23,2	22,5
1,128	23,1	23,5	23,2	22,2	23,7	23,2
1,628	23,9	24,1	23,9	23,1	24,3	23,9
2,128	24,7	24,7	24,7	24,1	25	24,7
2,628	25,8	25,2	25,5	25,3	25,6	25,4
3,128	27,2	25,9	26,2	26,7	26,3	26,3
4,128	31	27,5	28,2	30,3	28,1	27,9
5,128	31,5	29,6	30,2	31,6	29,8	30,2
4,128	33,5	28,8	29,3	33,1	28,9	29,2
3,128	31,5	27,3	27,9	31,1	27,6	27,8

2,628	30,7	26,5	27	29,7	26,8	26,9
2,128	28,5	25,6	26	27,8	25,9	26
1,628	26,3	24,9	25	25,6	25,2	24,9
1,128	24,8	24,1	24,1	23,7	24,4	24
0,628	23,4	23,4	23,2	22,4	23,6	23,2
0,128	22,3	22,7	22,2	21,2	22,9	22,3
0	21,4	21,7	21,5	20,3	22,3	21,4

**TYP 4 – 1. a 2. cyklus měření po 2. sérii praní**

zatížení [kg]	1. měření			2. měření		
	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]
0	22,8	23,1	23,6	23,3	22,7	23,1
0,128	23,6	23,9	24,3	24,1	23,5	23,8
0,628	24,26	24,5	25	24,9	24	24,4
1,128	25,03	25,2	25,6	25,6	24,6	25,2
1,628	25,85	25,7	26,3	26,5	25,2	25,9
2,128	27	26,4	27,1	27,6	25,9	26,7
2,628	28	27	27,9	29,1	26,6	27,5
3,128	29,55	27,7	28,7	30,5	27,3	28,3
4,128	31,2	29,3	30,5	31,1	29	30,1
5,128	34,3	31,7	32,8	34,4	31,4	32,4
4,128	33,3	30,7	31,8	33,3	30	31,6
3,128	31,3	29,2	30,3	31	28,7	29,9
2,628	32,4	28,3	29,5	32,8	27,6	28,9
2,128	30,6	27,4	28,5	31,9	27	27,9
1,628	28,4	26,6	27,5	28,9	26,2	26,9
1,128	26,7	25,8	26,5	26,9	25,4	25,8
0,628	25,2	25	25,5	25,7	24,7	24,9
0,128	24,2	24,3	24,7	24,5	24,4	23,9
0	23,3	23,4	23,9	23,4	23,5	23,1

**TYP 4 – 1. a 2. cyklus měření po 3. sérii praní**

zatížení [kg]	1. měření			2. měření		
	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]
0	22,8	23,1	23,6	23,3	22,7	23,1
0,128	23,6	23,9	24,3	24,1	23,5	23,8
0,628	24,26	24,5	25	24,9	24	24,4
1,128	25,03	25,2	25,6	25,6	24,6	25,2
1,628	25,85	25,7	26,3	26,5	25,2	25,9
2,128	27	26,4	27,1	27,6	25,9	26,7
2,628	28	27	27,9	29,1	26,6	27,5
3,128	29,55	27,7	28,7	30,5	27,3	28,3
4,128	31,2	29,3	30,5	31,1	29	30,1
5,128	34,3	31,7	32,8	34,4	31,4	32,4

4,128	33,3	30,7	31,8	33,3	30	31,6
3,128	31,3	29,2	30,3	31	28,7	29,9
2,628	32,4	28,3	29,5	32,8	27,6	28,9
2,128	30,6	27,4	28,5	31,9	27	27,9
1,628	28,4	26,6	27,5	28,9	26,2	26,9
1,128	26,7	25,8	26,5	26,9	25,4	25,8
0,628	25,2	25	25,5	25,7	24,7	24,9
0,128	24,2	24,3	24,7	24,5	24,4	23,9
0	23,3	23,4	23,9	23,4	23,5	23,1

**TYP 4 – 1. a 2. cyklus měření po 4. sérii praní**

zatížení [kg]	1. měření			2. měření		
	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]
0	27,5	29,2	28,5	28,7	28,4	28,9
0,128	28,6	29,2	29,3	29,6	29,4	29,8
0,628	29,3	29,9	30	30,3	30,1	30,5
1,128	30,2	30,6	30,9	31,2	30,8	31,3
1,628	31,1	31,3	31,7	32,1	31,4	32,1
2,128	32,2	32	32,6	33,2	32,1	33
2,628	33,4	32,8	33,6	31,7	33	33,9
3,128	31,8	33,6	31,5	33,1	33,8	31,8
4,128	35,4	32,2	33,5	36,8	32,4	34,8
5,128	39,1	34,4	36,1	40,3	34,6	37,3
4,128	38	33,5	35,1	39,2	33,6	36,3
3,128	36,2	32,1	33,4	36,7	32,2	34,4
2,628	34,4	31,4	32,5	35,6	31,3	33,1
2,128	32,4	33,4	31,5	33,7	33,5	32,1
1,628	33,7	32,4	33,3	33,6	32,4	33,8
1,128	32	31,5	32	31,7	31,5	32,5
0,628	30,3	30,5	30,9	31,2	30,7	31,3
0,128	29,3	29,7	29,8	30	29,8	30,2
0	28,3	28,7	28,8	29	28,8	29,2

**TYP 6 – 1. cyklus měření před vypráním**

zatížení [kg]	1. měření					
	1. senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]	1 senzor [pF]	2. senzor [pF]	3. senzor [pF]
0	37,4	37,2	34,4	31,6	31,8	31,7
0,128	38,2	38,1	34,9	32,1	32,3	32,3
0,628	40,7	40,7	36,7	32	33,9	31
1,128	43,4	43,2	38,6	32,9	32,6	32,7
1,628	46,7	45,7	40,9	35	35	34,7
2,128	50	48,4	43,3	37,4	37,6	36,6
2,628	53,8	51	45,5	39,7	41	38,6
3,128	56,4	53,4	47,7	42,4	43,8	40,5

4,128	62,3	59,5	51,8	47,9	49,9	44,8
5,128	66,7	65	55,1	52,8	54,5	47,5
4,128	65	62,9	53,7	51,3	52,8	46,2
3,128	61,2	59	51,6	48,2	49,4	44
2,628	58,9	56,7	50	45,7	46,9	42,5
2,128	55,7	54,1	48,1	43	43,7	40,7
1,628	51,9	50,9	45,3	39,7	40,8	38,5
1,128	47,3	47,4	42,1	36,5	36,9	35,9
0,628	43	43,4	38,7	33	33,3	33
0,128	39,5	39,5	35,8	33,3	33,6	33,3
0	37,6	38,2	34,9	32,5	32,7	32,4

**TYP 6 – 1. cyklus měření po 1. sérii praní**

zatížení [kg]	4. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	33,5	34,5
0,128	35	35,1
0,628	36,6	36,7
1,128	38,5	38,7
1,628	40,4	40,4
2,128	42,6	42,1
2,628	44,9	44
3,128	47,4	45,9
4,128	51,8	49,5
5,128	56,3	52
4,128	54,4	50,8
3,128	51,6	48,6
2,628	49,9	47,3
2,128	47,5	45,6
1,628	44,5	43,6
1,128	41,2	41,2
0,628	38,2	38,4
0,128	35,7	35,8
0	34	34,8

**TYP 6 – 2. cyklus měření po 1. sérii praní**

zatížení [kg]	4. senzor [pF]	6. senzor [pF]
0	34,5	35,3
0,128	36	35,4
0,628	37,8	37,2
1,128	39,9	39,2
1,628	42,3	41,2
2,128	44,6	43
2,628	47	44,9
3,128	49,1	46,4

4,128	54,5	49,3
5,128	58,9	51,8
4,128	56,9	50,8
3,128	53,4	49
2,628	51,1	47,7
2,128	48,8	45,9
1,628	46	43,9
1,128	42,7	41,4
0,628	39,3	38,6
0,128	36,6	36
0	35,1	35,1

**TYP 7**

zátěž [kg] \ vzorek	prototyp 1. vrstva, měděná folie		
	1. měření	2. měření	
0	12,5	0	13,2
0,128	13,6	0,128	14,2
0,628	14,2	0,628	14,4
1,128	14,5	1,128	14,7
1,628	14,9	1,628	15,2
2,128	15,2	2,128	15,3
2,628	15,5	2,628	15,9
3,128	15,9	3,128	16,3
4,128	17,5	4,128	17,7
5,128	19,7	5,128	19,7
4,128	18,7	4,128	18,8
3,128	17,5	3,128	17,5
2,628	16,7	2,628	16,9
2,128	15,9	2,128	16,3
1,628	15,5	1,628	15,6
1,128	15	1,128	15,2
0,628	14,6	0,628	14,7
0,128	14,3	0,128	14,3
0	13,2	0	13,5

**TYP 8 a vlhký senzor TYP 6**

zatížení [kg]	1. měření			zatížení [kg]	2. měření		
	prototyp 1. vrstva, měděná folie	TYP 6 – č. 6	vlhký senzor 6 - 8g vody		prototyp 1. vrstva, měděná folie	TYP 6 – č. 6	vlhký senzor 6 - 8g vody
0	12,5	35,2	39,4	0	13,2	36,4	41,2
0,2	13,6	36,9	41,5	0,2	14,2	36,9	44,2
0,5	14,2	39,5	47,1	0,5	14,4	39,2	49,6
1	14,5	41,8	55,2	1	14,7	42,2	58,2
1,5	14,9	45	65,4	1,5	15,2	45,1	67,4
2	15,2	47,4	77	2	15,3	48	79,3
2,5	15,5	49,8	88,1	2,5	15,9	50,6	90,1
3	15,9	52,5	105,2	3	16,3	52,8	101
4	17,5	56,2	123	4	17,7	56,7	122
5	19,7	59,2	142,3	5	19,7	60	139
4	18,7	57,9	133,3	4	18,8	58,6	131,2
3	17,5	55,4	118,2	3	17,5	55,9	113,8
2,5	16,7	53,8	109	2,5	16,9	53,8	104,6
2	15,9	51,7	96,4	2	16,3	51,2	93,3
1,5	15,5	48,4	82,1	1,5	15,6	48,6	80,3
1	15	45,1	66,6	1	15,2	44,8	66,2
0,5	14,6	41,2	54,2	0,5	14,7	40,7	53,8
0,2	14,3	38	44,8	0,2	14,3	37,5	45,4
0	13,2	36	41,5	0	13,5	35,6	42,1