

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta

**Piezoelektrické taktilní senzory**  
bakalářská práce

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

Autor práce: Klíma Lukáš

PRAHA 2017

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lukáš Klíma

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

**Piezelektrické taktilní senzory**

Název anglicky

**Piezoelectric tactile sensors**

---

## Cíle práce

Cílem práce je provést rešerši taktilních senzorů se zaměřením na piezelektrické senzory.

## Metodika

Seznámit se s principy taktilních senzorů.

Provést rešerši taktilních senzorů se zaměřením na piezelektrické senzory.

## **Doporučený rozsah práce**

do 40 stran

## **Klíčová slova**

Piezelektrický, taktilní, senzor

---

## **Doporučené zdroje informací**

Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha 2010

LEE, M.H., NICHOLLS, H.R. Review Article Tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey: The Science of Intelligent Machines. Mechatronics. 1999, vol. 9, issue 1, s. 1-31.

R. E. SAAD., et. al. Tactile Sensing. 2000 CRC Press LLC

Robot, DF. Piezo Disk Vibration Sensor. DF Robot. [Online] 12. květen 2004. [Citace: 19. březen 2013.]

[http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&product\\_id=399#.UWBYQaKeNOJ](http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&product_id=399#.UWBYQaKeNOJ).

Volf, J.: Taktilní informace. Praha : Automa, 2008.

Volf, J.: Užití taktilních čidel pro měření v biomedicíně. AUTOMATIZACE, roč.49, No.1. Praha 2006

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2016/17 LS – TF

## **Vedoucí práce**

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

## **Garantující pracoviště**

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2017

**prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2017

## **Prohlášení**

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

datum:

podpis:

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu prof. Ing. Jaromíru Volfovi, DrSc., za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

**Abstrakt:** Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši taktilních senzorů s detailnějším zaměřením na piezoelektrické taktilní senzory. V první kapitole je popsán fyzikální piezoelektrický jev, který je stavebním kamenem piezoelektrických taktilních senzorů. Tato práce dále obsahuje nejpoužívanější materiály, které jsou schopny piezoelektrického jevu. Jsou zde popsány konkrétní materiály od monokrystalických, polykrystalických a polymerních látek. Další kapitola je zaměřena na taktilní senzory, jejich výhody a nevýhody, použití a jejich princip. Jsou zde popsány taktilní senzory s elastomerem, s tenzometrem, piezorezistivní senzory, kapacitní, optovláknové senzory a piezoelektrické senzory. Poslední kapitola se zabývá praktickým využitím piezoelektrických senzorů. Jsou zde popsány principy a výroba senzorů, které lze využít v medicíně, biomechanice nebo robotice.

**Klíčová slova:** piezoelektrický, taktilní, senzor

**Abstract:** The aim of this study was survey of tactile sensors focused on piezoelectric tactile sensors. Piezoelectric phenomenon which is basis of piezoelectric tactile sensors is described in first chapter. The most used materials that have piezoelectric properties are described in next chapter. There is piece of each kind of monocrystals, polycrystallines and polymers. Next chapter is focused on tactile sensors, its advantages and disadvantages, use and principle. In this study are described tactile sensors with elastomer, tactile sensors with strain gauge, piezoresistive sensors, capacitive sensors, optical sensors and piezoelectric tactile sensors. The last chapter is focused on practical application of piezoelectric tactile sensors. Piezoelectric tactile sensors are used in medicine, biomechanic and robotic technology, in this paper is a few application examples.

**Key words:** piezoelectric, tactile, sensor

## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Piezoelektrický jev .....	2
2.1	Druhy piezoelektrických jevů.....	3
2.1.1	Podélný piezoelektrický jev.....	4
2.1.2	Příčný piezoelektrický jev .....	4
2.2	Piezoelektrické konstanty a vlastnosti .....	5
2.2.1	Youngův modul .....	6
2.2.2	Curierova teplota .....	6
3	Piezoelektrické materiály .....	7
3.1	Piezoelektrické krystaly .....	7
3.1.1	Křemen .....	7
3.1.2	Turmalín .....	8
3.2	Piezoelektrická keramika .....	9
3.2.1	PZT keramika .....	9
3.3	Piezoelektrické polymery .....	10
4	Taktilní senzory pro automatizaci .....	11
4.1	Dělení taktilních senzorů .....	11
4.1.1	Výhody a nevýhody taktilních senzorů .....	12
4.2	Taktilní snímače s elastomery.....	13
4.2.1	Plantograf V12.....	15
4.2.2	FSR Senzory .....	17
4.2.3	Senzory s odporovou vrstvou .....	18
4.2.4	FSS-SMT senzor.....	19
4.3	Snímače s tenzometry .....	20
4.4	Kapacitní senzory .....	21
4.5	Optovláknové senzory .....	22
4.5.1	Mikroohybové senzory .....	23
4.5.2	Senzory se vzájemnou optickou vazbou.....	24
4.5.3	Optovláknové senzory se změnou tlumení .....	25
5	Piezoelektrické taktilní senzory .....	26
5.1	Náhradní schéma piezokrystalu .....	26
5.1.1	Výpočet součástí náhradního schéma.....	28
5.2	Konstrukce piezoelektrických taktilních senzorů .....	29
6	Praktické využití piezoelektrických senzorů.....	31
6.1	Použití piezoelektrického taktilního senzoru v endoskopii .....	31
6.1.1	Mechanismus senzoru.....	31
6.1.2	Výroba senzoru .....	32
6.1.3	Dispozice pro dynamické měření .....	33
6.1.4	Testování senzoru .....	33
6.2	Aplikace piezoelektrického taktilního senzoru v robotické ruce.....	34
6.2.1	Dispozice senzoru .....	35
6.2.2	Princip robotické ruky .....	35
6.3	Piezoelektrický kapacitní taktilní senzor .....	36
6.3.1	Výroba senzoru .....	36
6.3.2	Testování senzoru .....	37
6.4	Piezoelektrický flexibilní senzor .....	37
6.4.1	Složení senzoru .....	38
7	Závěr.....	39
8	Seznam použitých zdrojů .....	40

# 1 Úvod

V dnešní době je člověk stále více nahrazován automatizovanými řídicími systémy, které jsou schopné řídit procesy mnohem efektivněji. Automatizace nemusí být vždy řešena částečně, ale může být soustředěna na komplexní automatizaci, u které není potřeba dohled pracovníka. Pro zavedení automatizace hraje roli mnoho důvodů, například pracovní prostředí s nepříznivými účinky na lidské tělo a zdraví, zvýšení produktivity práce, snížení nákladů atp. Automatizovaní roboti musejí být schopní reagovat na informace, které dostávají interakcí s okolním prostředím.

Taktilní informace, je informace, která je generována při kontaktu s různými předměty. Jako zdroj taktilní informace, která je odesílána do lidského mozku slouží hmat. Pro vytvoření taktilní informace v robotice nebo biomechanice se používají taktilní senzory, které se snaží hmatu co nejvíce podobat.

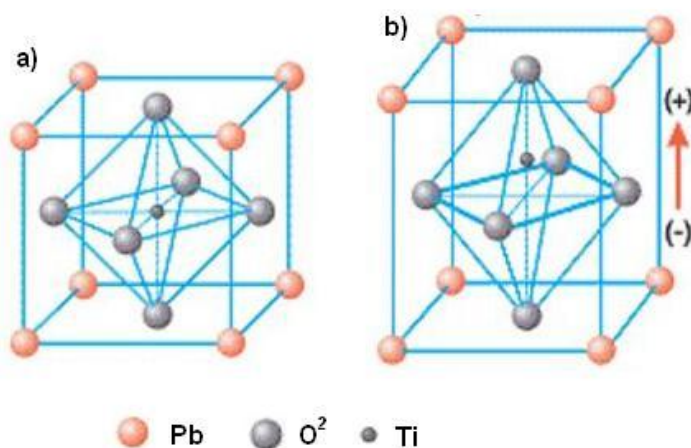
Předmětem této bakalářské práce je rešerše taktilních senzorů a jejich konstrukce, s detailnějším zaměřením na princip a praktické využití piezoelektrických taktilních senzorů. První kapitola této práce vypovídá o piezoelektrickém jevu, který je základem piezoelektrických taktilních senzorů. Jsou zde přiblíženy podmínky vzniku piezoelektrického jevu a jeho podstatné vlastnosti. Druhá kapitola je zaměřena na materiály, které mají piezoelektrické vlastnosti. Jsou popsány jak přírodní materiály, tak materiály v kombinaci přírodních a syntetických složek. Třetí kapitola je věnována rešerši taktilních senzorů, kde jsou popsány jejich druhy, které se principem liší od piezoelektrických taktilních senzorů. Obsahem kapitoly čtvrté jsou piezoelektrické taktilní senzory, jejich konstrukce a výpočet náhradního schématu. V páté kapitole se pojednává o praktickém využití piezoelektrických senzorů.



## 2 Piezoelektrický jev

V roce 1880 bratři Curierovi objevili zvláštní jev krystalů ze skupiny dielektrik. Zjistili, že pokud na krystal bude působit namáhání (tah, tlak, krut, ohyb), objeví se na povrchu krystalu elektrický náboj. Pokud krystal vytvoří náboj tímto způsobem, mluvíme o přímém piezoelektrickém jevu. O rok později bratři Curierovi potvrdili i jev nepřímý tzv. elektrostrikcí. Při tomto jevu se krystal dokáže deformovat působením elektrického pole. Po zmizení napětí se dielektrikum vrací do původní podoby. Intenzita elektrického pole je přímo úměrná mechanické deformaci piezoelektrických krystalů. :[12]

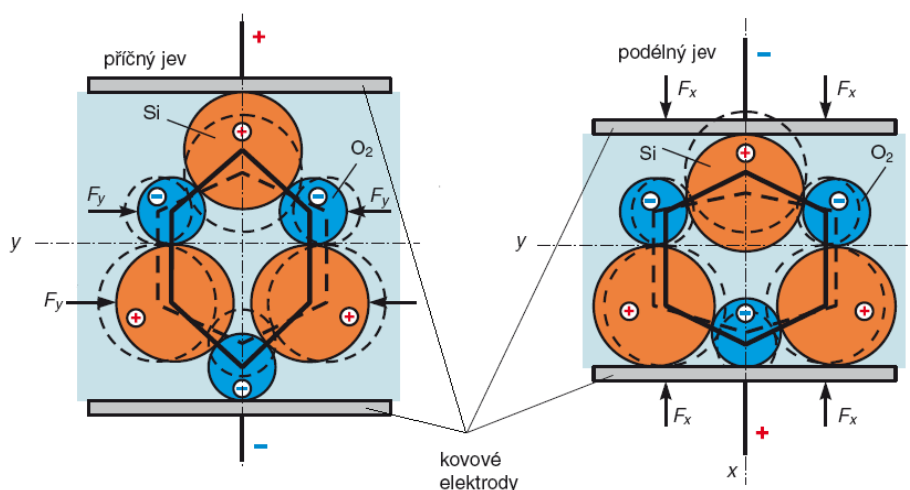
Základem dielektrika jsou ionty, atomy nebo molekuly. Jejich uspořádání vzájemně kompenzuje okolní působení kladných a záporných elektrických nábojů. Pokud je toto normální uspořádání porušeno vnější silou, pak kladně i záporně nabitě částice vytvoří dipóly a na povrchu krystalu se vytvoří elektrický náboj. Na elektrodách, které jsou připojeny ke krystalu, bude náboj s opačnou polaritou, než je orientace dipólů v krystalu. Mezi nábojem a vnější silou je přímá úměra. Piezoelektrický jev zásadně souvisí s krystalovou souměrností. Pokud má krystal střed souměrnosti, piezoelektrický efekt u něj nevznikne. Proto se pro piezoelektrický efekt používají krystaly, které nemají střed souměrnosti. *Obr. 2.1* znázorňuje krystalovou symetrickou a nesymetrickou strukturu. :[1], [10], [12]



*Obr. 2.1* Krystalová struktura piezokeramiky a) nad Curierovou teplotou  
b) pod Curierovou teplotou [20]

Osy krystalu jsou pro piezoelektrický efekt nepostradatelné - osa elektrická (X), osa mechanická (Y), osa optická (Z).

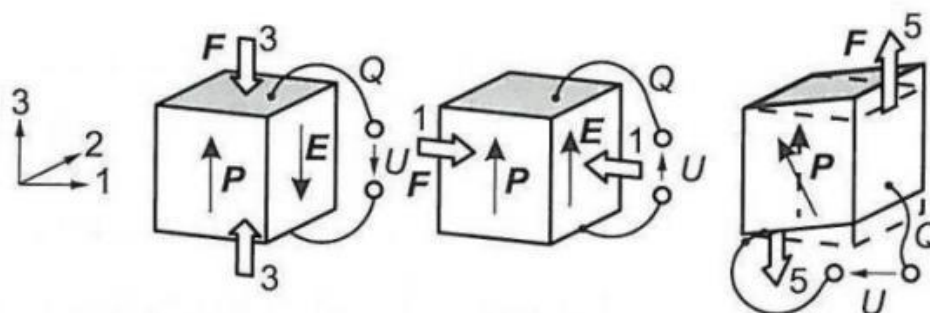
Působí-li na elementární buňku (Obr. 2.2) vnější síla tlaková nebo síla tahová ve směru elektrické osy (X), přestane působit účinek kompenzace kladných a záporných elektrických nábojů a na opačných stranách této osy se objeví přebytky opačně nabitých nábojů. Tímto se na přilehlých elektrodách vytvoří nesouhlasné náboje. :[10]



Obr. 2.2 Vznik nábojů při roztážení a stlačení elementární krystalové buňky [27]

## 2.1 Druhy piezoelektrických jevů

Pokud bude síla působit na krystal ve směru optické osy Z ( $F_z$  rovnoběžná s osou Z), tak nedojde k žádnému piezoelektrickému jevu. Pokud působící síla bude kolmá na optickou osu Z, dojde k zelektrizování krystalu a vytvoření elektrického náboje na plochách, které jsou kolmé na elektrickou osu. Na Obr. 2.3 lze vidět působení síly F, vytváření intenzity elektrického pole E, směru polarizace P a vytvoření náboje Q. :[10]



Obr. 2.3 Podélný, příčný a stříhový piezoelektrický jev [4]

### 2.1.1 Podélný piezoelektrický jev

Působí-li vnější síla rovnoběžně podél osy X(elektrická osa), potom bude vektor elektrické polarizace  $P_e$  směřovat podél této osy.

$$P_e = d_{ij} \frac{F_x}{S_x} \quad (2.1)$$

kde

$P_e$	elektrická polarizace ( $C \cdot m^{-2}$ )
$d_{ij}$	piezoelektrická konstanta ( $C \cdot N^{-1}$ )
$F_x$	Síla působící v elektrické ose (N)
$S_x$	plocha (m)

Ze vzorce vyplývá, že elektrická polarizace a deformace jsou mezi sebou úměrné.

Pro výpočet náboje, který vznikne na každé ploše kolmé k elektrické ose, se určí vztahem. :[21]

$$Q_e = d_{ij} F_x \quad (2.2)$$

kde

$Q_e$	elektrický náboj (C)
$d_{ij}$	piezoelektrická konstanta ( $C \cdot N^{-1}$ )
$F_x$	síla působící v elektrické ose (N)

Vzorec ukazuje, že náboj není závislý na velikosti krystalu (dielektrika).

### 2.1.2 Příčný piezoelektrický jev

Působí-li vnější síla podélně osy mechanické (Y), vzniká elektrický náboj na plochách kolmých na elektrickou osu s tím rozdílem, že směr vektoru polarizace  $P_e$  bude opačný (záporný). Vztah mezi polarizací  $P_e$  a silou  $F_y$  se určí vztahem. :[21]

$$P_e = - d_{ij} \frac{F_y}{S_y} \quad (2.3)$$

kde

$P_e$	elektrická polarizace ( $C \cdot m^{-2}$ )
$d_{ij}$	piezoelektrická konstanta ( $C \cdot N^{-1}$ )
$F_y$	síla působící v elektrické ose (N)
$S_y$	plocha (m)

Pro výpočet elektrického náboje dosadíme do rovnice.

$$Q_e = P_e S_y \quad (2.4)$$

a dostaneme

$$Q_e = d_{ij} F_y \frac{b}{a} \quad (2.5)$$

kde

- $d_{ij}$  piezoelektrická konstanta ( $C \cdot N^{-1}$ )
- $F_y$  Síla působící v elektrické ose (N)
- $Q_e$  elektrický náboj (C)
- a šířka dielektrika ve směru působení síly  $F_y$  (m)
- b výška ve směru působení síly  $F_y$  (m)

Ze vzorce je jasné, že vyvolané náboje na kolmých stěnách jsou závislé na geometrických rozměrech krystalu resp. poměru stran  $b/a$ . :[21]

## 2.2 Piezoelektrické konstanty a vlastnosti

Při počítání piezoelektrických vlastností používáme piezoelektrické konstanty, které mají tvar  $A_{xy}$ . Písmeno A je definováno podle konstanty (deformační, tlaková, napěťová atp.). Za písmena  $x$  a  $y$  se dosazují číslice a to podle směru polarizace dielektrika a směru působení síly na dielektrikum. Kde tyto číslice určují osy  $X=1, Y=2, Z=3$ .

Například při nábojové konstantě  $d_{31}$  dochází k polarizaci ve směru 3 (to znamená paralelně ke směru polarizace keramického elementu), na jednotku napětí ve směru 1 (to znamená kolmo ke směru polarizace keramického elementu). :[26]

### 2.2.1 Youngův modul

Pomocí Youngova modulu pružnosti  $E$ , lze popsat elastické vlastnosti anizotropních krystalů, při působení podélným prodloužením, zkrácením nebo ohybem. Rozdíl vůči izotropním látkám je takový, že Youngův modul má jiné hodnoty ve všech směrech krystalu. Youngův modul pružnosti v příslušném směru je dán jako podíl elastického napětí k poměrnému prodloužení či zkrácení. U isotropních látek se plocha elasticity jeví jako koule. Kdežto například u křemene je to ovaloid. :[10], [12]

### 2.2.2 Curierova teplota

Seignettoelektrické látky, takto jsou popsány látky které mají piezoelektrické nebo ferroelektrické vlastnosti. Název tato skupina dostala podle Seignettovy soli, u které byly prvně odpozorovány dielektrické vlastnosti.

Curierův bod označuje fázi, kdy se energie pseudosymetrické struktury rovná příslušné symetrické struktuře, tudíž látka dostává střed symetrie. Za normálních podmínek seignettoelektrické látky mají polární strukturu, po zahřátí na Curierovu teplotu se látky dostávají do nepolární fáze a tím látky ztrácejí svoji piezoelektrickou vlastnost. Tuto skokovou změnu objevil Pierre Curie. :[10], [12]

## 3 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály se vyznačují tím, že jejich krystalická struktura nemá středovou souměrnost. Při jejich namáhání kladné a záporné ionty mění vzdálenost a na povrchu vytvářejí elektrický náboj. První piezoelektrický jev byl objeven u Turmalínu, později byl objeven u křemene, Seignettovy soli a dalších. :[10]

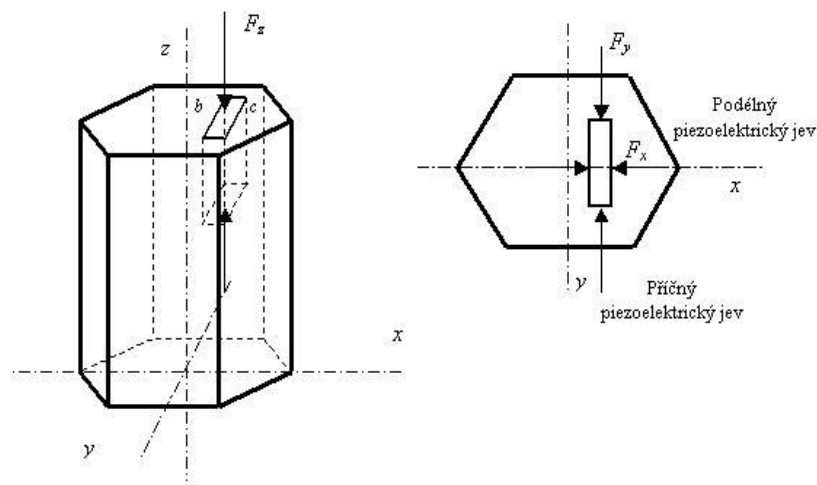
Piezoelektrické materiály můžeme rozdělit do tří skupin podle jejich struktur na:

- piezoelektrické krystaly (monokrystaly)
- piezoelektrické polykrystaly (piezoelektrická keramika)
- organické polymery

### 3.1 Piezoelektrické krystaly

#### 3.1.1 Křemen

Kysličník křemičitý  $\text{SiO}_2$ , neboli křemen, se nachází v několika modifikacích v litosféře. Pro piezoelektrické účely je však vhodná pouze nízkoteplotní trigonálně trapezodrická modifikace  $\alpha$ -klencová. Tato modifikace se v přírodě vyskytuje jako křišťál v různých barevných odrůdách. Naleziště v České republice je například Nový Kýz na Šumavě, Podkrkonoší nebo Písecko. Při kombinaci atmosférického tlaku a teploty  $573\text{ }^\circ\text{C}$  modifikace  $\alpha$  přechází do modifikace  $\beta$ , která krystalizuje v šesterečné soustavě. Pokud teplota křemene nepřesáhne  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , je piezoelektrická vlastnost křemene neovlivněna. Při vyšších teplotách se piezoelektrický jev zeslabuje a modifikace  $\beta$  piezoelektrické vlastnosti vůbec nemá. Pokud se křemen ochladí na původní teplotu, piezoelektrické vlastnosti se mu vrátí. Závislost vlastností na teplotě by se dala popsat hysterezní křivkou. Křemen obsahuje 3 osy elektrické a na ně 3 kolmé mechanické osy. Na *Obr. 3.1*, lze vidět krystal křemene s elektrickou a mechanickou osou. :[12]



Obr. 3.1 Piezoelektrické jevy u krystalu křemene [21]

### 3.1.1.1 Výroba syntetického křemene

Náročnost požadavků na piezoelektrické vlastnosti vedla k výrobě syntetických piezoelektrických materiálů. Syntetický křemen nedokáže stoprocentně nahradit křemen přírodní, hlavně kvůli jeho tvrdosti a odolnosti vůči chemickým vlivům. Jako průkopníka nápadu syntetického křemene lze určit R. Nackena, který tuto myšlenku řešil těsně před druhou světovou válkou. Výrobu syntetického křemene lze přirovnat k výrobě křemene přírodního. Je tvořen při vysokých tlacích a teplotách spolu s kombinací vody. Výroba syntetického křemene se provádí ve speciální tlakové nádobě zvané Autokláv. Autokláv je z 80 procent naplněn alkalickým vodným roztokem sody nebo louhu sodného. Vysokého tlaku v nádobě se dosahuje roztažností kapaliny v nádobě. Při syntéze křemene dochází k tlaku až 1500 atm a teploty do 450 °C. Krystaly syntetického křemene vyrůstají na křemenné destičce vyříznuté z křemenného krystalu v řezu Z. Dochází k rozpouštění živné suroviny a přesycení roztoku, tím dochází k růstu krystalu na zárodku. Růst krystalu je pomalý proces, přibližně 0,3 – 0,5 mm za den. :[12]

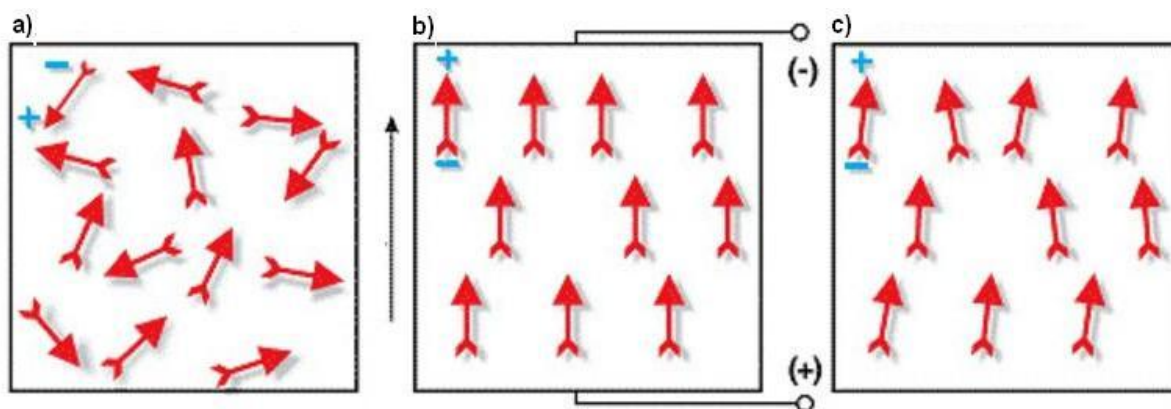
### 3.1.2 Turmalín

Krystal ze skupiny křemičitanů se vyskytuje v různých odrůdách, v různých barvách. Pro technické účely se používá turmalín zelené barvy. Od křemene se liší tím, že má pouze jednu elektrickou osu a je více závislý na teplotě. Jeho optická osa splývá s osou Z, která je zároveň elektrickou osou. :[12]

## 3.2 Piezoelektrická keramika

Piezoelektrická keramika je anorganická látka s obsahem krystalů piezoelektrické látky, která se za vysokých teplot vypaluje v peci. Tímto způsobem výroby je možné ovlivnit několik faktorů výsledné piezoelektrické keramiky. Výhoda piezoelektrických keramik spočívá v tom, že je možné si přizpůsobit vlastnosti keramiky podle jejího použití. V první řadě je možné ovlivnit velikost a tvar keramiky. Podle přidaných příměsí se ovlivňují také piezoelektrické vlastnosti, jako například piezoelektrická deformační konstanta, nábojová konstanta atp. Další důležitý koeficient, který lze měnit je Curieova konstanta. Ta u většiny piezoelektrických keramik bývá v rozmezí od 200 do 400 °C. :[20], [22], [23]

Po celkovém procesu výroby se zdá, že zhotovená keramika žádné piezoelektrické vlastnosti nemá a to i přesto, že jsou v ní prvky, které by tyto vlastnosti mít měly. Je to z toho důvodu, že krystaly piezoelektrických materiálů mají uvnitř keramiky náhodnou orientaci. Aby keramika dosáhla požadovaných vlastností, musí se umístit do elektrického pole, kde při vysoké teplotě dochází k polarizaci vnitřních domén keramiky podle orientace elektrického pole. Poté se keramika chová jako monokrystal a reaguje na vnější napětí svoji piezoelektrickou odezvou. Po odebrání elektrického pole dochází k částečné polarizaci keramiky, která se nazývá remanentní. Na Obr. 3.2 lze vidět princip polarizace keramiky. :[20], [22], [23]



Obr. 3.2 a) Náhodná polarizace dipólů, b) Polarizace dipólů el. polem, c) Remanentní polarizace po odebrání el. pole [20]

### 3.2.1 PZT keramika

Nejpoužívanější piezoelektrické keramiky jsou založené na bázi olovo-zirkonátu-titanátu PZT, skládají se ze smíšených krystalů  $\text{PbZrO}_3$  (zirkončitan olovnatý) a  $\text{PbTiO}_3$  (titaničitan olovnatý). Pro zlepšení vlastností se přidávají různé příměsí, dnes nejlépe lanthan tzv. PLZT keramika. Její výroba se provádí pomocí práškové metalurgie. V kulových



mlýnech se rozemele oxid olovnatý, oxid zirkoničitý a oxid titaničitý na prášek a smíchá se s dalšími prvky tzv. Dopanty, kterými měníme vlastnosti keramiky např. atomy lanthanu (*La*). Na přidávání příměsí si musíme dát veliký pozor, protože zlepšení jedné vlastnosti většinou přichází na úkor jiné vlastnosti. Dalším nezbytným procesem je Kalcinace, ve které se jeden tuhý materiál odloučí v podobě plynu a druhý vytvoří pevnou látku o předem definovaném chemickém složení. K tomuto procesu dochází při teplotě 800 až 900 °C. Poté je pevná látka znovu rozdrcena na prach. Přidáním rozpouštědel a pojiv se vytvoří kašovitá hmota, které se pomocí forem určí tvar a objem. Aby došlo ke splynutí práškových částic, je potřeba látku spéct. Spékání probíhá za vysokých teplot mezi 1 000 a 1 300 °C. Řezáním, broušením a leštěním dáme keramice potřebné geometrické rozměry, které určují její funkční charakteristiky. Pro elektrické připojení je potřeba připojit stříbrné elektrody pomocí sintrování při cca 600 °C. V poslední fázi je potřeba keramiku polarizovat. Polarizace se provádí vystavením výrobku stejnosměrnému elektrickému poli (2 až 3 kV/mm). :[22]

### 3.3 Piezoelektrické polymery

Objevení piezoelektrických látek proběhlo kolem roku 1969, kdy byl objeven piezoelektrický jev u polyvinylidifluoretylenu (PVDF). Piezoelektrické polymery jsou velmi lehké, jsou flexibilní a mají výborné piezoelektrické vlastnosti. Jednou z jejich předností je také tepelná a chemická odolnost. Kvůli jejich vlastnostem najdou využití například v biomedicině nebo jako akustické senzory. Tyto polymery mají dvě fáze, ve fázi- $\alpha$  jsou polymerní dipóly náhodně orientovány, tudíž u tohoto polymeru nedochází k piezoelektrickému jevu. Fáze- $\beta$  má dipóly orientované v jednom směru a proto může dojít k piezoelektrickému jevu. Přejít mezi těmito dvěma fázemi se provádí vložením PVDF do elektrického pole, tím se náhodné dipóly srovnají do jednoho směru. Maximální teplota, ve které je možné použít PVDF film je 80 °C. :[9]

## 4 Taktilní senzory pro automatizaci

Díky taktilním sensorům jsme schopni získávat informace, které není možné získat jiným způsobem. Taktilní informace lze získat jedině kontaktem a interakcí mezi objekty. Využití těchto sensorů se najde především v robotice a biomechanice. Dovolují robotu uchopit křehké předměty, aniž by je rozmačkal, dokážou určit správný směr pohybu a úhel uchopení předmětu, dokážou analyzovat tvar předmětu atp. V biomechanice se tyto senzory používají za náhradu lidského hmatového smyslu, kde je možné senzory umístit do konečků prstů, kloubů, chodidel atp. :[4]

### 4.1 Dělení taktilních sensorů

V první řadě je třeba pochopit rozdíl mezi taktilním senzorem a taktilním snímačem. Taktilní sensor je element, schopný snímat kontakt s objektem a vyhodnotit informaci pomocí elektrického signálu. Název taktilní snímač je obvykle použit pro seskupení více taktilních sensorů.

Obecné dělení sensorů v automatizaci:

- inerciální senzory
- proximní senzory
- taktilní senzory

Podle způsobu jakým získáváme taktilní informaci lze senzory dělit na:

- primární taktilní senzory
- sekundární taktilní senzory

Do skupiny primárních sensorů patří většina taktilních sensorů. Dochází u nich k přímému kontaktu s objektem, který je potřeba rozpoznat. Do skupiny sekundárních sensorů řadíme senzory, které informace vyhodnocují zprostředkovaně. Lze sem zařadit i proximní(optické) senzory.

Taktilní senzory lze dělit také podle druhu signálu taktilní informace na:

- taktilní senzory proporcionální
- taktilní senzory diskrétní

Dělení sensorů do těchto dvou skupin se provádí z důvodu dvou druhů výstupního elektrického signálu. Elektrický signál ze skupiny proporcionálních sensorů, má kontinuální charakteristiku. Skupina diskrétních sensorů používá charakteristiku logickou s dvěma úrovněmi (1 a 0).

Jelikož se taktilní senzory instalují na velmi důležitá místa, jsou na ně kladeny přísné nároky, mezi které patří:

- rozměr
- hmotnost
- mechanická odolnost
- linearita převodu
- přímé spojení

Taktilní senzory se umísťují například na konečky prstů robotické ruky a na jiná podobná místa. Z toho vyplývá, že rozměry senzoru musejí být velmi malé. Na senzor je také kladen důraz, co se týče nízké hmotnosti, protože hmotnost ovlivňuje dynamiku robota. Senzor se instaluje do míst, kde je mechanicky namáhán a je vyžadována jeho odolnost proti mechanickým napětím. Důležité také je nastavení citlivosti nebo rozmezí tlaků senzoru. Senzor je potom přímo propojen s dalšími částmi, které zpracovávají přijatý signál. :[2], [4], [13], [14], [18]

#### **4.1.1 Výhody a nevýhody taktilních senzorů**

Mezi hlavní výhody taktilních senzorů patří, že mohou být umístěny do robotických rukou, úchopných hlavic, opasku atp. hlavně díky malým rozměrům a malé hmotnosti senzoru. Vzhledem k rozměrům senzoru je možné snadno změnit pracovní prostor. Přenos informací lze provádět paralelně, což znamená, že senzor může přijímat požadavky a zároveň odesílat informace. Výhodou je taky odolnost vůči vnějším vlivům. Jelikož senzory přicházejí do kontaktu s předměty, musejí být odolné. Jednoduché získání taktilní informace v číslicové podobě, která značně usnadní další zpracování signálu. Vyhodnocování taktilní informace se odehrává v reálném čase, je tedy možné robota řídit ihned.

Mezi nevýhody patří například omezená schopnost rozlišovat předměty z konstrukčních důvodů. Jednou z nevýhod je také minimální síla úchopu, která v některých případech nemusí být dostačující. Vzhledem k tomu, že taktilní senzory přicházejí do styku s objekty, dochází u nich k opotřebení, které je nutno kontrolovat.

Taktilní snímače podle jejich účelu, můžeme rozdělit na:

1. Taktilní snímače, které slouží ke zjištění rozměrů objektu
  - a. Informace se získává od primárních nebo sekundárních senzorů, taktilního snímače, který je vhodně umístěn na úchopné hlavici, při sevření předmětu senzory odesílají taktilní informace. Takto lze zjistit povrchové vlastnosti předmětu.

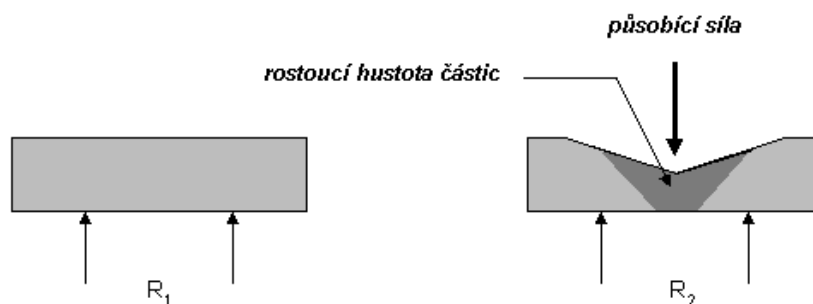
- b. Dalším způsobem jak zjistit rozměrové vlastnosti předmětu, je uložení taktilního senzoru na pohyblivou část robota, která je schopna pohybem po povrchu předmětu zjistit jeho tvar a rozměry.
2. Další taktilní snímače, které vyhodnocují správné uchopení předmětu známého předmětu, jsou umístěny na úchopné hlavici. Tyto informace se dají použít k určení minimální úchopné síly robota.
  3. Taktilní snímače, umístěné v ramenech robota, slouží k bezpečnosti robota a jeho okolí. Dokážou odeslat informaci, která zastaví pohyb robota, pokud se ve dráze pohybu objeví neočekávaný předmět.
  4. Taktilní snímače, které jsou adekvátně rozvrženy v důležitých částech robota. Slouží k orientaci robota v prostoru, řízení mechanismů a pohybu robota. :[2], [4], [13], [14], [18]

Taktilní snímače dělíme podle fyzikálních pravidel na:

- taktilní snímače s elastomerem
- taktilní senzory s odporovou vrstvou
- taktilní snímače s tenzometry
- taktilní kapacitní senzory
- optovláknové senzory
- taktilní piezoelektrické senzory

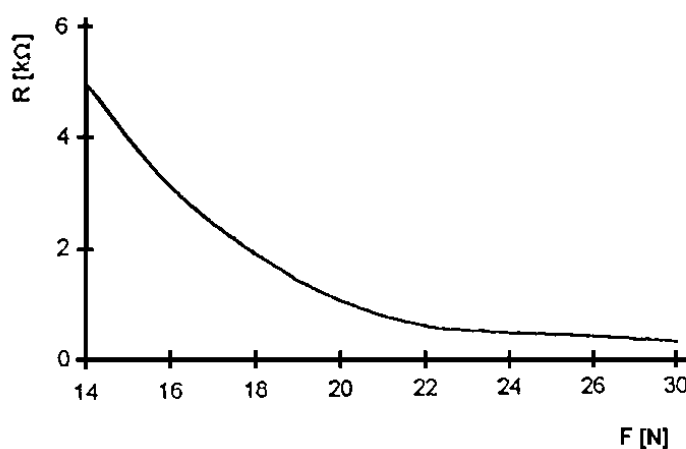
## 4.2 Taktilní snímače s elastomery

Tyto piezorezistivní snímače převádějí tlakovou sílu na elektrický signál pomocí elastomeru. Elastomer je polymerní materiál s tvrdými a měkkými doménami a má různé teploty zesklnění. Díky jeho houževnatosti je hojně používaným materiálem. Tento pryžový elastomer je sycený železným prachem nebo grafitem. Elastomer mění svůj odpor, podle vnější zatěžovací síly. Čím větší je zatížení senzoru, tím více klesá jeho odpor. Je to dáno částicemi v elastomeru, které se po stlačení přiblíží k sobě a zlepší vodivost elastomeru. Na *Obr. 4.1*, je zobrazen princip senzoru. :[24]



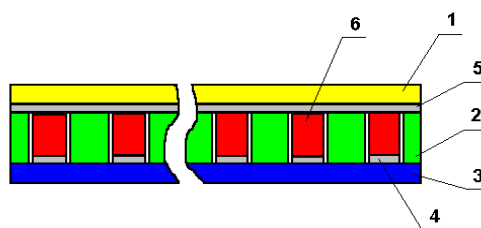
Obr. 4.1 Funkce čidla s vodivým elastomerem [24]

Díky změnám odporu pryžového elastomeru získáváme informace o předmětu. Senzory jsou rozloženy plošně do maticového rozvržení a snímají povrch vlastního objektu. Takto instalované snímače měří spojitou velikost rozloženého tlaku. Závislost odporu elastomeru na působící vnější sílu zobrazuje Graf 4.1. Charakteristika má nelineární průběh. Část mezi 20 a 22 N je nejvhodnější k praktickému použití díky své stabilitě. Pomocí počítačů nebo odporů se snadno dostaneme k lineárnímu signálu. :[15], [24]



Graf 4.1 Závislost odporu  $R$  elastomeru na působící síle  $F$ ,  $R=f(F)$  pro PMT 1.4 [15]

Na Obr. 4.2, vidíme konstrukci snímače PMT 1.4. Mezi párem elektrod 4 a 5 leží vodivý elastomer 6. Základní deska 3 je připojena na spodní elektrodu. Na horní elektrodě leží krycí vrstva 1 z elastického materiálu, která slouží jako přenašeč síly na elastomer 6. Aby nedošlo k přetížení a senzor pracoval v předem určeném rozsahu, je instalována mezi základní deskou a horní elektrodou distanční vložka 2. :[15], [24]

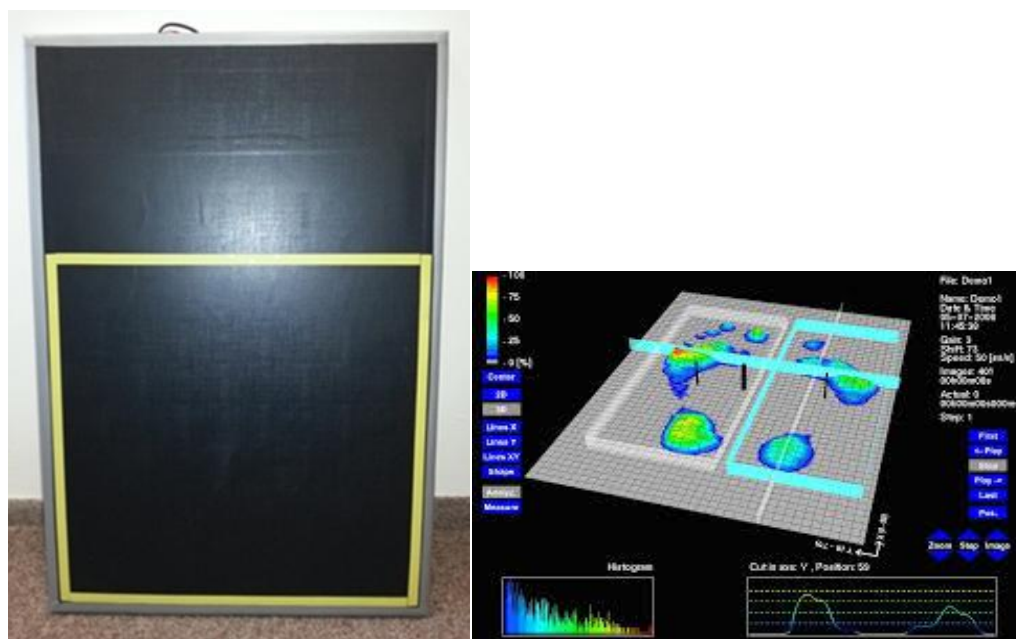


Obr. 4.2 Konstrukce snímače PMT 1.4 [15]

#### 4.2.1 Plantograf V12

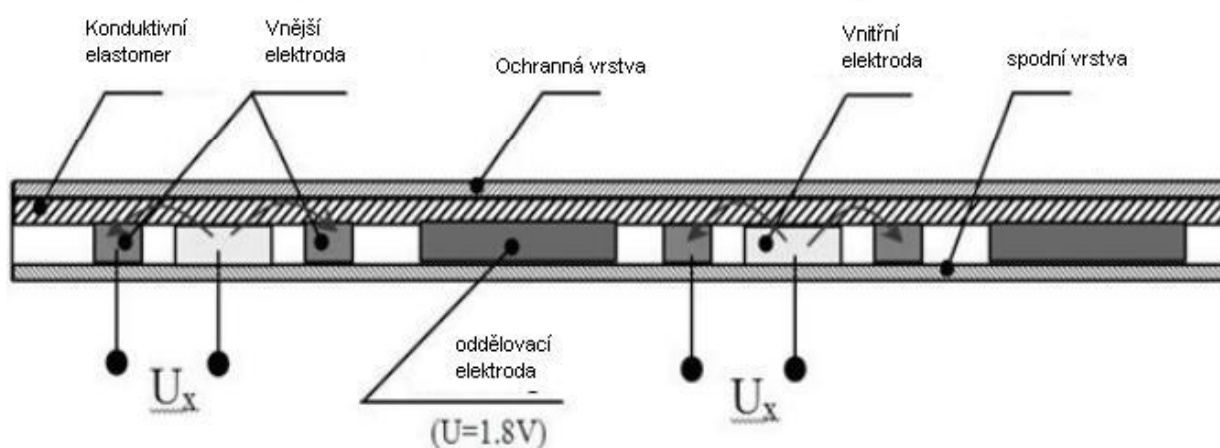
V roce 2015 bylo na České Zemědělské Univerzitě v Praze, na Technické fakultě provedeno měření na přístroji zvaném Plantograf V12. Je to přístroj, který je schopný získat taktilní informaci o objektu, se kterým je v kontaktu a tuto informaci převést na elektrický signál. Uplatnění tohoto přístroje je možné najít například v medicíně nebo v automobilovém průmyslu. Plantograf V12 dokáže měřit statické i dynamické rozvržení tlaku. Analyzuje rozložení tlaku v chodidlech a kloubech člověka. Dokáže získat taktilní informace o rozložení tlaku člověka v autosedačce atp. :[16]

Plantograf V12 k převádění tlakové síly na elektrický signál používá 16,400 senzorů, které jsou rozmístěny v maticovém uspořádání 128x128 senzorů o průměru jednoho senzoru přibližně 2,5 mm. Všechny senzory jsou umístěny v aktivní části o rozloze 500x500 mm. Plantograf V12 je schopný snímat až 1 000 snímků za sekundu. Taktilní informace je odesílána do počítače se softwarem, který dokáže informaci zobrazit ve 2D a 3D zobrazení s 256 úrovněmi (viz Obr. 4.3). :[16]



Obr. 4.3 Snímek plantografu V12 a 3D zobrazení přenesené informace do PC.[16]

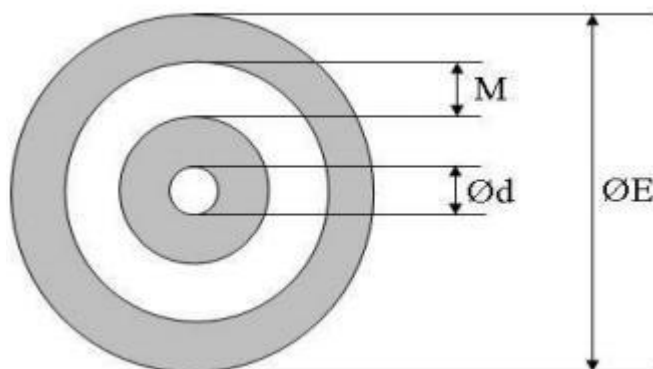
Na Obr. 4.4, je vidět konstrukce snímače Plantografu V12. Při konstrukci Plantografu V12 byl použit vodivý elastomer CS 57–7 RSC, jako konvertor mezi vnější silou a materiálovým elektrickým odporem. Ke spodní vrstvě, elastické základně, jsou připojeny elektrody. Mezi vnějšími elektrodami jsou umístěny obecné elektrody o napětí 1,8 V, z důvodu separace individuálních elektrod. :[16]



Obr. 4.4 Konstrukce snímače Plantografu V12[16]

Elektrické obvody v Plantografu V12 jsou chráněny evropským patentem (Novak & Volf, 2013). Pro převod signálu jsou použity vysokorychlostní analogovo-digitální převodníky. Obvody obsahují 128 R-C obvodů, pro každý sloupec jeden.

Plantograf V12 obsahuje elektrody typu LD  $\text{ØE} = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\text{Ød} = 0,4 \text{ mm}$ ,  $M = 0,25 \text{ mm}$ . Rozměry jsou zakótovány na Obr. 4.5. :[16]



Obr. 4.5 Rozměry elektrody v plantografu V12[16]

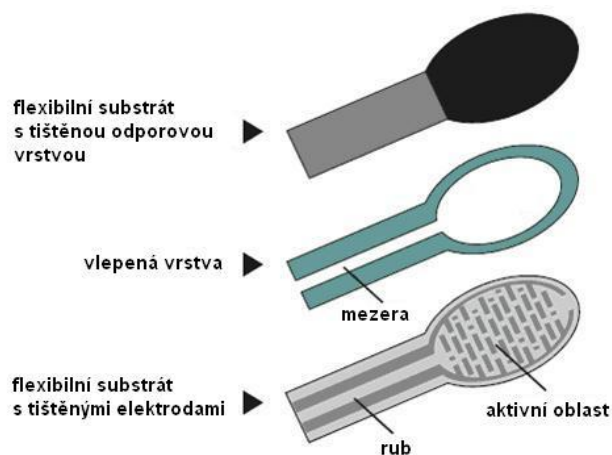
Parametry plantografu V12:

- hmotnost pacienta do 150 kg
- jmenovitý rozsah tlaku 5-100 kPa
- maximální přetížení 14 MPa
- aktivní plocha 500x500 mm
- počet senzorů 16,400 ks
- napětí převodníku +5 V
- snímková frekvence 1 kHz
- počet digitálních úrovní 256 (8 bitový A/D převodník)

#### 4.2.2 FSR Senzory

Force Sensitive Resistor, jak už název napovídá, je typ taktilního senzoru, který reaguje na změnu odporu. Jako odporový materiál se používá polymer, který mění svůj odpor závisle na síle, která na něj působí. Nejčastěji se používají do dotykových zařízení (např. dotyková klávesnice). Za jednu z hlavních výhod se považuje možnost senzory vyrobit v libovolném tvaru a velikosti, nebo z více senzorů poskládat jeden snímač. : [14]

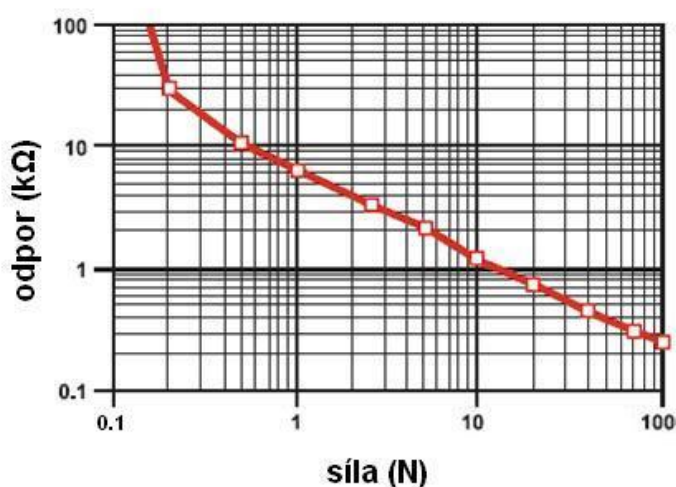
Základní část senzoru, odporová vrstva, je vyrobena v kombinaci miniaturních částic, které vedou elektrický proud a částic, které elektrický proud nevedou. Technologie, kterou jsou tyto vrstvy vyráběny, se jmenuje technologie polymerových vrstev. Při stlačení odporové vrstvy dojde k přiblížení částic a zmenšení elektrického odporu. Další část se nazývá distanční vložka a slouží k oddělení odporové vrstvy od vrstvy s vodiči. Poslední vrstva obsahuje kontaktní vodiče (viz *Obr. 4.6*). :[14]



*Obr. 4.6 Základní části FSR senzoru [14]*



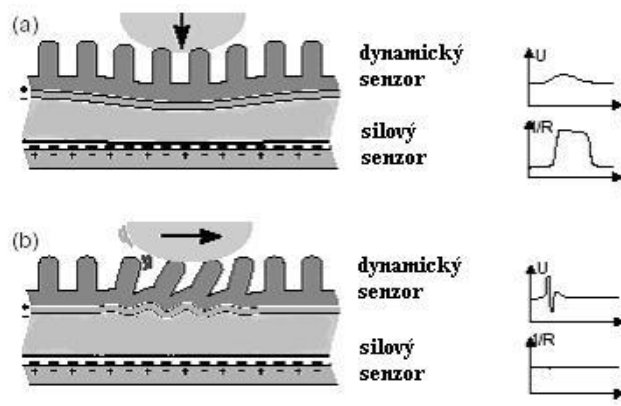
Graf 4.2, znázorňuje charakteristiku odporu a síly. Podle charakteristiky závislosti odporu na síle je možné zpozorovat, že při minimální síle se odpor mění velmi prudce a při větších namáháních se charakteristika stává lineární. Síla, do které odpor mění svou hodnotu, je přibližně 100 N. Za touto hranicí se síla nazývá saturační a odpor svou hodnotu dále nemění. Senzor je pak funkční přibližně od 100 Pa do 200 Pa. Tato vlastnost se dá ovlivnit například velikostí senzoru a druhem materiálu. :[14]



Graf. 4.2 Závislost odporu  $R$  na síle  $F$ ,  $R=f(F)$  [14]

### 4.2.3 Senzory s odporovou vrstvou

S pomocí dvou odporových vrstev je možné sestrojít senzor, který bude snímat dva druhy napětí. Jedna z vrstev může obsahovat výrůstky, neboli klky, které dynamicky reagují na silové napětí a tím měří smykovou sílu. Klky mění polohu působením vnější síly, změnou polohy vyvolají změnu napětí na své přidělené odporové vrstvě. Druhá odporová vrstva měří statickou normálovou sílu a je oddělena od první odporové vrstvy (viz Obr 4.7). :[14]



Obr. 4.7 Princip dvouvrstvého senzoru [14]

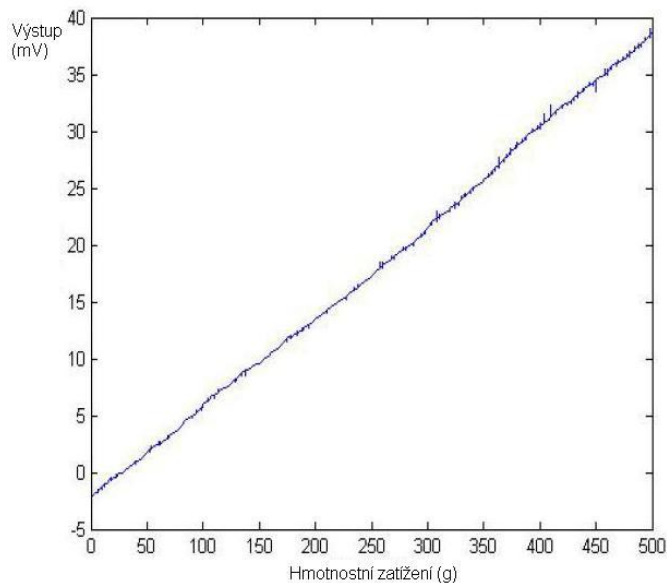
#### 4.2.4 FSS-SMT senzor

Na Obr. 4.8 je zobrazen piezorezistivní senzor od firmy Honeywell. Mezi hlavní rysy tohoto senzoru patří piezorezistivní vrstva křemíkového materiálu. Má velmi nízkou spotřebu energie a pomocí Wheastonova můstku dokáže udržet stabilní výstupní napětí. Veškerá působící síla je koncentrována pomocí ocelové kuličky přímo do křemíkového materiálu. Vlivem působící síly, materiál mění svůj odpor a tím ovlivňuje hodnoty výstupního napětí. Senzor je dlouhý přibližně 1 cm a jeho čtyři výstupní piny umožňují velmi rychlou povrchovou montáž (TMS) na plošný spoj. :[7]



Obr. 4.8 FSS-SMT senzor [7]

Při testování FSS-SMT senzoru bylo zjištěno, že senzor je citlivý na velmi malá zatížení (viz Graf 4.3). Na každé dva gramy zatížení senzoru stoupne výstupní napětí o 0,1 mV. Senzor je tedy vhodné použít na místa, u kterých je potřeba reagovat na malá zatížení, oproti tomu senzor FSR je pro velmi malá zatížení nepoužitelný. :[7]

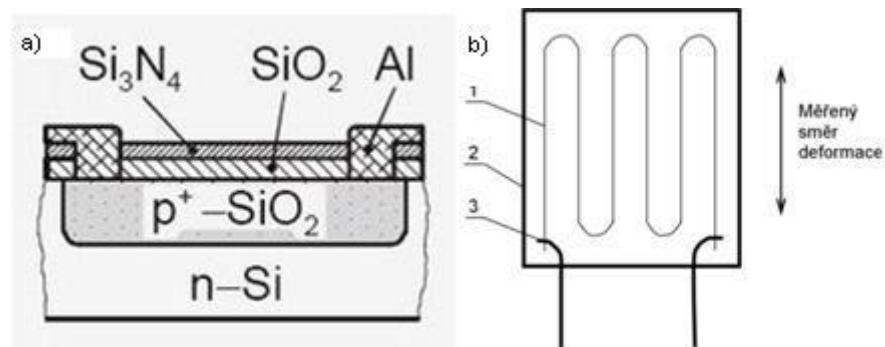


Graf 4.3 Závislost výstupního napětí na hmotnostním zatížení FSS-SMT senzoru [7]

### 4.3 Snímače s tenzometry

U těchto snímačů se používají tenzometry jako elektronické pasivní součástky, které měří mechanické napětí prostřednictvím jejich deformace. Slouží jako převodník mezi mechanickou silou a elektrickým signálem. Rozdělují se do dvou druhů, kovové tenzometry a polovodičové tenzometry. U kovových tenzometrů najdeme například tenzometry drátkové. Drátky mají průměr přibližně 0,01 mm a jsou připevněny k podložce z nevodivého materiálu. Kovové tenzometry se vyrábějí i ve fóliové podobě, kde folie je tlustá přibližně 0,001 mm a je připevněna k nevodivé podložce. :[2], [25]

Do skupiny polovodičových tenzometrů patří monokrystalické pásky, které obsahují difundované krystalky jiného materiálu, čímž je ovlivněn odpor v závislosti na vnějším namáhání. Tyto senzory jsou potom precizně přilepeny na plochu předmětu. Výhodou je, že senzory jsou vyráběny ve tvarech odpovídajících způsobu namáhání. Na *Obr 4.9a*, je vidět průřez polovodičovým tenzometrem. Nosnou část snímače tvoří Si substrát typu N, do kterého je difundován polovodič typu P. Izolace je tvořena povrchem  $\text{SiO}_2$  a pasivován vrstvou  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Na *Obr. 4.9b*, je vidět kovový foliový vodič, který obsahuje odporové kovové drátky 1. Drátky jsou připevněny k podložce 2 (např. papír) a navazují na vývody 3, drátky o větším průměru. :[2], [25]



Obr. 4.9 a) Difundovaný polovodičový tenzometr, b) Kovový foliový tenzometr[2] [25]

Pro omezení chyb při měření je důležité zvolit správné lepidlo pro přilepení senzoru na povrch objektu. Lepidlo je zde přenašečem deformací z deformačního členu na tenzometr. Důležitými vlastnostmi lepidla jsou například nulová plastická deformace v rozsahu měření. Nebo dobré adhezní vlastnosti.

Jako vyhodnocovací obvody se používají vyvážené můstky při nezátížených tenzometrech a to z důvodu citlivosti na teplotní změny senzoru a tím i změnu odporů. :[2], [25]

#### 4.4 Kapacitní senzory

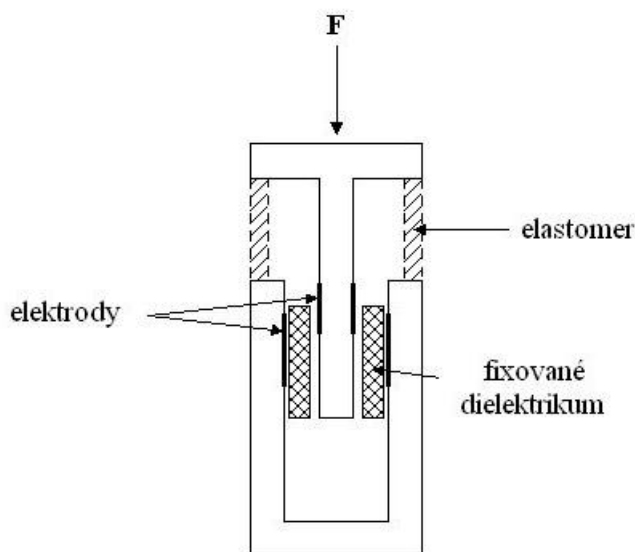
Měření taktilní informace u kapacitních senzorů se odvíjí od vzorce pro výpočet kapacity kondenzátoru (viz rovnice 4.1). Ze vzorce vyplývá, že kapacita kondenzátoru je ovlivněna více faktory. Lze využít změnu plochy překrytí elektrod, změnu vzdálenosti elektrod mezi sebou, nebo změnu permitivity dielektrika. :[14], [24]

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (4.1)$$

kde

- C kapacita senzoru (F)
- $\varepsilon_0$  permitivita vakua ( $\text{Fm}^{-1}$ )
- $\varepsilon_r$  relativní permitivita (-)
- S plocha překrytých elektrod ( $\text{m}^2$ )
- d vzdálenost elektrod (m)

Nejčastěji je použita změna překrytých ploch elektrod, kdy při stlačení senzoru se změní plocha překrytí a tím pádem i kapacita kondenzátoru (viz Obr. 4.10)



Obr. 4.10 Kapacitní senzor s elastomerem [24]

## 4.5 Optovláknové senzory

Optovláknové senzory se používají pro detekci modulace světla, při působení vnější síly. Senzor je složen ze tří hlavních částí. Základem senzoru je zdroj světla, u kterého je důležité, aby světlo mělo koherentní charakteristiku (např. Laserová dioda, popř. LED dioda). Další částí je optické vlákno, kterým prochází světlo. A nakonec detektor, který vyhodnocuje světlo procházející optickým vláknem. Světlo v optickém vlákně odolává vůči vnějšímu rušení např. elektromagnetickému poli. :[2]

Taktilní informace se vyhodnocuje měřením amplitudy světla, kterou lze snadno ovlivnit např.

- mikroohmem, kdy při ohybu dochází ke ztrátám a změně intenzity světla
- změnou vzájemné optické vazby
- změnou tlumení
- změnou přechodu a odrazu světla

### 4.5.1 Mikroohybové senzory

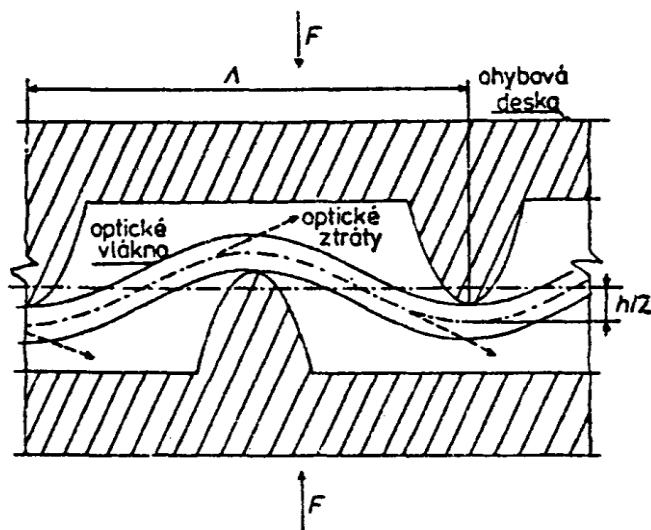
U těchto senzorů dochází ke ztrátám při odrazu světla ve vlákně. Úplný odraz světla je dán vztahem:

$$\theta_c \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (4.2)$$

kde

- $\theta_c$  úhel dopadu ( $^\circ$ )
- $n_1$  index lomu jádra (-)
- $n_2$  index lomu pláště (-)

Při zakřivení vlákna dochází ke špatnému odrazu a částečnému úniku světla do pláště. Princip těchto senzorů je ukázán na *Obr. 4.11*.



*Obr. 4.11 Mikroohybový senzor [14]*

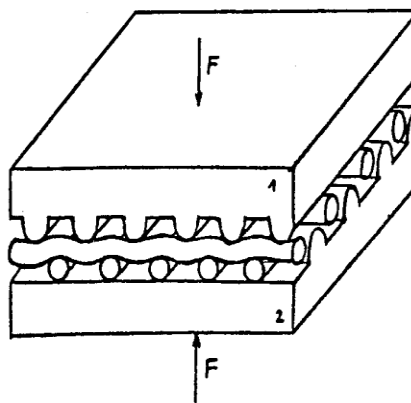
Poloměr zakřivení vlákna, při kterém rychle narůstají ztráty je dán vztahem:

$$R_k = \frac{3\lambda n_1^2}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.3)$$

kde

- $n_1$  index lomu jádra (-)
- $n_2$  indexy lomu pláště (-)
- $\lambda$  vlnová délka (m)
- $R_k$  poloměr zakřivení vlákna (m)

Z optických vláken je možné sestavit maticový snímač (viz *Obr. 4.12*). Mezi velké nevýhody maticového snímače z optických vláken patří to, že každé vlákno musí mít svůj zdroj světla a svůj detektor na vyhodnocování informace. Konstrukčně je tedy snímač složitý a drahý na realizaci. :[2], [14], [24]

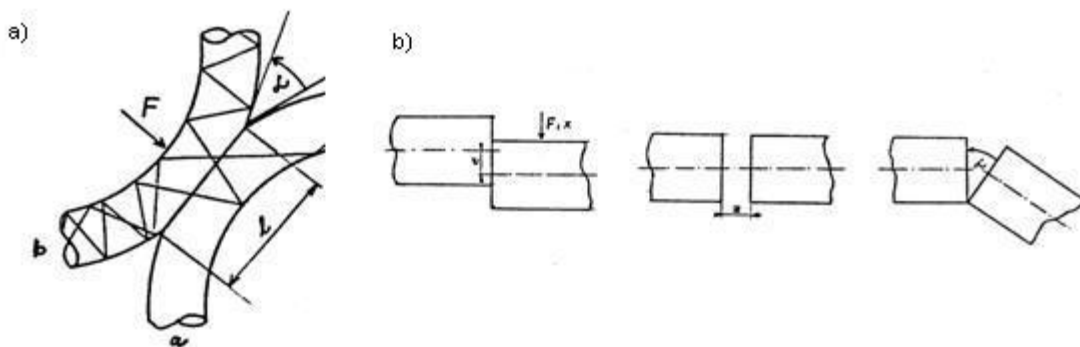


*Obr. 4.12 Maticový mikroohybový snímač. [14]*

Další možné provedení maticového snímače z optických vláken obsahuje 4 vrstvy vláken. První a čtvrtá vrstva se nazývají neaktivními vrstvami. Nacházejí se na spodní a horní části senzoru. Druhá a třetí vrstva se nazývají aktivní vrstvy a nacházejí se mezi první a čtvrtou vrstvou. Neaktivní vrstvy mají zvlněný povrch a jejich úkolem je způsobit ohyb aktivních vrstev při vnějším napětí. Aktivními vlákny prochází světelný signál. Vzdálenost mezi vlákny v horizontálním směru činí 2 mm a vzdálenost vrstev činí 250 $\mu$ m. :[2], [14], [24]

#### **4.5.2 Senzory se vzájemnou optickou vazbou**

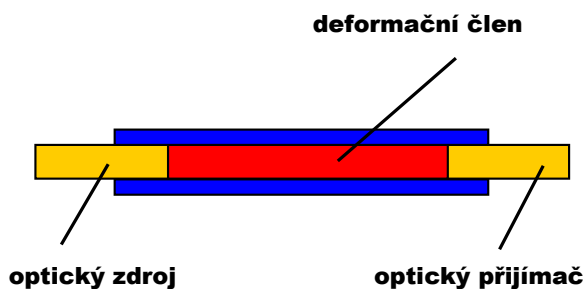
Detekce taktilní informace funguje na principu propojení dvou optických vláken, kdy první vlákno je připojeno ke zdroji světla a druhé vlákno je připojeno k detektoru. Mezi sebou jsou vlákna propojena jádry vláken. Délka spoje je označena  $l$  a úhel mezi spojenými vlákny je označen  $\alpha$ . Podle stlačující síly přechází úměrná část světla do druhého vlákna a detektoru. Tento princip je popsán na *Obr.4.13a*. :[15]



Obr. 4.13 a) Senzor s optickou vazbou, b) senzor se změnou vzájemné vazby [15]

### 4.5.3 Optovláknové senzory se změnou tlumení

Senzory tohoto typu obsahují mezi vlákny průsvitný člen, který mění své optické vlastnosti (koef. odrazu, index lomu apod.) vlivem působení vnějších sil. Princip je ukázán na Obr.4.14. :[14]



Obr. 4.14 Senzor s deformačním členem [14]



## 5 Piezoelektrické taktilní senzory

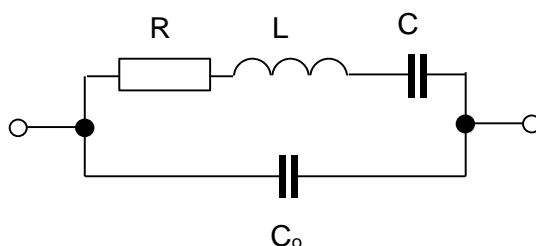
Piezoelektrické taktilní senzory používají piezoelektrický materiál jako převodník mezi vnější silou a elektrickým napětím. Při působení síly na piezomateriál vznikají na jeho povrchu volné náboje, které jsou měřeny elektrodami. Piezoelektrický efekt je popsán v kapitole 2. Materiály, které jsou použity v těchto senzorech, jsou popsány v kapitole 3.

Výhodou těchto čidel je konstrukční jednoduchost a malé rozměry. Mezi nevýhody patří hlavně velký vnitřní odpor piezoelektrického materiálu. Kvůli velkému vnitřnímu odporu není možné měřit signál napřímo. Pro měření statických sil je nutno zapojit na elektrody nábojový zesilovač, který má velký vstupní odpor. Používají se operační zesilovače, nebo zesilovače složené z tranzistorů, které jsou řízeny elektrickým polem.

Základním elementem piezoelektrického taktilního senzoru je rezonátor. Vlastnosti rezonátoru jsou ovlivněny geometrickými rozměry, piezoelektrickými koeficienty a elastickými moduly. Pro snímání vibračních a dynamických sil jsou nejvíce používány senzory s piezoelektrickým rezonátorem. Využívá se zde působení vnější síly na rezonátor, který kmitá v rezonanční frekvenci. :[4], [15]

### 5.1 Náhradní schéma piezokrystalu

Na *Obr. 5.1*, je vyznačen princip náhradního schéma piezokrystalu. Je tvořen pasivními elektrickými prvky, jako je cívka, rezistor a kondenzátor, které jsou zapojeny v sérii. Na tento sériově zapojený RLC obvod je paralelně připojen kondenzátor o statické kapacitě.



*Obr. 5.1 Náhradní schéma piezokrystalu [19]*

Po připojení piezoelektrického krystalu ke střídavému napětí začnou výbrusem procházet vlny, které vznikají kmitáním materiálu. Z důvodu různých vlnových odporů u materiálu a okolního prostředí dochází k odrazům vln uvnitř materiálu. Aby bylo možné

výbrus uvést do stavu s rezonančními kmity, musí být vhodně zvolena vlnová délka  $\lambda$  k poměru šířky výbrusu  $a$ . Podle vzorce (5.1) je možné určit potřebné parametry. Pokud jsou rozměry výbrusu zvoleny nevhodně, vlny procházející materiálem se budou navzájem vrušovat a rezonátor se nedostane do stavu rezonanční frekvence. :[18][15]

Geometrické rozměry výbrusu piezokrystalu ovlivňují hodnoty rezonanční frekvence. Na materiálu vznikají podélné, příčné a tloušťkové kmity, které mají jiné hodnoty rezonanční frekvence. Správným rozvržením rozměru výbrusu je možné některé kmity potlačit a jiné zase zesílit. Vlivem působení vnějšího napětí dochází ke změnám hodnot těchto kmitů, které se projeví na charakteristice zatěžování. Nejvíce vyhovujícím tvarem je kruh, který má velmi malou tloušťku oproti jeho průměru. :[15], [17], [18]

$$a = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{c}{2f_r} \Rightarrow f_r = n \frac{c}{2a} \quad (5.1)$$

kde

- $f_r$  rezonanční frekvence tloušťkových, podélných nebo příčných kmitů (Hz)
- $c$  rychlost šíření podélné vlny ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $a$  rozměr výbrusu (tloušťka, délka, šířka) (m)
- $\lambda$  vlnová délka (m)
- $n$  násobek lichých harmonických (-)

Rychlost šíření vlny výbrusem je dána vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}}} \quad (5.2)$$

kde

- $c$  rychlost šíření podélné vlny ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $\rho$  hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
- $s_{11}$  složka tenzoru deformace ( $\text{m}^2\text{N}^{-1}$ )

### 5.1.1 Výpočet součástí náhradního schéma

Každá součást náhradního schéma reprezentuje faktor, který ovlivňuje piezoelektrický rezonátor. Ztráty v piezomateriálu představuje rezistor o odporu R. Hmotnost reprezentuje cívka o indukčnosti L. Posledním faktorem je poddajnost, která je zastoupena kondenzátorem o kapacitě C. Velikost kapacity C<sub>0</sub> je dána rozměry a vzdáleností elektrod. Velikost odporu R se mění v závislosti na vnějším mechanickém zatížení měřené síly. Amplituda kmitů je nepřímo úměrná velikosti odporu R. Amplituda kmitů je závislá na více faktorech, například uchycení rezonátoru nebo použití materiálů zachycujících vibrace. Oscilátor je tlumen vlivem zvětšujícího se zatížení, které ovlivňuje činitel jakosti. :[15], [17], [18]

K výpočtu náhradního schéma piezoelektrického rezonátoru slouží vzorce:

$$L = \rho \frac{al}{8b} \frac{(s_{33}^e)^2}{d_{13}^2} \quad (5.3)$$

$$C = \frac{8bl}{\pi^2 a} \frac{d_{13}^2}{s_{33}} \quad (5.4)$$

$$R = \frac{\pi^2 a}{4bl} \frac{(s_{33}^E)}{d_{13}^2} \quad (5.5)$$

$$C_0 = \varepsilon_{11}^s \frac{bl}{a} \quad (5.6)$$

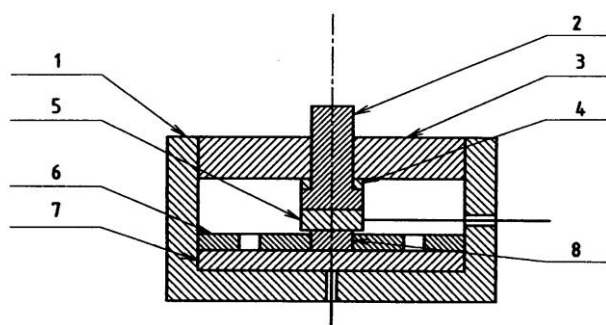
kde

L	indukčnosti cívky (H)
C	kapacita kondenzátoru (F)
R	odpor rezistoru ( $\Omega$ )
C <sub>0</sub>	kapacita (závislá na rozměrech elektrod) (F)
$\rho$	hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
a, b, l	rozměry piezokrystalu (m)
$d_{13}$	piezoelektrický koeficient ( $\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$ )
$s_{33}^E$	složka tenzoru elastického napětí při E=konst. ( $\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1}$ )
$\varepsilon_{11}^s$	složka tenzoru permitivity při konstantní deformaci (-)

## 5.2 Konstrukce piezoelektrických taktilních senzorů

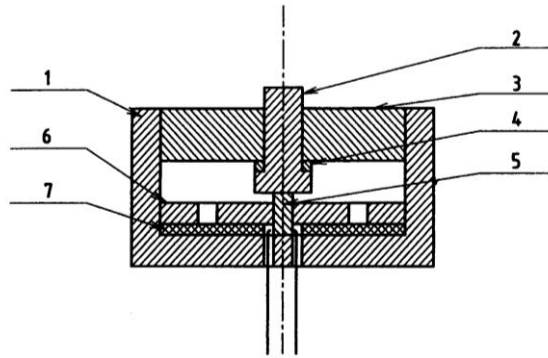
U konstrukce piezoelektrických taktilních senzorů je důležité, aby splňovala pár podstatných podmínek. Jednou z nich je, aby dotyková síla působila kolmo na piezoelektrický výbrus. Výbrus musí být správně uložen v senzoru a připojen k měřicím elektrodám. Pokud by rezonátor nebyl umístěn do uzlů s rezonančními kmity, docházelo by k tlumení krystalu.

Na *Obr. 5.2*, je vidět konstrukce senzoru, který používá pružný kloub k uchycení rezonátoru. Materiál PZK 850 je zde použit jako piezokeramický rezonátor, který je uložen ve vodorovné pozici. Ze spodní strany je přiložena elektroda z mosazi 7, a ze shora je uložena elektroda 5. Obě elektrody jsou připojeny do oscilátoru. Správnou pozici krystalu zajišťuje pružný kloub 6. Na elektrodu 5 je přenášena svisle působící síla z kolíku 2. Na piezokeramiku 8 působí síla přítlačná mezi dvěma elektrodami a ze strany síly od pružného kloubu. Celý senzor je zabalený do pouzdra 1 a uzavřený víkem 3. :[17]



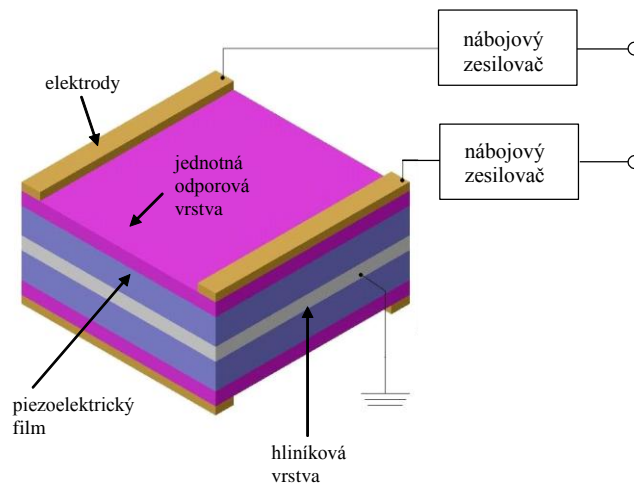
*Obr. 5.2 Taktilní senzor PZTC-1*[17]

Na *Obr. 5.3*, je znázorněna konstrukce snímače, který má vývody přímo napájené na vodivé plochy. Piezokeramika 5 je uložena mezi dnem pouzdra 1 a přítlačným kolíkem 2, který tlačí měřenou silou na piezokeramiku. Vycentrování rezonátoru je provedeno pružným kloubem 6, vyrobeným z PE a distančním kroužkem 7. Senzor je zakrytý víkem 3 a kolík je podložen podložkou 4 z důvodu malého předpětí rezonátoru. :[17]



Obr. 5.3 Taktilní senzor PZTC-3[17]

Senzor na Obr.5.4 nachází použití v robotice a to konkrétně na konečcích prstů robotické ruky. Celý senzor se skládá z pěti vrstev. Uprostřed se nachází vrstva z hliníku ze dvou stran obalená 6  $\mu\text{m}$  tlustým polymerním materiálem. Na spodní i vrchní části jsou připevněny elektrody, mezi kterými je odpor asi 845  $\Omega$ . Střední hliníková vrstva je uzemněna a elektrody jsou připojeny k nábojovým zesilovačům. :[11]



Obr. 5.4 Piezoelektrický senzor s polymerem [11]

## 6 Praktické využití piezoelektrických senzorů

### 6.1 Použití piezoelektrického taktilního senzoru v endoskopii

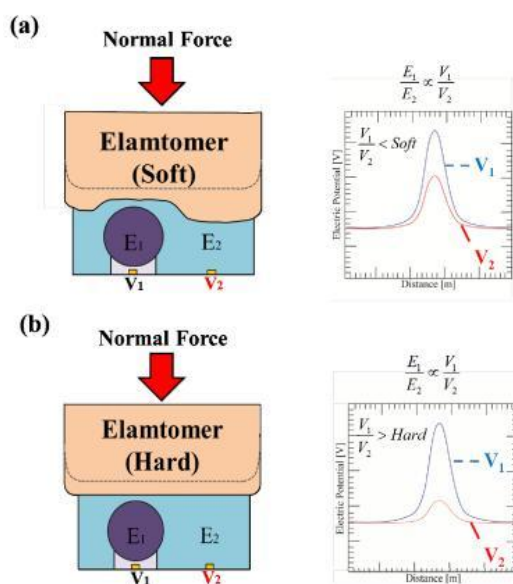
Velmi praktické využití, při kterém lze zachraňovat lidské i zvířecí životy, najde piezoelektrický taktilní senzor například v medicíně. A to konkrétně u vyšetřovací metody, která prohlíží tělní dutiny a duté orgány, tzv. endoskopii. Rakovina vytváří tvrdé hrbolky (tumory) na měkké tkáni (žaludek, plíce, prostata atp.). Submukózní tumory žaludku jsou v raném stádiu, pomocí běžné endoskopie nebo rentgenem, téměř nezjistitelné. :[8]

Již mnoho vědců prezentovalo taktilní senzory v různých rozměrových variantách a způsobů měření taktilní informace při minimální invazivní chirurgii (MIS). V roce 2009 byl zhotoven piezoelektrický taktilní senzor o rozměrech  $22 \times 4 \times 0.8$  mm, složený ze tří PVDF vrstev. V roce 2013 se skupině vědců podařilo vyvinout senzor, který je schopný rozlišovat měkkou a tvrdou tkáň pomocí připojení k laparoskopu. Bohužel kvůli jeho rozměrům  $6,5 \times 3,5$  mm, ho nelze prakticky použít. Stejná skupina vědců v roce 2015 vyvinula piezoelektrický taktilní senzor o průměru 1,5mm, který je možné zavést do endoskopického kanálu o průměru 2 mm. :[8]

#### 6.1.1 Mechanismus senzoru

Mechanismus piezoelektrického taktilního senzoru je tvořen do dvou struktur pro odlišení mechanických vlastností viz *Obr. 6.1*. Dvě struktury s rozdílnými Youngovými moduly jsou uloženy na povrchu piezoelektrického materiálu PVDF. Vnitřní struktura E1 se skládá z měďové kuličky a vnější struktura je složena ze silikonového materiálu PDMS. Pokud je na elastomer působeno normální silou a přijde do styku se senzorem, přítlačná síla je přenesena na piezoelektrickou vrstvu pomocí vnitřní a vnější struktury. Pokud Youngův modul vnitřní struktury je větší než vnější struktury, je napětí na piezoelektrickém filmu nerovnoměrně rozloženo. :[8]

K oběma strukturám jsou připevněny výstupy  $V_1$  a  $V_2$ . Pokud taktilní senzor narazí na měkké objekty, tak deformace vnější struktury bude větší než hodnota vnitřní struktury. Z toho vyplývá, že rozdíl mezi napětím  $V_1$  a  $V_2$  bude velmi malý (viz *Obr. 6.1a*). Naopak, pokud senzor narazí na tvrdý objekt, síla bude přenesena na vnitřní strukturu. Rozdílný tlak mezi strukturami je větší, tudíž bude větší napěťový rozdíl (viz *Obr. 6.1b*). :[8]

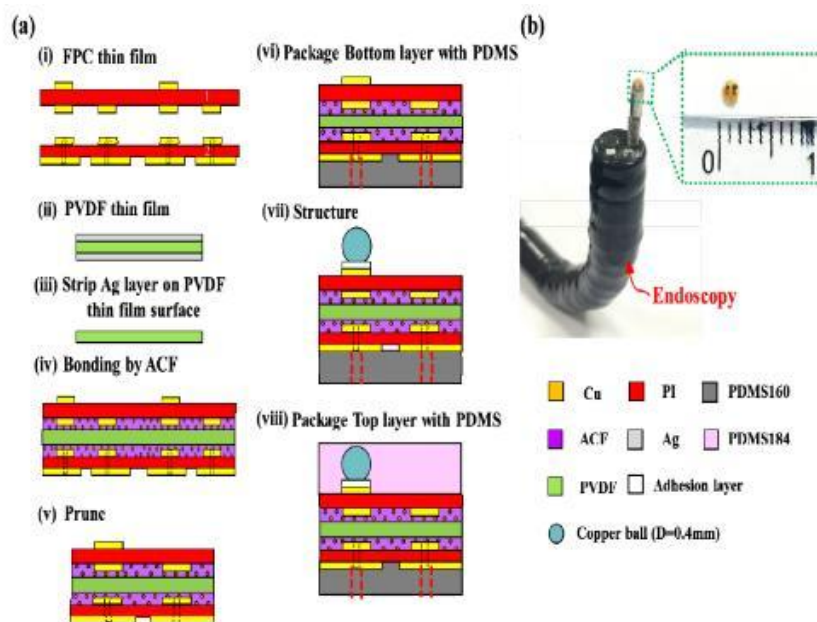


Obr. 6.1 Mechanismus senzoru a) v kontaktu s měkkým elastomerem, b) v kontaktu s tvrdým elastomerem [8]

### 6.1.2 Výroba senzoru

Na Obr. 6.2a je schematicky zobrazen výrobní proces miniaturního senzoru. V první řadě se vytvoří elektrody na flexibilní tištěný obvod (FPC, neboli flexibilní tištěný obvod) pomocí vypálení a vyleptání podle předlohy na tenkém filmu. Snímač byl vyroben za použití 28 $\mu$ m tenkého PVDF filmu, který funguje jako snímací materiál. :[8]

PVDF je označováno jako piezoelektrický materiál budoucnosti především kvůli jeho malé hmotnosti, pružnosti, nízké spotřebě a toxické nezávadnosti. Následně se pomocí acetonu odstraní Ag vrstvy z obou stran a PVDF film se opláchne vodou. PVDF film je pak vložen mezi dvě vrstvy FPC, které jsou následně zabaleny do anizotropní vodivé fólie. Lamináty FPC a PVDF jsou dále stabilizovány pomocí drátů a spodní vrstvy PDMS 160. Nakonec je přidána vrstva s měděnou kuličkou, která je zabalena do vrstvy PDMS 184. Obr. 6.2b, zobrazuje zhotovený senzor. :[8]



Obr. 6.2 a) Výroba miniaturního senzoru, b) Snímek reálného senzoru [8]

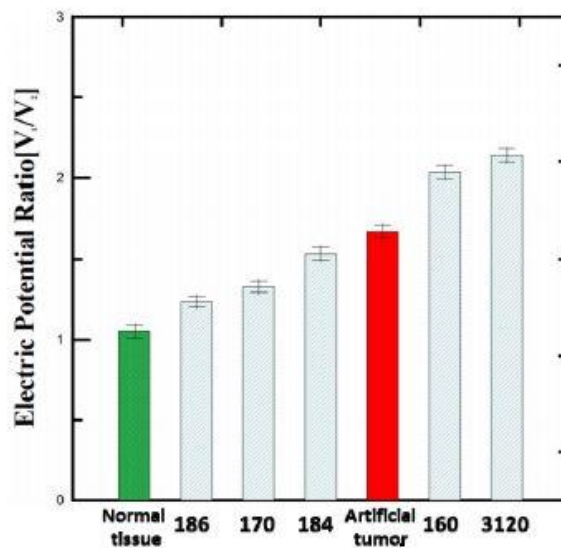
### 6.1.3 Dispozice pro dynamické měření

Z důvodu rychlého rozptýlení elektrického náboje nemůže senzor snímat statickou sílu. Pro testovací měření mechanických vlastností elastomerů a tkání byl vyroben systém na sebe navazujících zařízení. Systém se v první řadě skládal z generátoru signálu AFG3022, který řídí kmity tzv. shakeru frekvencí 1 Hz. Snímač síly 209C01 byl připevněn na přední straně shakeru, aby řídil sílu mezi taktilním senzorem a objektem. Výstupní signály senzoru síly byly odesílány přes kanál 1, do osciloskopu pro monitorování síly v reálném čase. Výstupy z taktilního čidla,  $V_1$  a  $V_2$ , procházely přes nábojový zesilovač NEXUS2690A do osciloskopu přes kanál 2 a 3. Výsledky z těchto dvou kanálů se vypočítají pomocí poměru napětí  $V_1$  a  $V_2$ . :[8]

### 6.1.4 Testování senzoru

K napodobení stavů submukozních nádorů byl založen test, kdy do prasečího žaludku byly vloženy materiály  $15 \times 15 \times 10$  mm o různých Youngových modulech. V tomto testu byl použit dvou pružinový senzor, měděná kulička v měkkém elastomeru PDMS. Pokud senzor přijde do kontaktu s objektem, je napětí nerovnoměrně rozloženo. Mechanické vlastnosti objektu jsou rozlišovány pomocí rozdílu indukovaných napětí z piezoelektrického měniče. Graf 6.1 zobrazuje výsledky testů. Měření bylo prováděno celkem 10x. Průměrná hodnota napětí při kontaktu s umělým nádorem byla 1,67 V. Tato hodnota se významně odchyľuje od hodnoty 1,05V, která byla změřena při kontaktu s normální tkání. :[8]



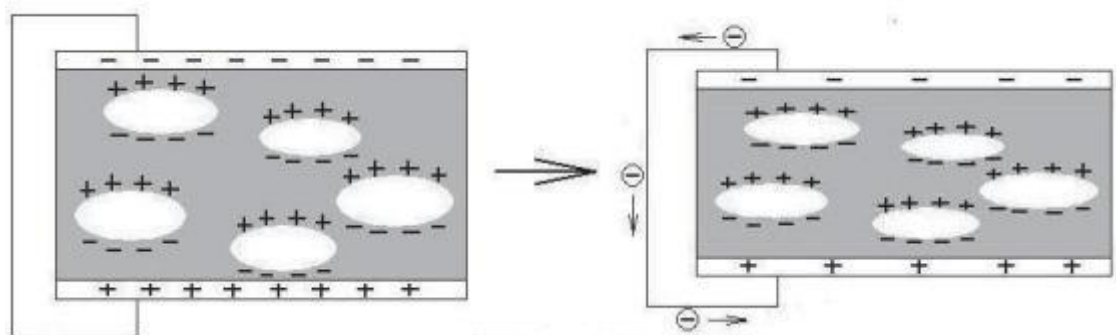


Graf 6.1 Výsledné hodnoty testovaného senzoru [8]

Výsledky testů potvrzují, že tento senzor je vhodný pro měření tvrdosti submukózních vrstev. Toto čidlo je vhodné použít i pro lidské pacienty vzhledem k tomu, že čidlo je pasivní součástka a nepotřebuje elektrický zdroj energie. :[8]

## 6.2 Aplikace piezoelektrického taktilního senzoru v robotické ruce

Robotické ruce jsou široce využívány jako náhrada horních končetin k účelu získání zpět svých funkcí po amputaci. V současné době u většiny komerčních robotických rukou musejí uživatelé odhadovat sílu uchopení předmětu. Občas je téměř nemožné odhadnout sílu úchopu a objekt proklouzává nebo dojde k lehké deformaci tělesa. Jako převodník mezi silou a elektrickým signálem je zde použita tenkovrstvá polymerní pěna s vnitřními dutinami, naplněnými plynem, tzv. piezoelektret (viz Obr. 6.3). :[6]

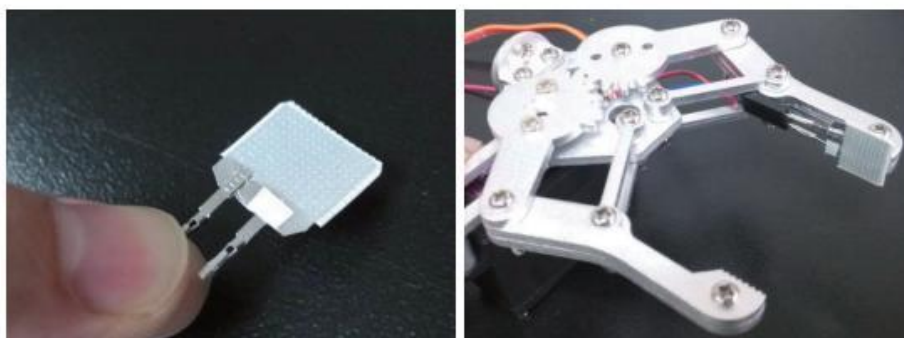


Obr. 6.3 Princip piezoelektretu[6]

V současné době je většina piezoelektretů založena na polypropylenu (PP) s tloušťkou od několika desítek po stovky mikrometrů. Tyto materiály mohou mít silnou odezvu s piezoelektrickým koeficientem  $d_{33}$  až 600 pC/N. Výhody těchto materiálů spočívají v tloušťce filmu, nízké hmotnosti, malé výrobní ceně, flexibilitě a roztažnosti. :[6]

### 6.2.1 Dispozice senzoru

Pro experiment byl vytvořen senzor o velikosti snímací plochy  $2 \times 1$  cm a tloušťce 44  $\mu\text{m}$ . Piezoelektrický film byl symetricky přeložen. Tím se vnitřní elektroda zabalila do vnější elektrody, která slouží také jako elektromagnetické stínění. Pomocí klinické pásky 3M TransporeTM 1527C-0 byla na vnější stranu senzoru přilepena mřížka pro ochranu a drsnost senzoru. Takto zhotovený senzor byl připevněn na prst robotické ruky (viz Obr. 6.4). Výstupní signál procházel nábojovým zesilovačem a pomocí filtru byl odstraněn rušící šum o frekvenci 50Hz, potom byl signál dále zesílen. Pro sběr dat byla použita vzorkovací frekvence 100Hz. Data byla posílána do počítače pro ruční ovládání pomocí USB-0816. :[6]



Obr. 6.4 Snímek senzoru a robotické úchopné hlavice se senzorem [6]

### 6.2.2 Princip robotické ruky

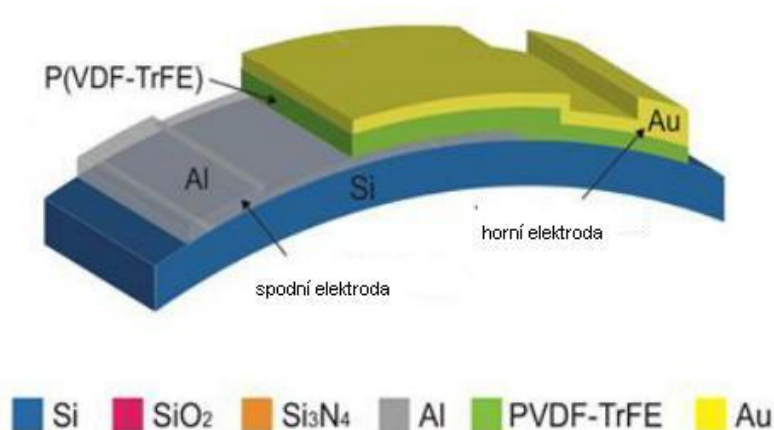
V principu robotická ruka detekuje čtyři fáze, které zahrnují první dotyk, držení, prokluz a konec dotyku. Pro rozlišení těchto čtyř fází jsou nastaveny napěťové prahy. Je-li střední hodnota signálu větší než 0,6 V je podmínka rozpoznána jako uchopení. Signály, které detekují prokluz objektu, oscilují mezi hodnotami -0,5 V a 0,5 V. Bohužel mezi stejnými hodnotami osciluje signál i pro podmínku držení. Proto se pro rozpoznání stavů, pod 0,6 V, nepoužívají průměrné hodnoty, ale hodnoty variance. Pokud hodnota variance větší, než 0,01 je podmínka považována za proklouzávání, v opačném případě je podmínka vyhodnocena jako držení. :[6]

### 6.3 Piezoelektrický kapacitní taktilní senzor

K měření citlivosti dynamické síly používá kapacitní senzor kombinaci piezoelektrického materiálu P(VDF-TrFE) a křemíku založeného na POSFET tranzistoru. POSFET tranzistor obsahuje piezoelektrickou vrstvu, nanesenou metodou rotačního nanášení, přímo na tzv. gatu MOSFET tranzistoru. :[3]

#### 6.3.1 Výroba senzoru

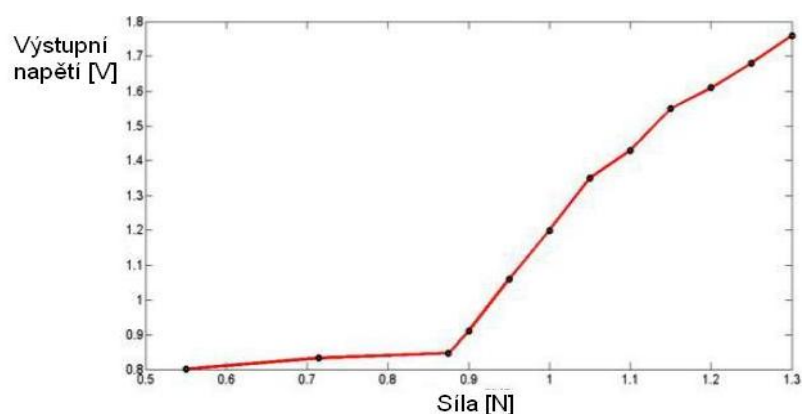
Základem kapacitního taktilního senzoru je křemíková páska o tloušťce 636  $\mu\text{m}$ . Na křemíkovou pásku je z obou stran napařena vrstva, která se skládá ze dvou částí  $\text{SiO}_2$  mezi které je vložena vrstva  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Tato vrstva se chová jako pevná maska pro vzorkování a vyleptávání. Pomocí plazmového nanášení (PECVD) je v přední části nanesen  $\text{SiO}_2$  pro zredukování napěťových vrstev. Ve spodní části se nachází 600nm tlustá hliníková vrstva, která slouží jako spodní elektroda kondenzátoru. Materiál P(VDF-TrFE) je rozpuštěn a míchán magnetickým míchadlem RER 500 při teplotě 80  $^\circ\text{C}$ . Výsledkem je 10% roztok, který je dále metodou rotačního nanášení, rozetřen pomocí odstředivé síly po celé ploše senzoru. Změřená tloušťka této vrstvy je 2  $\mu\text{m}$ . Horní elektroda je tvořena z 150 nm tlusté vrstvy zlata (Au), (viz Obr 6.5). Polování senzoru probíhá v předem definovaném směru v elektrickém poli za teploty, která je pod Curierovým bodem. :[3]



Obr. 6.5 Průřez kapacitním senzorem[3]

### 6.3.2 Testování senzoru

Senzor byl připevněn k vibračnímu systému TIRA o frekvenci 70Hz. Senzor využívá vlastností piezoelektrického materiálu pro přeměnu síly na náboj. Pomocí nábojového zesilovače, byl náboj převeden na napětí. Síla vibračního zařízení byla měřena snímačem síly, závislost této síly na výsledném napětí je zobrazena na (*Graf 6.2*). Z grafu lze vidět, že senzor je velmi citlivý při působení síly 0,9 N a více. :[3]



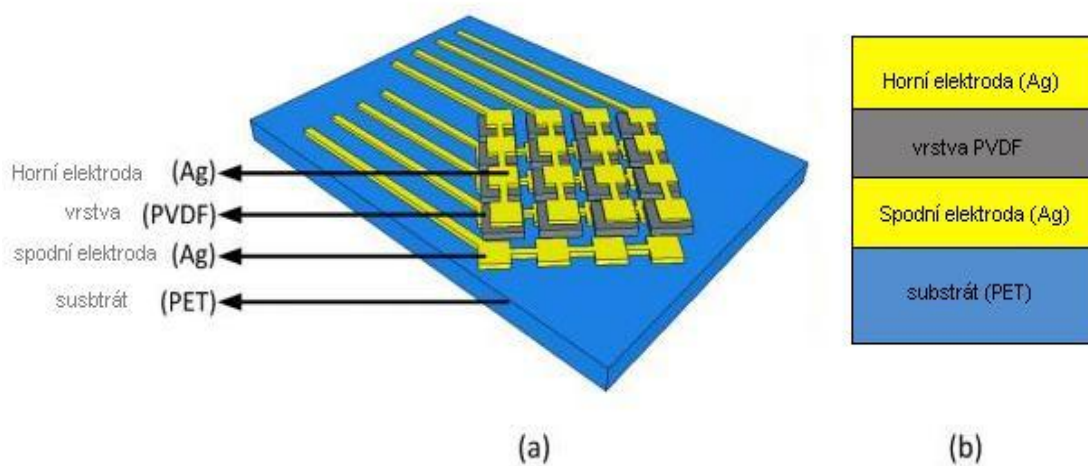
*Graf 6.2 Závislost výstupního napětí na působící síle[3]*

### 6.4 Piezoelektrický flexibilní senzor

Za posledních pár desetiletí přešlo uživatelské rozhraní z klasických tlačítek na flexibilní dotykové zařízení. Dotykové senzory jsou vyráběny pomocí CMOS principu, který je velmi drahý na výrobu. Tento senzor je vyroben za použití technologie Tištěné elektroniky (TE). Elektronický obvod je vytisknut do substrátu z polyethylenu tereftalátu (PET), pomocí stříbrného inkoustu. Snímač obsahuje pole 4x4 vytištěných senzorů. Jako piezoelektrický materiál je použit polymer PVDF, který vykazuje nejlepší vlastnosti pro výrobu flexibilního senzoru. Piezoelektrický taktilní snímač je schopen vytvořit napětí až 10 V. :[5]

### 6.4.1 Složení senzoru

Na Obr. 6.6a je schematicky zobrazen senzor a jeho vrstvy na Obr. 6.6b. Tištění stříbrných obvodů do substrátu PET bylo provedeno tiskárnou AMI MSP 485. V první řadě je vytisknuta vrstva spodních elektrod (16 čtverců s rozměry 0,4×0,4 cm), které jsou navzájem propojeny. Elektrický obvod je potom uložen na 20 minut v peci s teplotou 120 °C. V druhé řadě je 16 čtverců překryto PVDF vrstvou s rozměry 0,6×0,6 cm. A senzor je uložen do pece s teplotou 130 °C pro odstranění rozpouštědel a zvýšení rekrytalizace PVDF. Nakonec je vytištěna vrstva horních elektrod. Celková tloušťka senzoru je průměrně 6,5 μm. :[5]



Obr. 6.6 a) schematické zobrazení senzoru b) průřez vrstvami senzoru[5]

## 7 Závěr

V bakalářské práci jsem uvedl přehled a vyhodnocení taktilních senzorů pro automatizaci a jejich princip. Každý druh taktilního senzoru využívá jako převodník mezi silou a el. signálem, jiný fyzikální jev. Piezorezistivní taktilní snímače, využívají jako převodník polymer, který vlivem vnější síly mění svůj odpor a ovlivňuje tím výsledný signál. Maticové uspořádání senzorů je možné využít v medicíně, kde lze změřit rozložení tlaku v chodidlech nebo kloubech viz Plantograf V05 – V16. V automobilovém průmyslu lze takovýto snímač použít pro měření rozložení tlaku v sedačce. Kapacitní senzory využívají, jak už název napovídá, kapacitu kondenzátoru, která se mění při působení síly. Optovláknové senzory využívají modulaci světla, které prochází optickým vláknem. Tento druh senzoru je nákladný na výrobu z toho důvodu, že pro každé optické vlákno je zapotřebí světelný zdroj a přijímač.

Hlavní část bakalářské práce je věnována piezoelektrickým senzorům. Jako převodník se u těchto senzorů používá materiál, který je schopný piezoelektrického jevu. Prvním objeveným monokrystalickým materiálem s piezoelektrickými vlastnostmi byl křemen. Přírodní křemen kvůli nečistotám nevyhovuje, používá se tedy syntetický křemen. Ze skupiny polykrystalických látek je používána piezokeramika, která je vypalována v peci a pro piezoelektrické vlastnosti je potřeba ji polarizovat v elektrickém poli. Nejpoužívanějším materiálem ze skupiny polymerů je materiál PVDF, který musí být také polarizován pro získání piezoelektrických vlastností. Největší výhodou toho materiálu je jeho flexibilita, malá hmotnost, výborné piezoelektrické vlastnosti, chemická a tepelná odolnost.

Piezoelektrické taktilní senzory jsou nejčastěji vyráběny s PVDF vrstvou, kvůli vlastnostem tohoto materiálu. Mezi výhody těchto senzorů patří velmi dobrá citlivost, malé rozměry a snadná konstrukce. Z těchto důvodů je vhodné sensor instalovat např. do úchopné hlavice robota nebo do aktivních protéz v biomechanice. V medicíně najde sensor využití například při hledání tumorů na měkké tkáni v endoskopii.

## 8 Seznam použitých zdrojů

- [1] ARNAU, A. *Piezoelectric transducers and applications*. Berlin: Springer-verlag, 2004. ISBN 3-540-20998-0.
- [2] BENEŠ, P., CHLEBNÝ, J., KRÁL, J., LANGER, J., MARTINÁSKOVÁ, M. *Automatizace a automatizační technika*. 5.vydání. Brno: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-3747-5
- [3] DAHIYA, R., et al. *Ultra-thin silicon based piezoelectric capacitive tactile sensor*. 30<sup>th</sup> Eurosensors Conference, Budapest 2016
- [4] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [5] EMAMIAN, S., et al. *Fully printed and flexible piezoelectric based touch sensitive skin*. Michigan, Western Michigan university, 2015
- [6] FANG, P., ZHUO, Q., TIAN, L., LI, G. *A piezoelectret-based approach for touching and slipping detection in robotic hands*. Shenzhen, Chinese academy of sciences, 2015
- [7] HERNANDEZ-MENDEZ, S., et al. *Characterization of two force sensors to be used in a robotic hand*. Universidad autónoma de San Luis Potosí, 2015. s. 155-160.
- [8] CHUANG, C.H., et al. *Piezoelectric tactile sensor for submucosal tumor hardness detection in endoscopy*. Yung-Kang City, Taiwan, 2015
- [9] KIM, T. *Characterization and applications of piezoelectric polymers*. Berkeley: University of California, 2015.
- [10] KOUKOLIK, V. *Využití piezoelektrického jevu v praxi*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce KUČEROVÁ, E.
- [11] NAKAMURA, Y., HANAFUSA, H., UENO, N. *A piezoelectric film sensor with uniformly expanded surface to detect tactile information for robotic end-effectors*. Japan Ind. robot Assoc. Japonsko, 1985
- [12] PETRŽILKA, V., et al. *Piezoelektrina a její technické použití*. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1960.
- [13] RIPKA, P., ĎAĎO, S., KREIDL, M., NOVÁK, J. *Senzory a převodníky*. Praha: vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [14] VOLF, J. *Taktilní senzory pro automatizaci*. Automa, 2008. s. 16-19.
- [15] VOLF, J. *Taktilní informace*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2006.
- [16] VOLF, J., et al. *Pressure distribution measurement system Plantograf V12 and its electrodes configuration*. Praha: ČZU, 2015. Agronomy research, s. 732-738.
- [17] VOLF, J., VLČEK, J., SEMNICKÝ, T. *The piezoelectric tactile sensor for static force measurement*. Rio de Janeiro: XVIII IMEKO World Congress, 2006
- [18] VOLF, J. *Elektronika – pro zaměření robotizace technologických procesů*. Praha: ČVUT, 1987.
- [19] VOLF, J., VLČEK, J., ŠEMNICKÝ, T. *Taktilní čidla s využitím piezoejektu*. Herbertov: ČVUT, 2005

- [20] *Piezoelectricity* [online] [cit. 12.2.2017] dostupné na:  
<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>
- [21] *Piezoelektrické snímače* [online] [cit. 19.2.2017] dostupné na:  
<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/ka03-05.htm>
- [22] *CeramTec piezokeramika* [online] [cit. 20.2.2017] dostupné na:  
<http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics>
- [23] REICHL, J. *Piezoelektrická keramika* [online] [cit. 20.2.2017] dostupné na:  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/422-piezoelektricka-keramika>
- [24] CROWDER, M. *Automation and robotics*. [online] [cit. 2.3.2017] dostupné na:  
<http://www.southampton.ac.uk/~rmc1/robotics/artactile.htm>
- [25] *Odporové tenzometry* [online] [cit. 10.3.2017] dostupné na:  
<http://homel.vsb.cz/~jur286/mast/tenzometry.htm>
- [26] *Piezoelectric constants* [online] [cit. 20.2.2017] dostupné na:  
<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>
- [27] *Snímač piezoelektrického namáhání – piezoelektrický jev* [online] [cit. 12.2.2017]  
dostupné na: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590>



## Seznam obrázků

1. Obr. 2.1 Krystalová struktura piezokeramiky a) nad Curierovou teplotou b) pod Curierovou teplotou .....	2
2. Obr. 2.2 Vznik nábojů při roztažení a stlačení elementární krystalové buňky .....	3
3. Obr. 2.3 Obr. 2.3 Podélný, příčný a stříhový piezoelektrický jev .....	3
4. Obr. 3.1 Piezoelektrické jevy u krystalu křemene .....	8
5. Obr. 3.2 a) Náhodná polarizace dipólů, b) Polarizace dipólů el. polem, c) Remanentní polarizace po odebrání el. pole .....	9
6. Obr. 4.1 Funkce čidla s vodivým elastomerem .....	14
7. Obr. 4.2 Konstrukce snímače PMT 1.4 .....	15
8. Obr. 4.3 Snímek plantografu V12 a 3D zobrazení přenesené informace do PC. ....	15
9. Obr. 4.4 Konstrukce snímače Plantografu V12 .....	16
10. Obr. 4.5 Rozměry elektrody v plantografu V12 .....	16
11. Obr. 4.6 Základní části FSR senzoru .....	17
12. Obr. 4.7 Princip dvouvrstvého senzoru .....	19
13. Obr. 4.8 FSS-SMT senzor .....	19
14. Obr. 4.9 a) Difundovaný polovodičový tenzometr, b) Kovový foliový tenzometr .....	21
15. Obr. 4.10 Kapacitní senzor s elastomerem .....	22
16. Obr. 4.11 Mikroohybový senzor .....	23
17. Obr. 4.12 Maticový mikroohybový snímač .....	24
18. Obr. 4.13 a) Senzor s optickou vazbou, b) senzor se změnou vzájemné vazbou .....	25
19. Obr. 4.14 Senzor s deformačním členem .....	25
20. Obr. 5.1 Náhradní schéma piezokrystalu .....	26
21. Obr. 5.2 Taktilní senzor PZTC-1 .....	29
22. Obr. 5.3 Taktilní senzor PZTC-3 .....	30
23. Obr. 5.4 Piezoelektrický senzor s polymerem .....	30
24. Obr. 6.1 Mechanismus senzoru a) v kontaktu s měkkým elastomerem, b) v kontaktu s tvrdým elastomerem .....	32
25. Obr. 6.2 a) Výroba miniaturního senzoru, b) Snímek reálného senzoru .....	33
26. Obr. 6.3 Princip piezoelektretu .....	34
27. Obr. 6.4 Snímek senzoru a robotické úchopné hlavičky se senzorem .....	35
28. Obr. 6.5 Průřez kapacitním senzorem .....	36
29. Obr. 6.6 a) schematické zobrazení senzoru b) průřez vrstvami senzoru .....	38

## Seznam grafů

1. Graf 4.1 Závislost odporu R elastomeru na působící síle F, $R=f(F)$ pro PMT 1.4 .....	14
2. Graf 4.2 Závislost odporu R na síle F, $R=f(F)$ .....	18
3. Graf 4.3 Závislost výstupního napětí na hmotnostním zatížení FSS-SMT senzoru ....	20
4. Graf 6.1 Výsledné hodnoty testovaného senzoru .....	34
5. Graf 6.2 Závislost výstupního napětí na působící síle .....	37