

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY



**Bakalářská práce**

# Návrh tlakového převodníku pro aerodynamická měření

**Jan Grenar**



# Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Jan Grenar
<b>Název bakalářské práce:</b>	Návrh tlakového převodníku pro aerodynamická měření
<b>Anglický název:</b>	Design of Pressure Converter for Aerodynamic Measurements
<b>Akademický rok:</b>	2017/2018
<b>Obor studia:</b>	Teoretický základ strojního inženýrství
<b>Ústav:</b>	Ústav letadlové techniky
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	Ing. Jan Klesa Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: Počet obrázků: Počet příloh:

**Klíčová slova:** Snímače tlaku, Senzor tlaku, Pitot-statická trubice, Tlakový převodník, Prandtlůva sonda

**Keywords:** Pressure sensors, Pitot-static tube, Pressure transducer, Prandtl probe

**Anotace:** Tato bakalářská práce se zabývá návrhem tlakového převodníku pro aerodynamická měření při nízkých rychlostech proudění. Použité snímače tlaku byly vybrány vedoucím práce. Cílem studenta bylo navrhnout obvodovou desku pro zapojení senzorů a navrhnout sondu pro měření. Celý systém se následně ozkoušel a byla vyhodnocena funkčnost a přesnost měření.

**Annotation:** This bachelor thesis deals with the design of a pressure transducer for aerodynamic measurements at low flow velocities. The pressure sensors used were selected by the supervisor. The aim of the student was to design a circuit board for connecting sensors and to design a probe for measurement. The entire system was then tested, and the functionality and accuracy of the measurements were evaluated.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne .....

Jan GRENDAR

Podpis.....

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grenar** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **437284**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh tlakového převodníku pro aerodynamická měření**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of Pressure Converter for Aerodynamic Measurements**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) rešerši rychlostních sond a tlakových převodníků vhodných pro dané rychlosti proudění
- 2) návrh tlakového převodníku a rychlostní sondy
- 3) ověřovací měření proudového pole
- 4) vyhodnocení výsledků měření

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího BP.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Klesa, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:



Ing. Jan Klesa, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



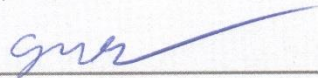
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**26.4.2018**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Poděkování**

Tímto děkuji mému vedoucímu Ing. Janu Klesovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné podněty při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Čenskému, Ph.D. za pomoc s konstrukcí převodníků a následným měřením.

# Obsah

Anotační list .....	4
Prohlášení .....	5
Zadání .....	6
Poděkování.....	7
Obsah.....	8
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	10
Seznam obrázků .....	12
1 Úvod .....	14
1.1 Cíl práce .....	14
1.2 Tlak .....	14
2 Senzory, sondy, kalibrace .....	17
2.1 Přístroje pro měření tlaku.....	17
2.1.1 Hydrostatické tlakoměry .....	17
2.1.2 Deformační tlakoměry .....	18
2.1.2.1 Trubicový tlakoměr .....	19
2.1.2.2 Membránový tlakoměr .....	20
2.1.2.3 Krabicový tlakoměr.....	20
2.1.2.4 Vlnovcový tlakoměr .....	21
2.1.3 Pístový tlakoměr .....	22
2.1.4 Elektrické tlakoměry .....	22
2.1.4.1 Snímače s odporovými tenzometry .....	23
2.1.4.2 Piezoelektrické snímače tlaku.....	27
2.1.4.3 Kapacitní snímače tlaku .....	29
2.2 Provedení rychlostních sond .....	30
2.2.1 Sondy pro měření celkového tlaku .....	30



2.2.1.1 Pitotova trubice .....	30
2.2.1.2 Kielova sonda.....	31
2.2.2 Sondy pro měření statického tlaku.....	32
2.2.3 Sondy pro měření dynamického tlaku .....	33
3 Návrh tlakového převodníku a sondy.....	35
3.1 Návrh tlakového převodníku.....	35
3.1.1 Použité senzory .....	35
3.1.2 Návrh elektrického zapojení a realizace PCB .....	38
3.1.3 Montážní krabička a kompletace .....	43
3.2 Návrh a realizace rychlostní sondy.....	46
3.3 Ověření funkčnosti převodníku a sondy .....	47
4 Závěr.....	51
Použitá literatura a zdroje .....	53
Přílohy .....	54

# Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
A	m	Velikost strany piezo destičky v ose X
B	m	Velikost strany piezo destičky v ose Y
C	F	Kapacita
C <sub>1</sub>		
C <sub>2</sub>		
D	m	Vzdálenost desek kondenzátoru
D	m	Vnější průměr Pitotovy trubice
D	m	Vnitřní průměr Pitotovy trubice
F	N	Síla
F <sub>x</sub>	N	Síla v působící v ose X
F <sub>y</sub>	N	Síla působící v ose Y
G	m/s <sup>2</sup>	Gravitační zrychlení
G <sub>M</sub>	N	Tíha závaží
G <sub>p</sub>	N	Tíha pístu
H	m	Výška
K		Koeficient deformační citlivosti
k'		Koeficient deformační citlivosti u polovodičových tenzometrů
k <sub>1</sub>	F <sup>2</sup>	Konstanta obsahující poměrnou permitivitu, permitivitu vakua a obsah desek kondenzátoru
K <sub>p</sub>		Piezoelektrická konstanta
l	m	Délka vodiče
p	Pa	Tlak
p	Pa	Statický tlak
P <sub>a</sub>	Pa	Naměřený dynamický tlak
PCB		Power distribution board (obvodová deska)
p <sub>d</sub>	Pa	Dynamický tlak
P <sub>max</sub>	Pa	Maximální snímačem měřený tlak
P <sub>min</sub>	Pa	Minimální snímačem měřený tlak
p <sub>t</sub>	Pa	Celkový tlak

Q	C	Elektrický náboj
R	$\Omega$	Odpor
S	m <sup>2</sup>	Obsah plochy
U	V	Napětí na výstupu
v	m/s	Rychlost
V <sub>o</sub>	V	Výstupní napětí snímače
V <sub>s</sub>	V	Napájecí napětí snímače
$\Delta l$	m	Rozdíl délky
$\Delta R$	$\Omega$	Rozdíl odporu
$\Delta S$	m <sup>2</sup>	Rozdíl plochy
$\Delta \rho$	$\Omega m$	Rozdíl rezistivity
$\varepsilon$		Relativní deformace
$\varepsilon_0$	F/m	Permitivita vakua
$\varepsilon_r$	F/m	Poměrná permitivita
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota
$\rho$	$\Omega m$	Měrný odpor (rezistivita)

# Seznam obrázků

Obrázek 1 – Základní tlakové pojmy [2].....	15
Obrázek 2 – Rozdělení snímačů podle převodu na el. Signál [2].....	16
Obrázek 3 – Překryv rozsahů senzorů [2] .....	16
Obrázek 4 – Mnoho trubičkový hydrostatický tlakoměr [4] .....	18
Obrázek 5 – Deformační člen. Zleva: Bourdonova trubice, Membrána, Krabice, Vlnovec [1] .....	19
Obrázek 6 – Bourdonova trubice [1].....	20
Obrázek 7 – Vlnovec [1] .....	21
Obrázek 8 – Ověřovací zařízení s pístovým tlakoměrem [1] .....	22
Obrázek 9 – Tvary tenzometrů [1] .....	24
Obrázek 10 – Spojení tenzometru s deformačním členem, schéma propojení tenzometrů [1] .....	25
Obrázek 11 – Řez membránou difundovaného polovodičového snímače [1].....	26
Obrázek 12 – Tlakový snímač tvořený metodou tenkých vrstev [1] .....	26
Obrázek 13 – Kombinace snímačů pro různá měření tlaku [1] .....	27
Obrázek 14 – Výřez piezoelektrického členu [1].....	28
Obrázek 15 – Piezoelektrický snímač [1].....	29
Obrázek 16 – Kapacitní snímač a jeho charakteristika [1] .....	29
Obrázek 17 – Pitotova trubice [5] .....	31
Obrázek 18 – Závislost tlakové diference na úhlu náběhu [4] .....	31
Obrázek 19 – Kielova sonda standartní (vlevo), modifikovaná (vpravo) [4].....	32
Obrázek 20 – Port pro odběr statického tlaku na trupu letadla [6] .....	32
Obrázek 21 – příklad provedení statického portu. Vlevo správně. Vpravo špatně. [5] .....	33
Obrázek 22 – Prandtlůva sonda s připojením hydrostatického manometru (tvar U) [5] ....	33
Obrázek 23 – konstrukční rozměry Prandtlůvy sondy [4].....	34
Obrázek 24 – Fotografie použitých senzorů .....	35
Obrázek 25 – Výňatek z datasheetu HSC – specifikace [7] .....	36
Obrázek 26 – Výňatek z datasheetu HSC – rozměry [7].....	36
Obrázek 27 – Výňatek z datasheetu SCX – specifikace [8] .....	37
Obrázek 28 – Výňatek z datasheetu SCX – rozměry [8].....	38
Obrázek 29 – Výňatek z datasheetu ADP3333 [9] .....	39

Obrázek 30 – Schéma obvodové desky pouze pro HSC (1. připojení zdroje; 2. kondenzátory, 3. regulátor, 4. prostor pro senzory, 5. připojení výstupního signálu) .....	40
Obrázek 31 – Schéma obvodové desky pro oba druhy senzorů (1. připojení zdroje; 2. kondenzátory, 3. regulátor, 4. prostor pro senzory, 5. připojení výstupního signálu, 6. připojení senzoru SCX) .....	41
Obrázek 32 – Vizualizace desek pro výrobu .....	42
Obrázek 33 – Neosazené a osazené desky.....	42
Obrázek 34 – Nákres osazené krabičky s vnějšími rozměry pro případné usazení do sestavy .....	43
Obrázek 35 – Rozměrový nákres krabičky.....	44
Obrázek 36 – Vytisknutá neosazená krabička (průchodka a BNC konektor pro ilustraci umístění) .....	45
Obrázek 37 – Osazená krabička.....	45
Obrázek 38 – Nákres sondy .....	46
Obrázek 39 – Vyrobena sonda .....	47
Obrázek 40 – Sonda připravená pro měření v horní polovině průměru .....	48
Obrázek 41 – Pohled do výstupu dmyhadla (kabelový svazek ve spodní části).....	48
Obrázek 42 – Rozložení měřících bodů v obou polovinách průměru dmyhadla. Čísla označují odběr (trubičku) na sondě. ....	49

# 1 Úvod

## 1.1 Cíl práce

Cílem práce je zmapovat postup nutný k návrhu a konstrukci tlakového převodníku a rychlostní sondy pro aerodynamická měření.

Součástí práce je rešerše, která se zabývá způsoby měření tlaku a zařízení či senzorů k tomu účelu používaných. Součástí teoretické části je i souhrn rychlostních sond, se kterými se můžeme v aerodynamické praxi nejčastěji setkat.

Práce dále mapuje samotný návrh tlakového převodníku (tlak na elektrický signál) za pomoci piezoelektrických senzorů, které byly poskytnuty fakultou. Následuje návrh jednoduché rychlostní sondy a následné testovací měření obou navržených částí.

## 1.2 Tlak

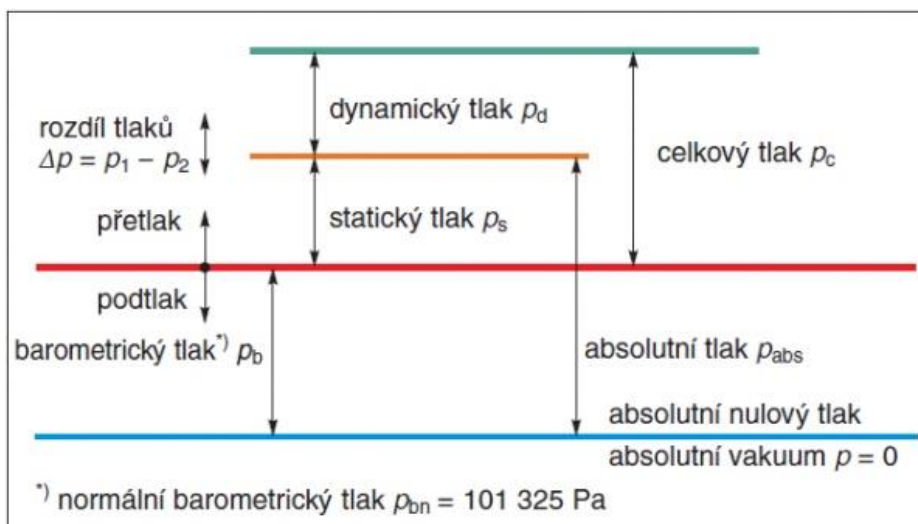
Tlak je definován jako podíl rovnoměrně rozložené síly  $F$ , která působí kolmo k ploše  $S$  daného obsahu.

$$p = \frac{F}{S}$$

Jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Často setkáváme se zavedením jednotky [bar], která odpovídá  $10^5$  Pa. Případně jednotky technická atmosféra [at], která je rovna tlaku 98066,5 Pa.

Absolutní tlak je měřený od hodnoty nulového tlaku. Tlak atmosférický je absolutní statický tlak ovzduší, který se měří u zemského povrchu. Atmosférický tlak se mění v závislosti na poloze měření a okolních podmínkách (počasí atp.)

Přetlakem a podtlakem poté nazýváme rozdíly naměřeného a počátečního tlaku. Na obrázku 1 jsou rozdíly mezi přetlakem a podtlakem znázorněny graficky.



Obrázek 1 – Základní tlakové pojmy [2]

V proudící tekutině rozlišujeme ještě celkový, statický a dynamický tlak. Dynamický tlak je tlak proudu vzduchu nabíhajícího na plochu (senzor). Jedná se o vektor se shodným směrem jako je vektor rychlosti. Dynamický tlak  $p_d$  je určen vztahem

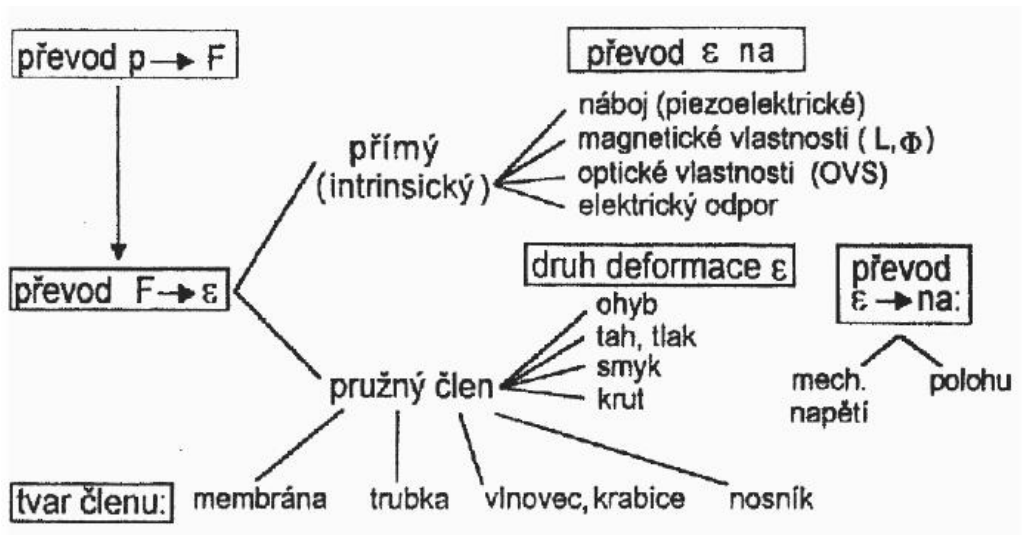
$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Statický tlak  $p$  není závislý na pohybu tekutiny. Od toho se odvíjí i způsob jeho měření. Buď odběrem zapuštěným do povrchu obtékaného tělesa, anebo pitot-statickou sondou, která slouží ke zjišťování celkového i statického tlaku. Celkový tlak  $p_t$  se potom rovná součtu statického a dynamického tlaku:

$$p_t = p + p_d$$

Této skutečnosti se používá k měření rychlosti proudění.

Z výše uvedeného je jasné, že pokud můžeme působení tlaku vystavit plochu o známém obsahu, není problém převést měření tlaku na měření síly. Z toho plyne podobnost principů měření sil. To je znázorněno na obrázku 2, který znázorňuje způsoby převodu tlaku na elektrický výstupní signál.

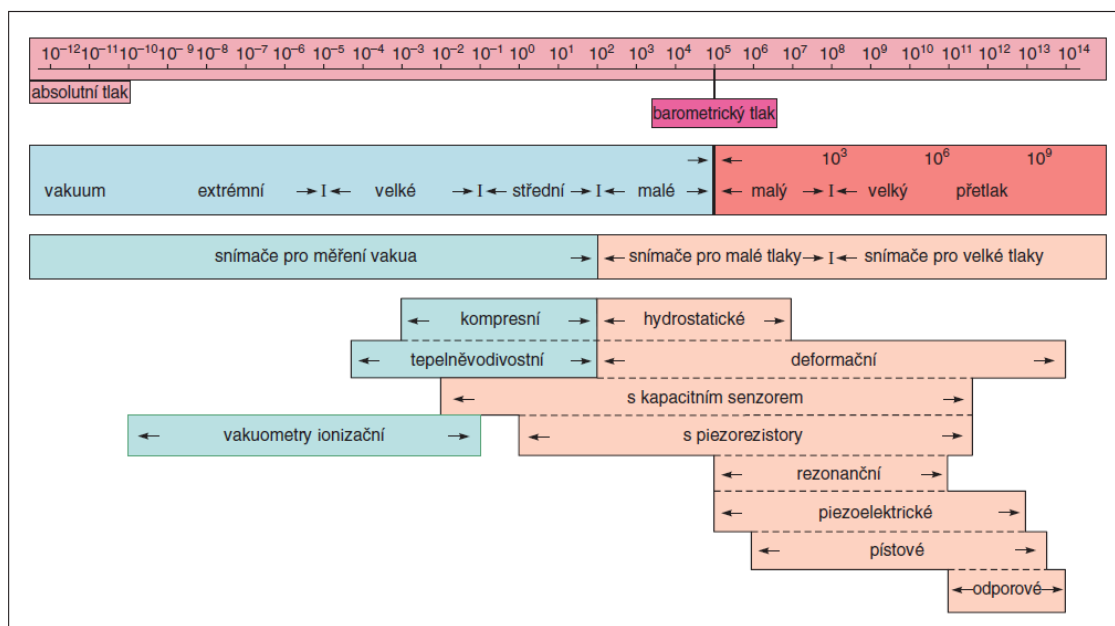


Obrázek 2 – Rozdělení snímačů podle převodu na el. Signál [2]

Ze schématu vyplývá, že můžeme rozlišovat dva základní principy měření. A to:

- Měření pomocí pružného členu
- Měření přímé

Obě metody se mohou konstrukčně zásadně odlišovat. Dle konstrukce, provedení a aplikace rozlišujeme nepřeborné množství senzorů. V praxi se setkáváme s měřením tlaku v rozmezí od  $10^{-12}$  až do  $10^{14}$  Pa, což je rozmezí, ve kterém žádný snímač nemůže přesně fungovat. Avšak rozsahy jednotlivých senzorů se překrývají. To názorně ukazuje obrázek 3. [2][3]



Obrázek 3 – Překryv rozsahů senzorů [2]



## 2 Senzory, sondy, kalibrace

### 2.1 Přístroje pro měření tlaku

Přístroje pro měření tlaku můžeme rozdělit podle fyzikálních principů, které přímo ovlivňují charakter převodu tlaku na výstupní signál. Pro použití v technice můžeme použít následující rozdělení:

- Hydrostatické tlakoměry
- Deformační tlakoměry
- Pístové tlakoměry
- Elektrické tlakoměry

Princip jejich funkce je popsán v následujících kapitolách.

#### 2.1.1 Hydrostatické tlakoměry

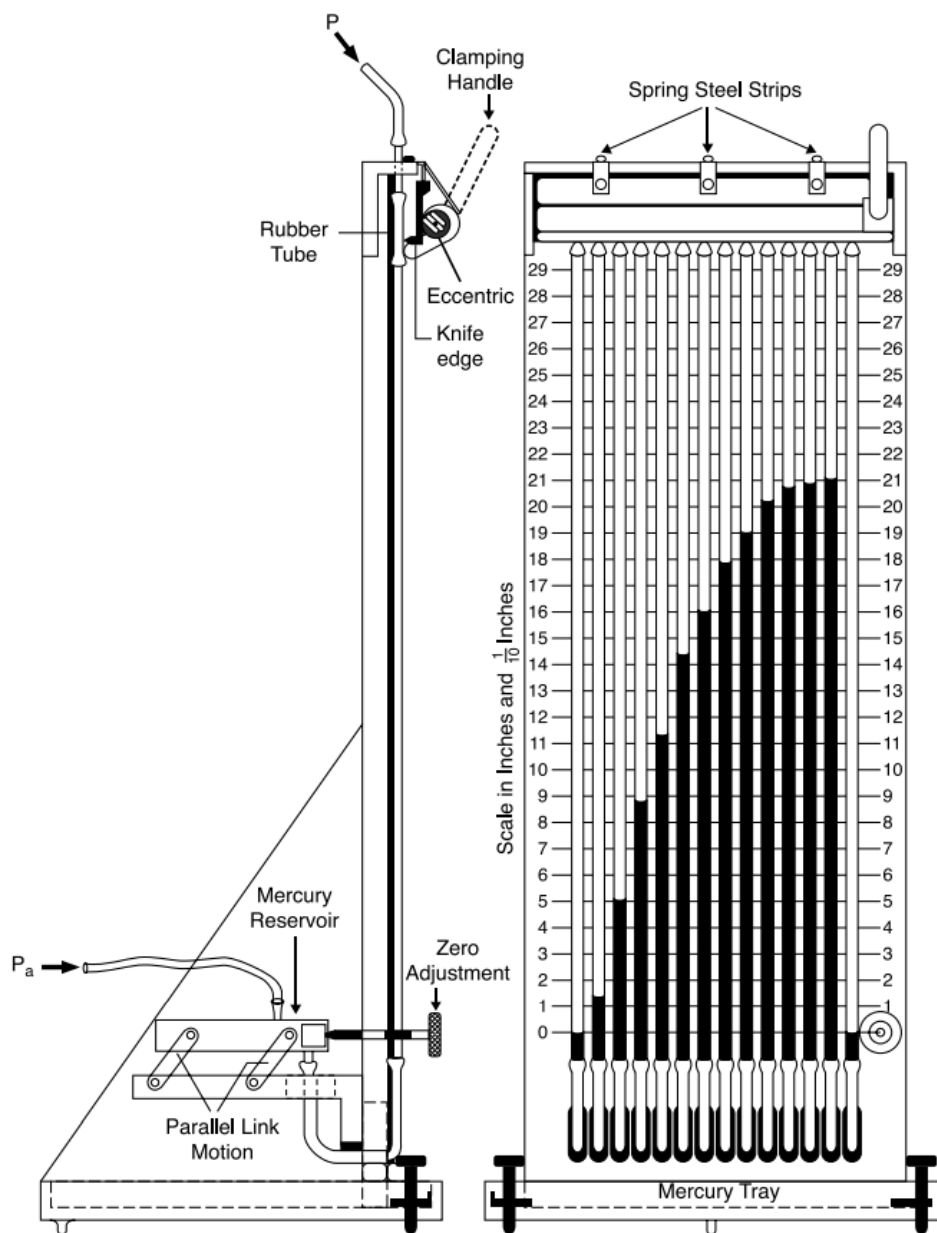
Princip závisí na účinku hydrostatického tlaku, kterým působí sloupec kapaliny o výšce  $h$  a hustotě  $\rho$

$$p = h\rho g$$

Měřenou jednotkou je výška kapalinového sloupce  $h$ , tudíž dochází k převodu tlaku na měření délek. Je nutné si uvědomit, že hustota je závislá na teplotě. A proto i výsledek měření hydrostatického tlakoměru je závislý na teplotě.

Jako tlakoměrné kapaliny jsou nejčastěji použity voda, alkohol či rtuť. Délka trubice přímo ovlivňuje rozsah měření. Maximální délka bývá okolo 1,5 m. Rozsah měření pak 0,2 m pro rtuť a 15 kPa pro vodu.

Jedná se o jednoduchý, spolehlivý a přesný způsob měření. Nicméně absence signálu pro dálkový přenos nebo signálu pro další zpracování v řídicích obvodech znamená, že použití hydrostatického tlakoměru je omezeno hlavně na laboratorní použití. [1]



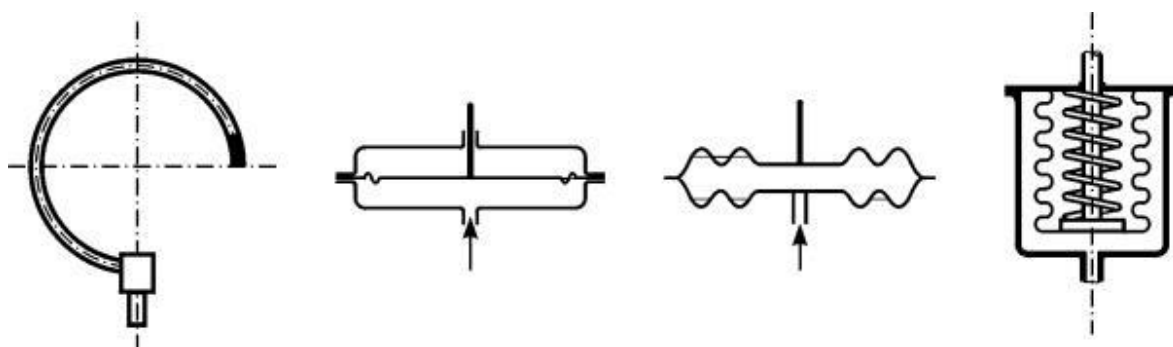
Obrázek 4 – Mnoho trubičkový hydrostatický tlakoměr [4]

## 2.1.2 Deformační tlakoměry

Tento druh tlakoměru je založen na změně geometrie tlakových prvků vlivem měřeného tlaku, který způsobí pružnou deformaci. Tlakové prvky se zhotovují z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi, z fosforového a beryliového bronzu atp. Mezi nejčastější tvary patří: [1]

- Bourdonova trubice
- Membrána
- Krabice

- Vlnovec



Obrázek 5 – Deformační člen. Zleva: Bourdonova trubice, Membrána, Krabice, Vlnovec [1]

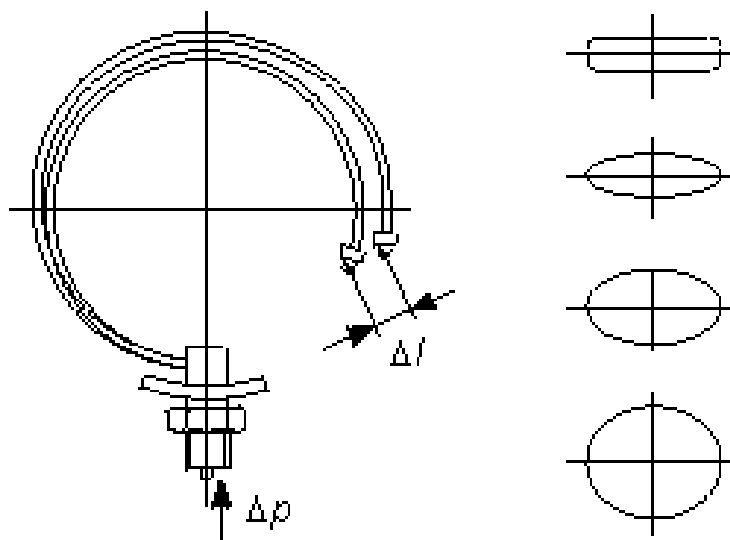
### 2.1.2.1 Trubicový tlakoměr

Jedná se o nejpoužívanější typ deformačního tlakoměru. Měřícím prvkem je trubice (Bourdonova trubice) eliptického průměru. Ta je stočena do oblouku, případně do spirály či šroubovice. Jeden konec je pevně uložen v tělese manometru a je opatřen spojkou pro přivedení měřeného tlaku. Volný konec je spojen s ukazatelem na stupnici. Toto spojení bývá zpřevodováno.

Po přivedení tlaku se trubice snaží změnit eliptický průměr na kruhový. Tím pádem dojde i ke změně zakřivení oblouku a pohybu volného konce. Tento pohyb je přes převodové ústrojí přenesen na jezdce pomocí kterého jsme již schopni odečíst tlak na stupnici přístroje.

Uspořádání přístroje se liší pro různé tlaky. Pro nižší je trubice mosazná s plošším profilem a pro vysoké ocelová s profilem, který se blíží kruhovému průřezu. Schéma konstrukce je znázorněno na obrázku 6.

Rozsah se pohybuje od 0 do 0,5MPa maximálně až 2000MPa. Tyto tlakoměry se vyrábějí jako kontrolní manometry (třída přesnosti 0,6 a 1) i jako provozní přístroje (třída přesnosti 1,5; 2,5 a 4). [1]



Obrázek 6 – Bourdonova trubice [1]

### 2.1.2.2 Membránový tlakoměr

Použitý tlakoměrový element je kovová membrána kruhového tvaru, která je zvlněna soustřednými kruhy. Membrána je umístěna mezi dvěma přírubami. Na jednu stranu je přiveden měřicí tlak, který vyvolá průhyb membrány. Ten je pak přenášen na ukazatel a následně na stupnici. Závislost průhybu na tlaku je přibližně lineární.

Tlakoměry se vyrábějí do tlaku 4 MPa. Mají vyšší citlivost než trubičkové tlakoměry. Po přivedení tlaku na obě strany membrány je možné membránový tlakoměr využít pro měření tlakové diference.

Velkou výhodou jsou malé rozměry a zejména malé setrvačné hmoty. Proto je vhodné použití tohoto tlakoměru pro pulzující tlaky. Navíc je možné mechanický převod na stupnici nahradit převodem na elektrický signál (kapacitně, indukčně či piezoelektricky). To se podrobněji probere v dalších částech této práce. [1]

### 2.1.2.3 Krabicový tlakoměr

Použití pro měření malých podtlaků, přetlaků či diferencí. Deformačním prvkem jsou dvě zvlněné membrány spojené do „krabice“. Membrány mají standardně průmět 50 až 100 mm. Deformace se opět přenáší pákovým mechanismem na ukazatel se stupnicí.

Rozsah je 10 až 1000 Pa. Citlivost je možné zvýšit spojením několika krabic do jednoho celku.

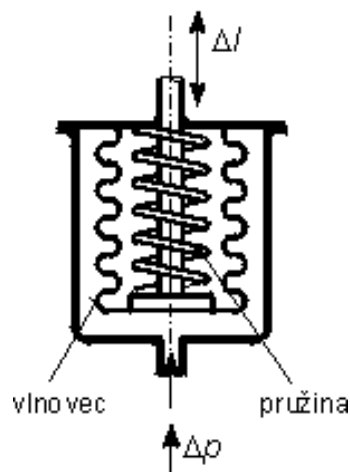
Tento druh tlakoměru se nejčastěji používá v přístroji pro měření barometrického tlaku (aneroid), kdy je krabice neprodyšně uzavřená a evakuována. Tlak je poté přiváděn na deformační člen zvenčí. [1]

#### 2.1.2.4 Vlnovcový tlakoměr

Deformačním členem je kovový tenkostěnný měch (vlnovec), který je umístěn v pouzdře. Do pouzdra je přiváděn měřený tlak. Deformace je pak opět přenášena táhlem na ukazatel.

Tuhost deformačního členu lze snadno ovlivnit vložením pružiny tak jako je tomu na obrázku 7. Místo kovového měchu lze použít měch z umělé hmoty (teflon), poté veškerou deformaci přebírá pružina.

Používá se pro měření tlakových diferencí a přetlaků o velikosti 0,4 MPa. Pokud vlnovec používáme pro měření difference, pak je větší tlak přiváděn do pouzdra a menší do vlnovce. Hlavní použití je v regulační technice. [1]



Obrázek 7 – Vlnovec [1]

Výhodou deformačních tlakoměrů je malá hmotnost, rozměry a velký měřicí rozsah s dostatečnou přesností. Dále vysoká odolnost a spolehlivost i v těžkých provozech, která z nich dělá jeden z nejčastěji používaných typu tlakoměru v průmyslu zároveň pro možnost úpravy výstupního signálu z mechanického na elektrický a možností dálkového přenosu.

Nevýhodou je možnost ovlivnění měření teplotou. Změna teploty ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu deformačního členu i převodového ústrojí ukazatele tlaku. Hrozí zde možnost trvalých deformací. Proto je nutná pravidelná kalibrace, která se provádí pomocí pístového tlakoměru [1][2].

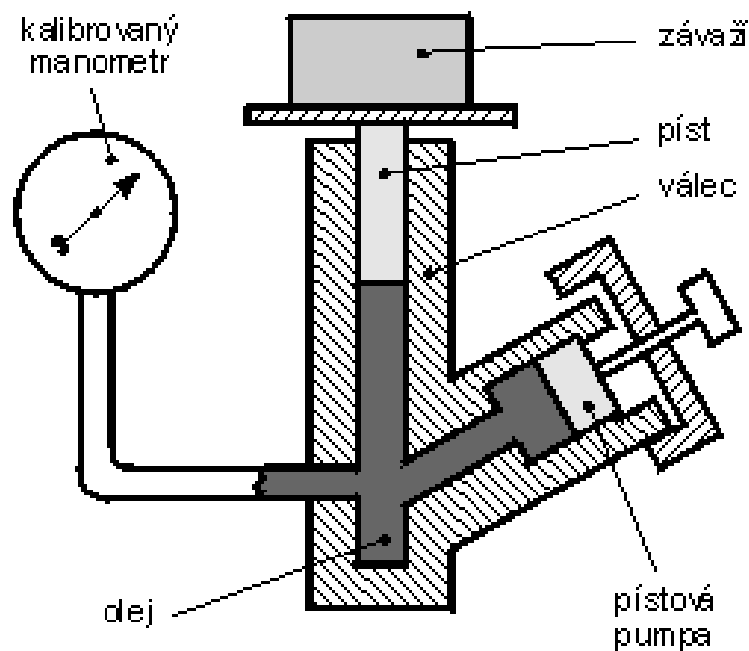
### 2.1.3 Pístový tlakoměr

Hlavní součástí pístového tlakoměru je píst přesného průměru, který je umístěn ve válci (obrázek 8). Přenos tlaku na píst probíhá pomocí oleje, kterým je celý systém naplněn. Působení síly, kterou tlak působí, je kompenzováno tíhou přídavného závaží a tíhou samotného pístu. Rovnováha nastane v okamžiku, kdy se píst nepohybuje ve směru své osy.

Tlakové měření se v tomto případě převádí na silové měření. Zvažujeme-li tíhu pístu  $G_p (N)$  a tíhu závaží  $G_M (N)$ , dále pak plochu pístu  $S (m^2)$ , dojdeme ke vzorci, který vyjadřuje měřený tlak  $p (Pa)$  takto:

$$p = \frac{G_p + G_M}{S}$$

Pro skutečnost, že kompenzační sílu je možné určit s vysokou přesností jsou tyto tlakoměry používány pro ověřování a kalibraci deformačních tlakoměrů. Ověřovací sestava obsahuje pístový tlakoměr, čerpadlo a zásobník oleje. Schéma ověřovacího zařízení je na obrázku 8 [1]



Obrázek 8 – Ověřovací zařízení s pístovým tlakoměrem [1]

### 2.1.4 Elektrické tlakoměry

Jedná se o snímače tlaku, které poskytují elektrický výstupní signál. Jsou to buď snímače přímo navržené pro tento účel, nebo klasické snímače doplněné o převodníky na elektrický signál.

### 2.1.4.1 Snímače s odporovými tenzometry

Tyto snímače se používají buď samostatně pro měření malých deformací materiálu (nosníky, nádoby hřídele atp.) nebo jako převodník mechanické deformace na elektrický signál u deformačních tlakoměrů.

Kovové tenzometry pracují na principu změny odporu vodiče, a to nejčastěji změnou délky vodiče. Ke změně odporu tedy dochází vlivem deformace vodiče v oblasti pružných deformací (meze platnosti Hookova zákona). Použitelné jsou vodiče i polovodiče (u polovodičů dochází k piezorezistivnímu jevu). K deformaci dochází zejména vlivem tlaku nebo tahu. Důsledek deformací je změna geometrické (vodiče) a krystalografické (polovodiče) orientace. To vede ke změně elektrického odporu.

Původní odpor vodiče, který můžeme spočítat takto:

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

se v důsledku působící síly změní o  $\Delta R$ . Tato změna je důsledkem změn délky o  $\Delta l$ , průřezu o  $\Delta S$  a i změnou struktury se změní měrný odpor o  $\Delta \rho$ . Pro malé změny potom bude platit

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Pro příklad uvažujme namáhání tahem, kdy se délka zvětšuje a pro zachování objemu se průřez zmenšuje, tudíž odpor vodiče roste. Uvažujme relativní deformaci

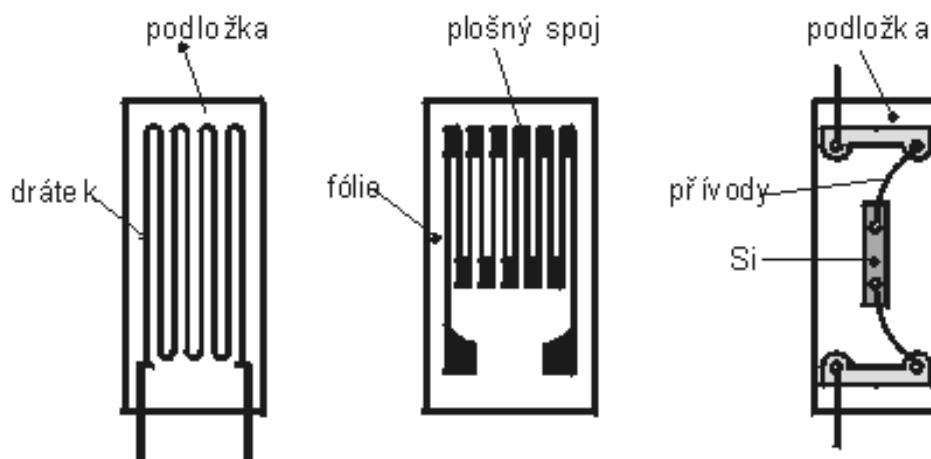
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Potom můžeme odvodit následující vztah pro změnu odporu

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k\varepsilon$$

$k$  je koeficient deformační citlivosti, který je závislý na materiálu vodiče. Pro úspěšné měření by měl být koeficient stálý, nezávislý na deformaci, teplotě a na úpravě deformačního materiálu. Velikost  $k$  se určuje takřka vždy experimentálně.

Vzhledem k tomu, že měříme přímo diferenci odporu  $\Delta R$ , která je přímo závislá na změně délky  $\Delta l$ , tak je vhodné, aby byla délka  $l$  vodiče co největší. Z tohoto důvodu mají tenzometrické snímače daný tvar, který je vidět na obrázku 9.



Obrázek 9 – Tvary tenzometrů [1]

Kovové odporové tenzometry jsou zhotoveny z odporových drátů s průměrem 0,02mm až 0,05mm. Mají tvar mnohonásobné vlásenky. Podkladovým materiálem je buď papír nebo tenká fólie z umělé hmoty. Celý snímač se potom lepí na měřenou část speciálním lepidlem. Složitější tvary tenzometrů (spirála, radiální atp.) se vyrábějí leptáním odporové fólie.

Polovodičové tenzometry jsou vyrobeny z křemíku. Vyrábějí se řezáním, broušením, leptáním monokrystalu případně planární technologií na křemíkovém substrátu. Následně se tenzometry z monokrystalu lepí buď na fenolformaldehydovou podložku či přímo na měřicí mechanický člen. Působením mechanického namáhání dochází ke změně elektrické vodivosti obdobně jako u kovových tenzometrů. Změna odporu je závislá na koncentraci příměsí i na typu polovodiče. Tyto snímače vykazují nelineární závislost odporu na teplotě i deformaci. Tato závislost je vyjádřena vztahem

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2$$

U polovodičových tenzometru je pak koeficient deformační citlivosti  $k'$  vyjádřen vztahem

$$k' = C_1 + C_2 \varepsilon$$

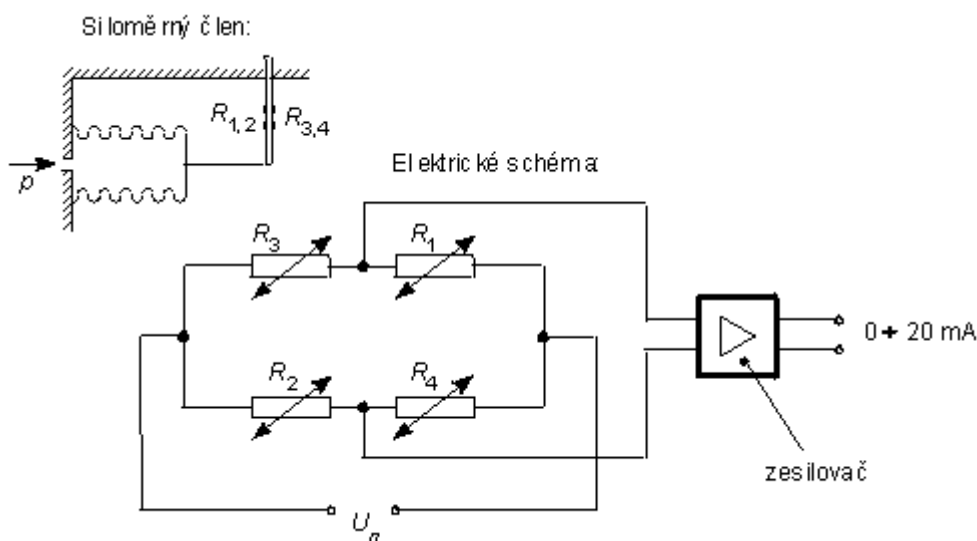
, kde u polovodičů typu P konstanta  $C_1$  nabývá hodnot kladných a odpor tahem roste. U polovodičů typu N je to přesně naopak.

Polovodičové tenzometry jsou v porovnání s kovovými mnohem citlivější. Koeficient deformační citlivosti dosahuje hodnot  $k' = 50$  až  $175$ . Nevýhodou je nelineárnost charakteristiky a značná teplotní závislost. Proto je nutné kompenzovat teplotní závislost vhodným zapojením měřícího můstku případně pomocným obvodem.



Odporové tenzometry mají vynikající přesnost a dobré dynamické vlastnosti. A však působí na ně řada negativních vlivů jako je třeba teplota nebo velikost procházeného proudu. Tyto vlivy mohou značně ovlivnit přesnost měření.

Jak již bylo zmíněno na začátku tenzometrické snímače se často používají ve spojení s deformačními tlakoměry, kde pro využití automatického řízení je nutný elektrický výstupní signál, který také umožňuje dálkový přenos. Tlak je snímán deformačním členem, který je spojen s pružným siloměrným členem opatřeným tenzometry. Na obrázku 10 je uveden příklad takového tlakoměru s vlnovcem a polovodičovými tenzometry. Každá strana nosníku siloměrného členu je potřeba dvěma tenzometry, které jsou zapojeny do měřicího můstku. Tenzometry  $R_1$  a  $R_2$  jsou namáhány na tah,  $R_3$  a  $R_4$  potom na tlak. Zapojení tenzometrů v měřicím můstku je provedeno tak, že tenzometry, které jsou namáhané stejným typem namáhání (tah nebo tlak) jsou umístěny v opačných větvích. To má za následek, že citlivost tohoto zapojení je čtyřnásobná ve srovnání s citlivostí jediného tenzometru. Signál je potom upraven unifikovaným zesilovačem na 0 až 20mA.

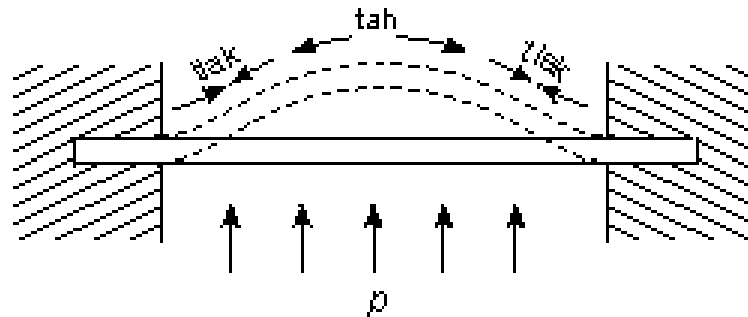


Obrázek 10 – Spojení tenzometru s deformačním členem, schéma propojení tenzometrů [1]

Použitím různých siloměrných členů a deformačních elementů dosáhneme měřicích rozsahů například 0 – 10kPa případně 0 – 40MPa. Na obdobném principu fungují diferenciální snímače tlaku. Zde je měřicím prvkem membrána.

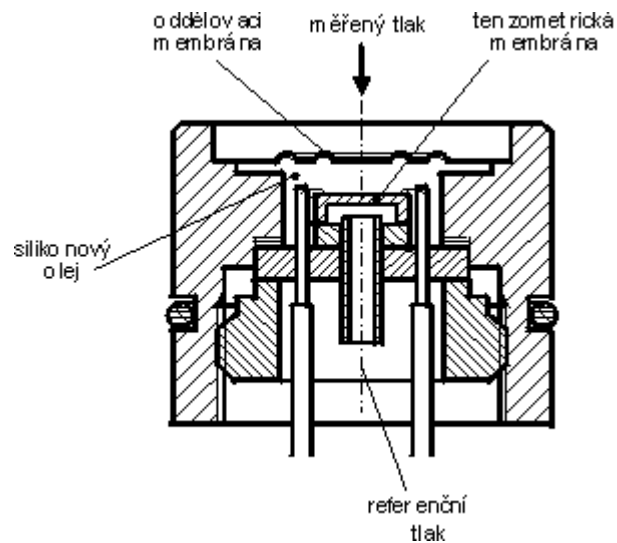
Difundované polovodičové tenzometrické snímače nejsou zhotoveny lepením tenzometrů, ale difuzní technologií. Základem tohoto snímače tlaku je čidlo, které je samo o sobě převodníkem tlaku na elektrický signál. Hlavní součástí je kruhová křemíková membrána na jejímž povrchu jsou vytvořeny polovodičové tenzometry. Tato membrána je

vetknutá do válcového pouzdra. Jedná se současně o silový a pružný člen. Obrázek 11 znázorňuje řez membránou.



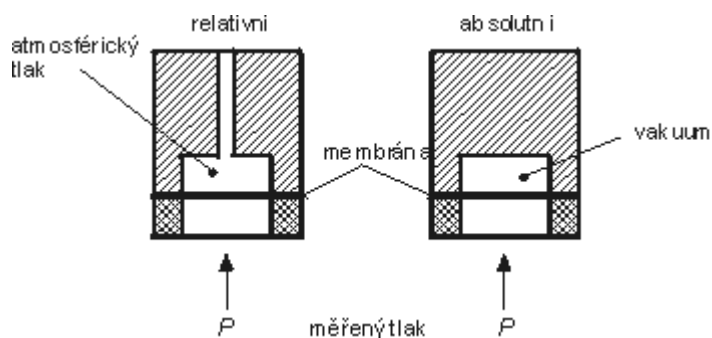
Obrázek 11 – Řez membránou difundovaného polovodičového snímače [1]

Tyto snímače mají rozsah 0 – 0,16 MPa případně 0 – 3 MPa. Pokud by mohlo mít měřené médium nepříznivý vliv na měřicí membránu, je možné použít tlakový senzor s tenzometry tvořenými metodou tenkých vrstev. V takovém případě medium nepůsobí na citlivý element přímo, ale přes kovovou membránu s prostorem vyplněným silikonovým olejem. Takový snímač je vidět na obrázku 12



Obrázek 12 – Tlakový snímač tvořený metodou tenkých vrstev [1]

Těchto snímačů lze použít pro měření jak tlaku absolutního, tak přetlaku, podtlaku či tlakové difference. Příklad uspořádání je na obrázku 13 [1] [2]



Obrázek 13 – Kombinace snímačů pro různá měření tlaku [1]

#### 2.1.4.2 Piezoelektrické snímače tlaku

U určitých druhů krystalů dochází vlivem mechanické deformace ke vzniku elektrického náboje. Tento děj je obousměrný, takže vlivem střídavého elektrického pole se krystal mechanicky rozkmitá. Této vlastnosti se využívá například v ultrazvukové defektoskopii. Tyto vlastnosti vykazuje například: křemen, titaničitan barnatý a olovnatý, případně některé makromolekulární látky. Nejčastěji se setkáme s využitím  $\text{SiO}_2$  a  $\text{BaTiO}_3$ .

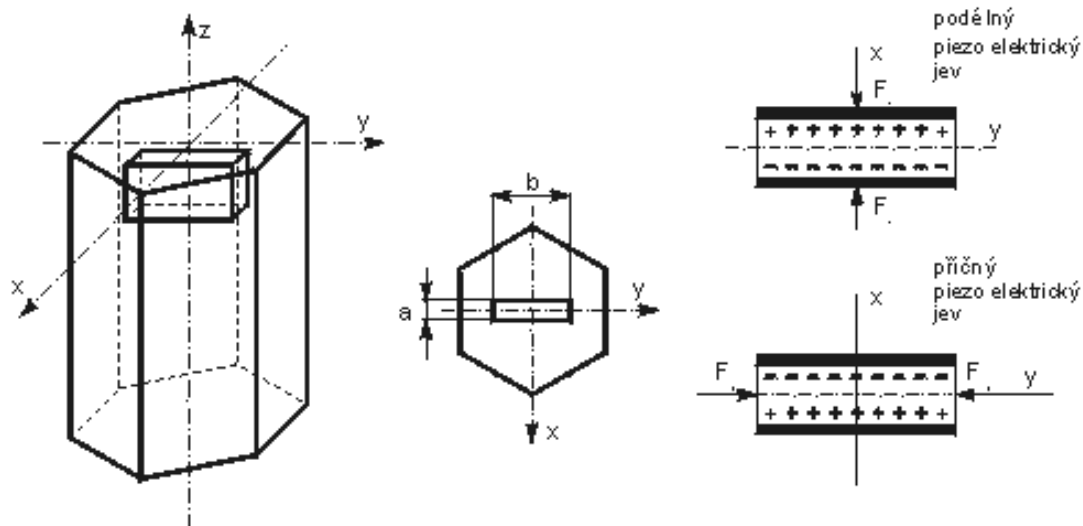
Vyříznutím destičky z krystalu křemene získáme piezoelektrický element. Tato destička má hrany rovnoběžné s jednotlivými osami krystalu. Osy se označují: X – elektrická, Y – mechanická, Z – optická. Vlivem kolmé síly na optickou osu dojde k zelektrizování krystalu a tím se na plochách kolmých na elektrickou osu objeví elektrický náboj. To je schematicky znázorněno na obrázku 14. Působením rovnoměrně rozložené síly  $F_x$  podél elektrické osy X vznikne podélný piezoelektrický jev s nábojem  $Q$  vznikajícím na stěně, která je kolmá k elektrické ose. Tento náboj je popsán rovnicí

$$Q = K_p F_x$$

kde  $K_p$  se rovná piezoelektrické konstantě (modulu). Z předešlé rovnice je vidět, že působí-li síla ve směru osy X, tak velikost náboje nezávisí na rozměrech krystalu. Pokud ovšem bude síla působit ve směru osy Y, bude vznik náboje opět na plochách kolmých k elektrické ose. Nicméně polarizační vektor bude mít záporný směr a nyní bude velikost náboje závislá na rozměrech krystalu. A to podle rovnice

$$Q = -K_p F_y \frac{b}{a}$$

a, b jsou rozměry destičky viz. obrázek 14.



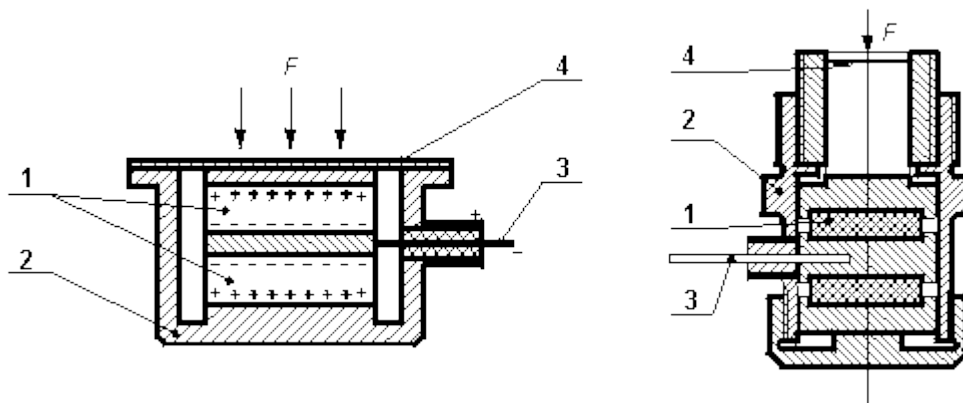
Obrázek 14 – Výřez piezoelektrického členu [1]

Snímač je tvořen krystalovým výbrusem. Ten je opatřen elektrodami. Působením neelektrické veličiny (síly) se krystal chová jako generátor náboje. Představuje tedy zdroj napětí s velkým vnitřním odporem (vlivem izolačního odporu dielektrika). Převod vzniklého náboje na napětí probíhá podle rovnice

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{K_p F_x}{C}$$

$U$  představuje výstupní napětí,  $C$  pak kapacitu čidla včetně přívodů. I přes poměrně vysoké výstupní napětí je nutné připojit zesilovač s velkým vstupním odporem. Hlavním úkolem zesilovače je více impedanční přizpůsobení než zesílení signálu.

Schéma piezoelektrického snímače tlaku je znázorněno na obrázku 15. Snímač obsahuje dva piezoelektrické krystaly 1, které jsou zapojeny proti sobě a jejich náboje se sčítají. Kryt snímače 2 je vodivě spojen s vnějšími elektrodami obou krystalů a současně vytváří elektrické i magnetické stínění. Centrální elektroda 3 je vyvedena izolační průchodkou. Přenos tlakové síly na krystal je zprostředkován membránou 4. [1] [2]



Obrázek 15 – Piezoelektrický snímač [1]

### 2.1.4.3 Kapacitní snímače tlaku

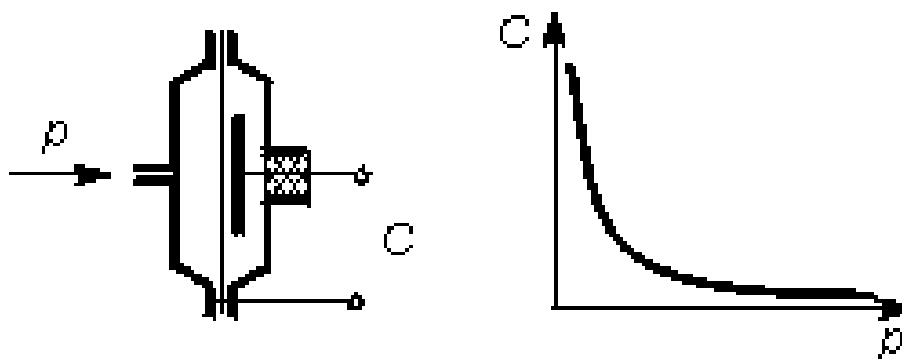
Základem v podstatě je kondenzátor. Ten v důsledku působení neelektrické veličiny mění své parametry. Například vlivem neelektrické veličiny dojde k oddálení desek kondenzátoru (používá se nejčastěji) nebo ke změně ploch. Pro kapacitu  $C$  kondenzátoru platí

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

, kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $\varepsilon_r$  je poměrná permitivita,  $S$  je plocha desek a  $d$  je vzdálenost desek. Jelikož uvažujeme změnu vzdálenosti  $d$  desek (elektrod) vlivem neelektrické síly, můžeme ostatní veličiny zahrnout do konstanty  $k_1$ . Upravená rovnice má pak tvar

$$C = \frac{k_1}{d}$$

Na obrázku 16 je vyobrazen kapacitní snímač a jeho charakteristika. Z obrázku je patrné, že se jedná o nelineární charakteristiku a že změna kapacity a citlivost bude největší při malých změnách  $d$ .



Obrázek 16 – Kapacitní snímač a jeho charakteristika [1]

## 2.2 Provedení rychlostních sond

Rychlost proudění v určitém bodě lze měřit více způsoby. Je možné změřit vzdálenost  $ds$ , kterou částice tekutiny urazí za známý časový úsek  $dt$ . Tato metoda se nazývá Particle Image Velocimetry (PIV). Případně lze měřit čas, za kterou částice urazí známou vzdálenost. Pak se jedná o měření rychlosti pomocí dvou laserů (L2F). Problém je však v tom, že vzduch je transparentní. Tudíž pro použití těchto metod je nutné do proudu vzduchu rozptýlit částice prachu nebo kapaliny u které předpokládáme, že mají stejnou rychlost jako proudění.

Dalším přístupem je měření rychlosti pomocí ostatních parametrů proudění. Například pomocí tlaku, Dopplerova jevu, ochlazováním žhaveného drátu atp. Z těchto parametrů může být poté rychlost dopočítána.

Právě zjišťováním rychlosti pomocí tlaku se bude tato práce zabývat. V předchozí části jsme si přiblížili samotné senzory pro měření tlaku. V následující části se blíže podíváme na sondy pro odběr tlaku. [4]

Pro výpočet rychlosti pomocí tlaku je nasnadě upravit rovnici pro celkový tlak  $p_t$ .

$$p_t = p + p_d$$

Pokud za dynamický tlak  $p_d$  dosadíme

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Vytkneme rychlost  $v$  dostaneme rovnici pro výpočet rychlosti pomocí tlaku

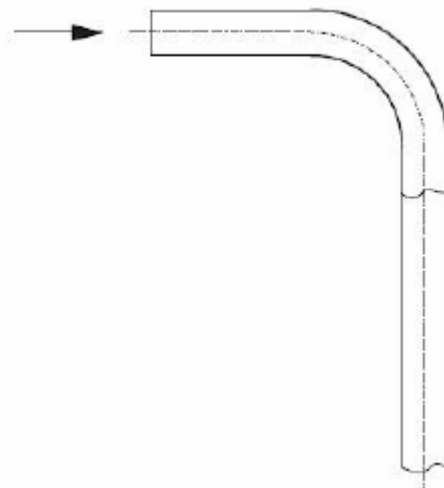
$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p)}{\rho}}$$

[1] [2]

### 2.2.1 Sondy pro měření celkového tlaku

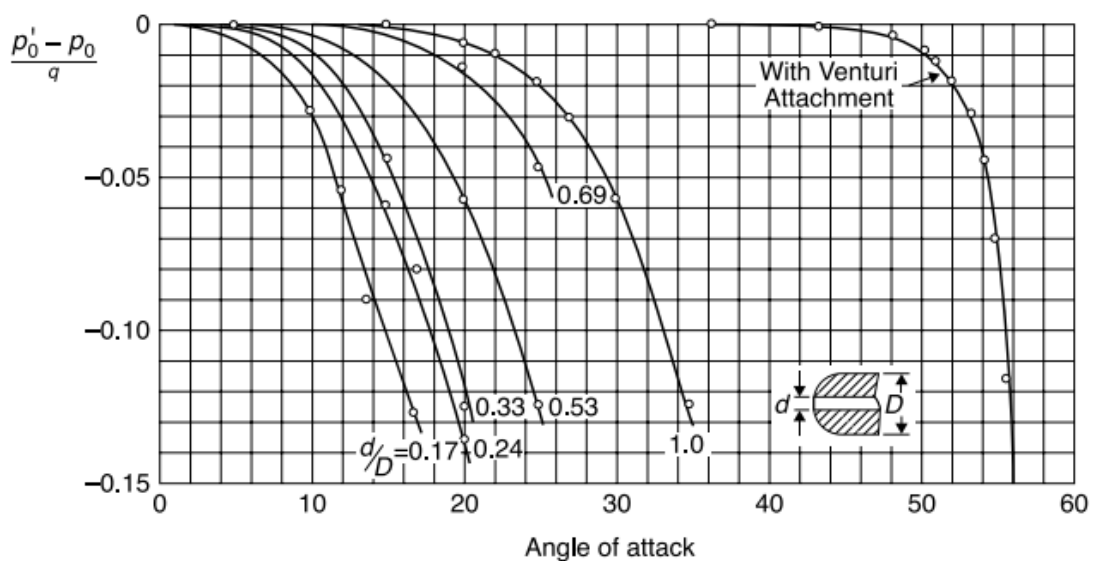
#### 2.2.1.1 Pitotova trubice

Nejjednodušší forma sondy pro odběr celkového tlaku proudění. Jedná se o zahnutou trubici ve tvaru háku. Její ústí směřuje proti směru nabíhajícího proudění. Výstup je pak připojen k měřicímu členu.



Obrázek 17 – Pitotova trubice [5]

Pokud není ústí trubice kolmé na nabíhající proudění, pak naměřený tlak je menší než celkový. Tento jev je do úhlu náběhu  $\pm 10^\circ$  takřka zanedbatelný. Velikost vlivu úhlu náběhu je zároveň závislá na poměru vstupního průměru  $d$  sondy a vnějšího průměru  $D$  sondy. Závislost úhlu náběhu a poměru geometrie na výsledné tlakové diferenci je vyobrazena na obrázku 18. [4]

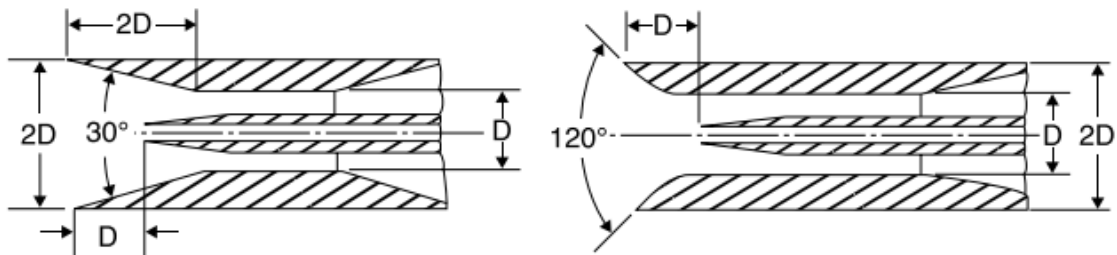


Obrázek 18 – Závislost tlakové difference na úhlu náběhu [4]

### 2.2.1.2 Kielova sonda

Pro snížení citlivosti na úhel náběhu, tak jak je tomu u Pitotovy trubice, je možné použít Kielovu sondu, což je spojení Pitotovy trubice s Venturiho trubicí. Toto spojení vykazuje přesné měření do úhlu náběhu  $\pm 40^\circ$  u modifikované verze až do úhlu náběhu  $\pm 60^\circ$ .

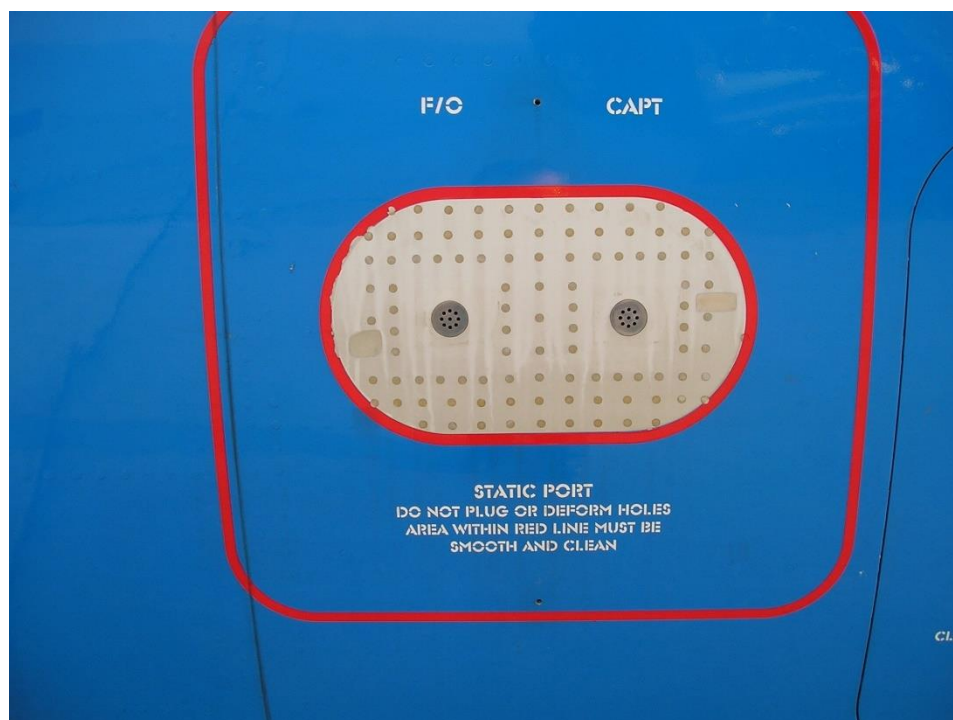
Modifikace spočívá ve změně geometrie hrdla Venturiho trubice. To je znázorněno na obrázku 19. Takových výsledků je dosaženo u této sondy díky tomu, že k odtržení nabíhajícího proudu vzduchu dochází až u vysokých úhlů náběhu. [4]



Obrázek 19 – Kielova sonda standartní (vlevo), modifikovaná (vpravo) [4]

### 2.2.2 Sondy pro měření statického tlaku

Měření statického tlaku můžeme jednoduše provést portem ve stěně potrubí. Podobný princip se používá i u některých letadel, kde na trupu letadla můžeme nalézt port pro odběr statického tlaku.

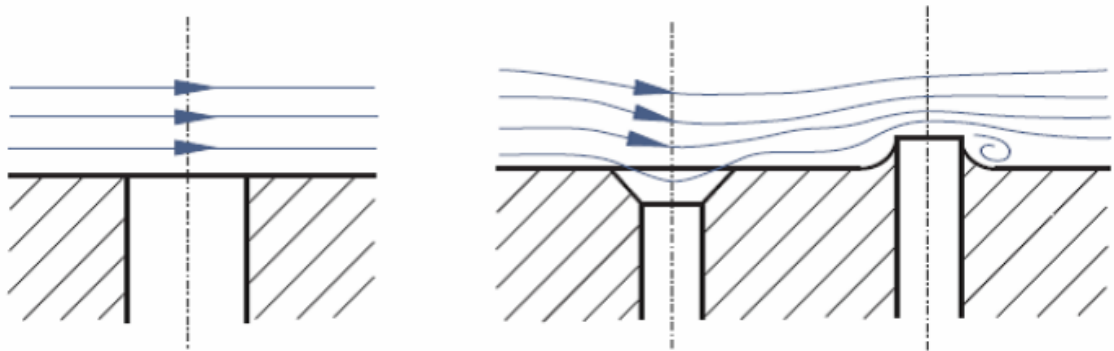


Obrázek 20 – Port pro odběr statického tlaku na trupu letadla [6]

Uvažujeme-li laminární proudění, je tlak v kolmém směru na proudnice konstantní. Z toho vyplývá, že tlak na stěně kolmé na proudění bude konstantní. Z tohoto vyplývá, že je žádoucí, aby osa odběrového portu byla kolmá na stěnu. Zároveň je nutné, aby se zachovala hladkost stěny. To znamená, aby díra byla bez otřepů a co nejvíce ostrohranná. Tyto



nedokonalosti mohou způsobovat odtržení či hromadění proudu. A následně vedou k systematickým chybám. [5]

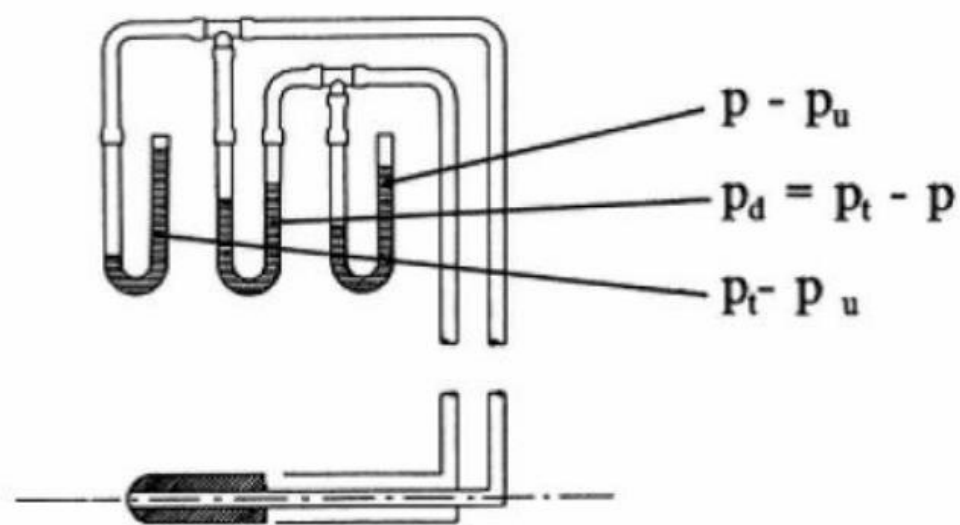


Obrázek 21 – příklad provedení statického portu. Vlevo správně. Vpravo špatně. [5]

### 2.2.3 Sondy pro měření dynamického tlaku

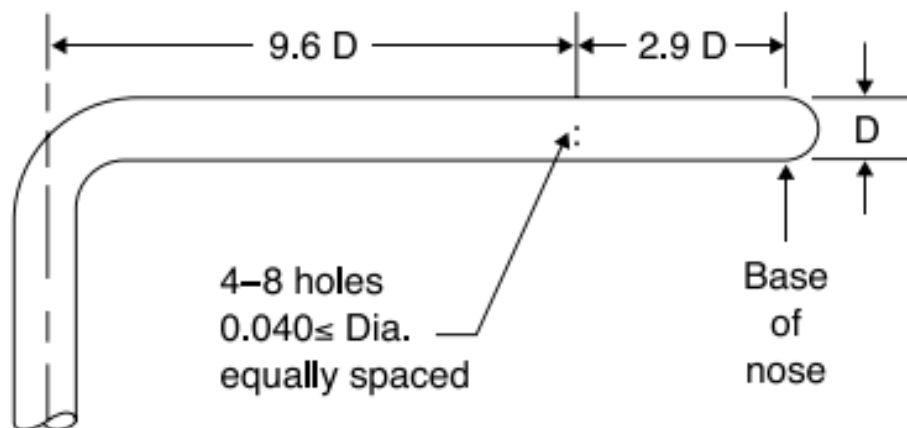
Odečtením statického tlaku  $p$  od celkového tlaku  $p_t$  získáme tlak dynamický  $p_d$ . Je tedy patrné, že vhodným spojením sond na odběr statického a celkového tlaku dostaneme sondu pro měření dynamického tlaku. Z dynamického tlaku již jednoduše dostaneme rychlost proudění.

Toto spojení lze provést několika způsoby. Jeden je použití dvou sond nebo portu pro odběr statického tlaku a Pitotovy trubice. Diferenční spojení výstupu Pitotovy trubice s výstupem portu ve stěně trubky pro odběr statického tlaku. Nebo je možné obě sondy sloučit do jedné. Vznikne tak Pitot-statická trubice, respektive Prandtlova sonda.



Obrázek 22 – Prandtlova sonda s připojením hydrostatického manometru (tvar U) [5]

Prandtlova sonda má parametricky danou geometrii, kterou je nutné dodržet pro správnou funkci. Porty pro odběr statického tlaku jsou umístěny po obvodu tělesa sondy ve vzdálenosti  $2,9D$  od čela. Jedná se o místo, kde jsou rozruchy vyvolané čelem sondy již vyrovnány. Geometrie sondy je vyobrazena na obrázku 23 Stejně jako u Pitotovy trubice je citlivost na úhel náběhu značně ovlivněna přední částí sondy. Výhodné řešení představuje provedení čela do tvaru polokoule. Jak statický, tak i celkový tlak se s rostoucím úhlem náběhu snižuje. Nicméně do úhlu náběhu  $\pm 17^\circ$  je velikost systematické chyby menší než 1%. [5] [4]



Obrázek 23 – konstrukční rozměry Prandtlovy sondy [4]

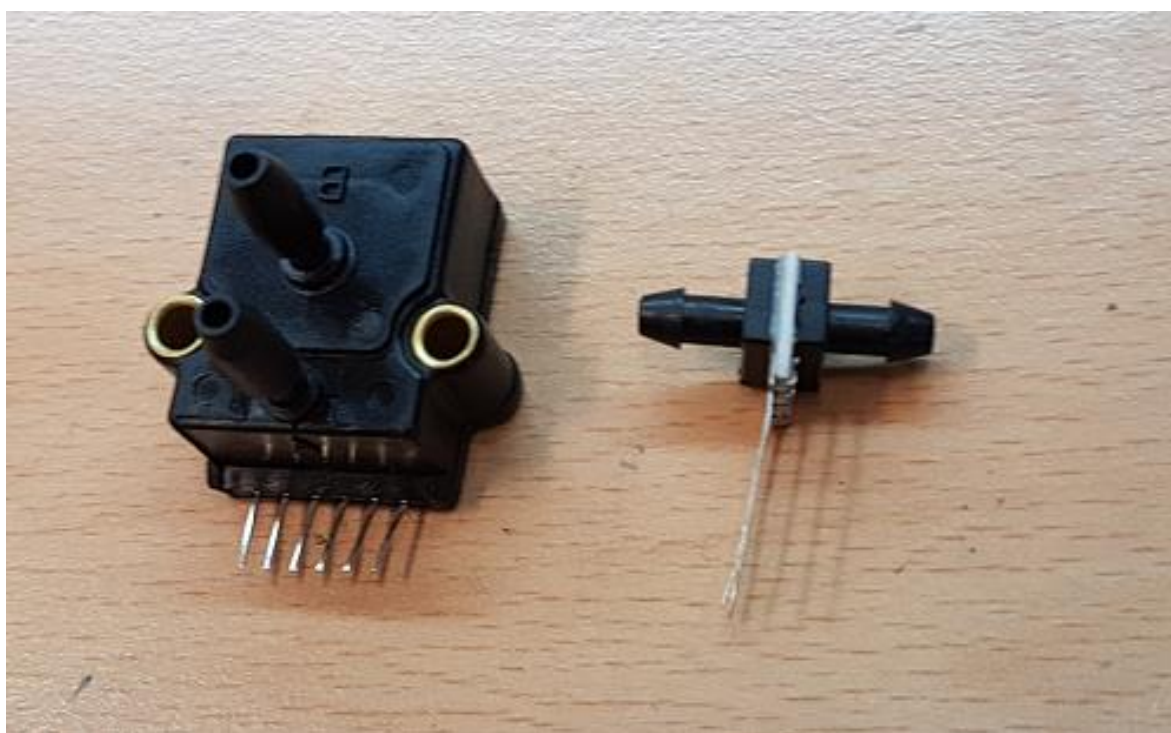
## 3 Návrh tlakového převodníku a sondy

### 3.1 Návrh tlakového převodníku

Tato část práce pojednává o návrhu a realizaci tlakového převodníku, a to převodem tlakové síly na elektrický signál.

#### 3.1.1 Použité senzory

Škola poskytla dohromady 13 senzorů, které budou použity v převodníku, jenž je výsledkem této práce.



Obrázek 24 – Fotografie použitých senzorů

Jedná se o dva typy piezoelektrických snímačů tlaku. Oba dva umožňují měřit tlakovou diferenci. Jedná se o senzory firmy Honeywell. Konkrétně o 12 kusů s označením HSCSAAN001PDAA5 a o jeden kus s označením SCX15ANC. Druhý senzor umožňuje mimo měření tlaku měřit i lokální teplotu. Obě tyto měřené veličiny je pak možné dostat jako pozitivní nebo negovaný výstupní signál. Podrobnosti o senzorech naleznete na obrázcích níže, které jsou výňatky z datasheetu.

**Table 1. Absolute Maximum Ratings<sup>1</sup>**

Parameter	Min.	Max.	Unit
Supply voltage ( $V_{\text{supply}}$ )	-0.3	6.0	V
Voltage on any pin	-0.3	$V_{\text{supply}} + 0.3$	V
ESD susceptibility (human body model)	3	-	kV
Storage temperature	-40 [-40]	85 [185]	° C [° F]
Lead temperature (2 s to 4 s)	-	250 [482]	° C [° F]

**Table 2. Operating Specifications**

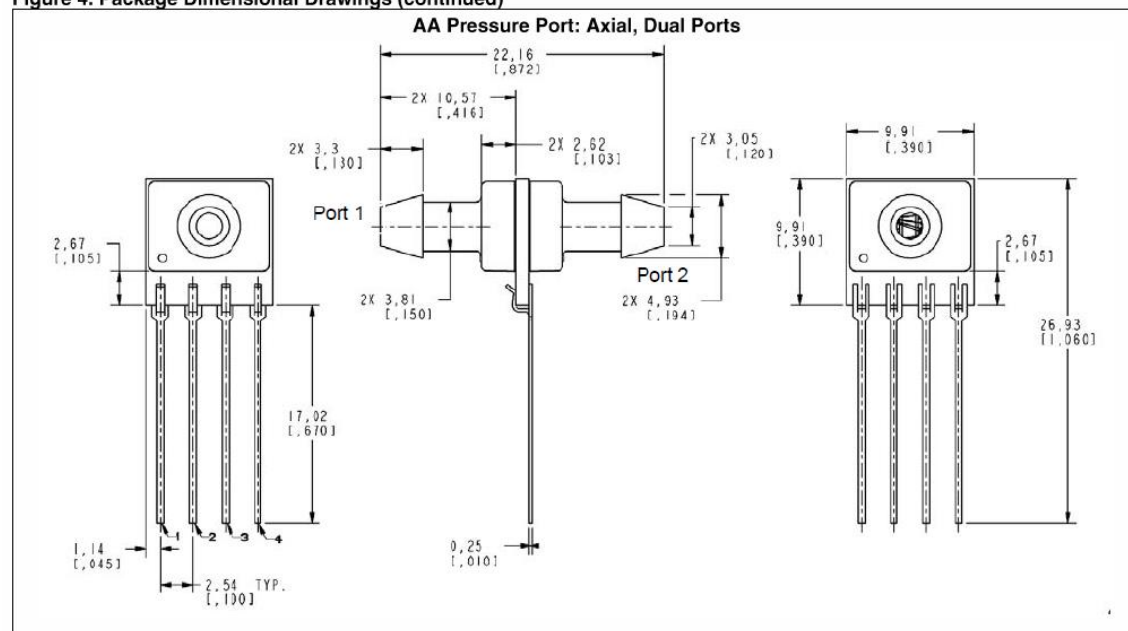
Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply voltage ( $V_{\text{supply}}$ ) <sup>2</sup>				
3.3 V	3.0	3.3 <sup>3</sup>	3.3	Vdc
5.0 V	4.75	5.0 <sup>3</sup>	5.25	
<i>Sensors are either 3.3 or 5.0 V based on model selected</i>				
Supply current				
3.3 V supply	-	1.6	2.1	mA
5.0 V supply	-	2	3	
Compensated temperature range <sup>4</sup>	0 [32]	-	50 [122]	° C [° F]
Operating temperature range <sup>5</sup>	-20 [-4]	-	85 [185]	° C [° F]
Startup time (power up to data ready)	-	-	5	ms
Response time	-	1	-	ms
Upper output clipping limit	-	-	97.5	% $V_{\text{supply}}$
Lower output clipping limit	2.5	-	-	% $V_{\text{supply}}$
Accuracy <sup>6</sup>	-	-	±0.25	%FSS BFSL
Total error band <sup>7</sup>	-	-	±1	%FSS <sup>8</sup>
Output resolution	12	-	-	bits

**Table 3. Environmental Specifications**

Parameter	Characteristic
Humidity	0 % to 95 % RH, non-condensing
Vibration	MIL-STD-202F, Curve AK (20.7 g random)
Shock	MIL-STD-202F, Method 213B, Condition F
Life <sup>9</sup>	1 million cycles minimum

Obrázek 25 – Výňatek z datasheetu HSC – specifikace [7]

**Figure 4. Package Dimensional Drawings (continued)**



Obrázek 26 – Výňatek z datasheetu HSC – rozměry [7]

**SCX PERFORMANCE CHARACTERISTICS <sup>(3)</sup>**

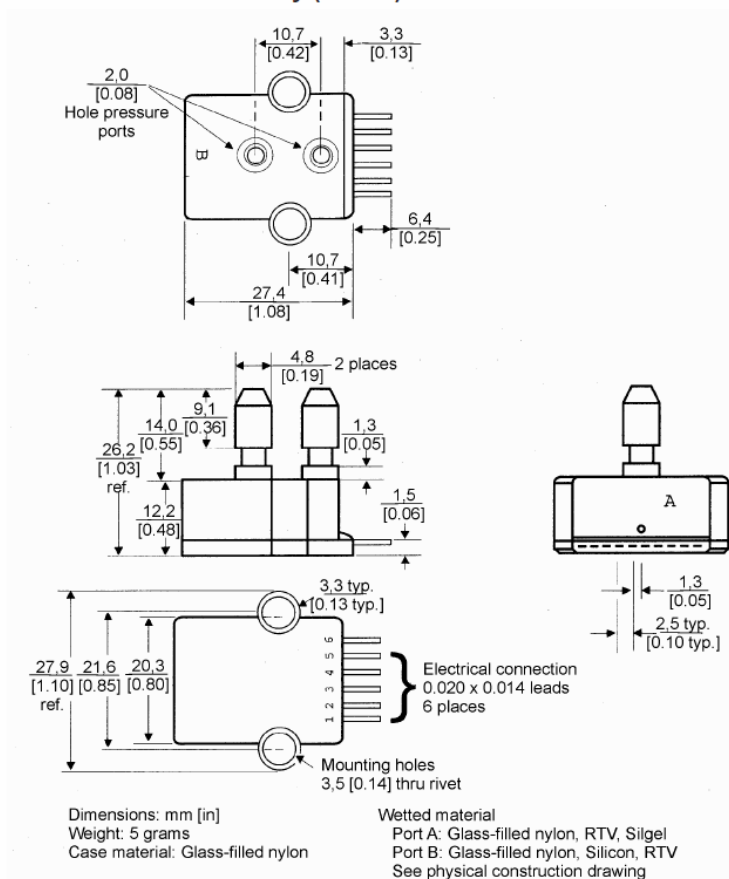
Characteristic	Min.	Typ.	Max.	Unit
Zero Pressure Offset <sup>(4)</sup>	-300	0.0	300	Microvolt
Combined Pressure Non-Linearity and Pressure Hysteresis <sup>(5)</sup>	–	±0.1	±0.5	% FSO
Temperature Effect on Span 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] <sup>(6)</sup>	–	±0.2	±0.1	% FSO
Temperature Effect on Offset 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] <sup>(6)</sup>	–	±100	±500	Microvolt
Repeatability <sup>(7)</sup>	–	±0.2	±0.5	% FSO
Input Resistance <sup>(8)</sup>	–	4.0	–	kOhm
Output Resistance <sup>(9)</sup>	–	4.0	–	kOhm
Common Mode Voltage <sup>(10)</sup>	5.8	6.0	6.2	Vdc
Response Time <sup>(11)</sup>	–	100	–	Microsec.
Long Term Stability of Offset and Span <sup>(12)</sup>	–	±0.1	–	mV

**SCX C SERIES PERFORMANCE CHARACTERISTICS <sup>(3)</sup>**

Characteristic	Min.	Typ.	Max.	Unit
Zero Pressure Offset	-1.0	0.0	±1.0	mV
Combined Pressure Non-Linearity and Pressure Hysteresis <sup>(5)</sup>	–	–	±1.0	% FSO
Models: SCX05DNC, SCX15ANC, and SCX15DNC,	–	±0.1	±1.0	% FSO
Models: SCX01DNC, SCX30ANC, SCX30DNC, SCX100ANC, SCX100DNC, SCX150ANC, and SCX150DNC	–	±0.2	±1.0	% FSO
Temperature Effect on Span 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] <sup>(6)</sup>	–	±0.4	±2.0	% FSO
Temperature Effect on Offset 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] <sup>(6)</sup>	–	±0.2	±1.0	mV
Repeatability <sup>(7)</sup>	–	±0.2	±0.5	% FSO
Input Resistance <sup>(8)</sup>	–	4.0	–	kOhm
Output Resistance <sup>(9)</sup>	–	4.0	–	kOhm
Common Mode Voltage <sup>(10)</sup>	5.7	6.0	6.3	Vdc
Response Time <sup>(11)</sup>	–	100	–	Microsec.
Long Term Stability of Offset and Span <sup>(12)</sup>	–	±0.1	–	mV

Obrázek 27 – Výňatek z datasheetu SCX – specifikace [8]

## PHYSICAL DIMENSIONS for Reference Only (mm/in)



Obrázek 28 – Výňatek z datasheetu SCX – rozměry [8]

### 3.1.2 Návrh elektrického zapojení a realizace PCB

Se znalostí použití senzorů bylo možné začít s návrhem jejich zapojení. Pro realizaci schématu a následného vytvoření PCB byl, na doporučení vedoucího práce, použit program Ki-cad.

Protože jsou použity dva druhy senzorů, bylo nutné vytvořit dvě varianty zapojení, a tudíž i dvě varianty samotné PCB. První varianta obsahuje 7 senzorů HSC. Druhá obsahuje 5 senzorů HSC a jeden senzor SCX.

Napájení bylo zajištěno pomocí síťového adaptéru, který do obvodu dodává 9V a je schopen proudu 1A. Pro přesná měření bylo nutné zapojení doplnit o stabilizátor napětí, který se stará jak o stabilizaci vstupního napětí, tak i o jeho regulaci na 5V Pro tuto aplikaci byl vybrán následující: ADP3333ARMZ-5-R7. Některé parametry tohoto stabilizátoru je možné nalézt na obrázku níže.

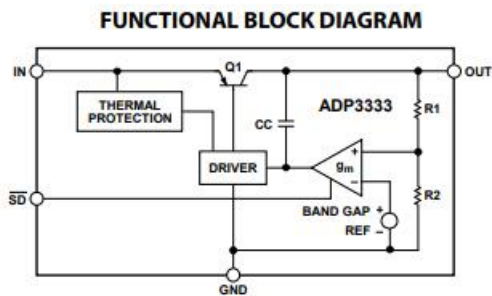


Figure 1.

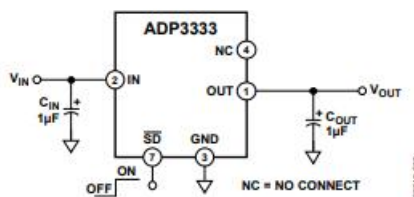
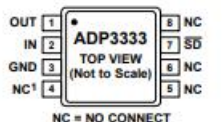


Figure 2. Typical Application Circuit

## PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



\*CAN BE CONNECTED TO ANY OTHER PIN.

Figure 3. Pin Configuration

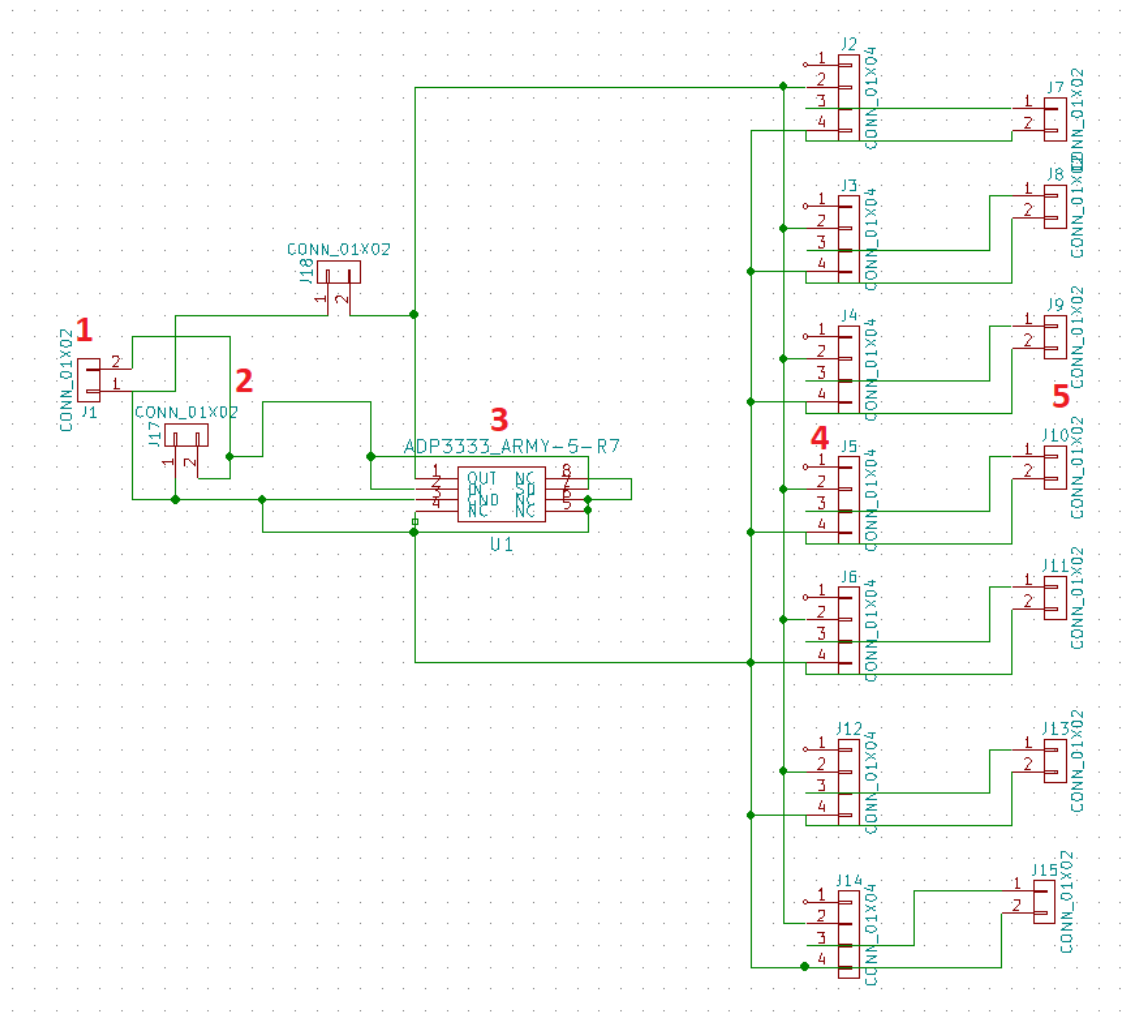
Table 4. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	OUT	Output of the Regulator. Bypass to ground with a 1.0 $\mu$ F or larger capacitor.
2	IN	Input Pin. Bypass to ground with a 1.0 $\mu$ F or larger capacitor.
3	GND	Ground Pin.
4 to 6, 8	NC	No Connect. Best thermal performance is achieved when the NC pins are connected to the GND plane.
7	$\overline{\text{SD}}$	Active Low Shutdown Pin. Connect to ground to disable the regulator output. When shutdown is not used, connect this pin to the IN pin.

Obrázek 29 – Výňatek z datasheetu ADP3333 [9]

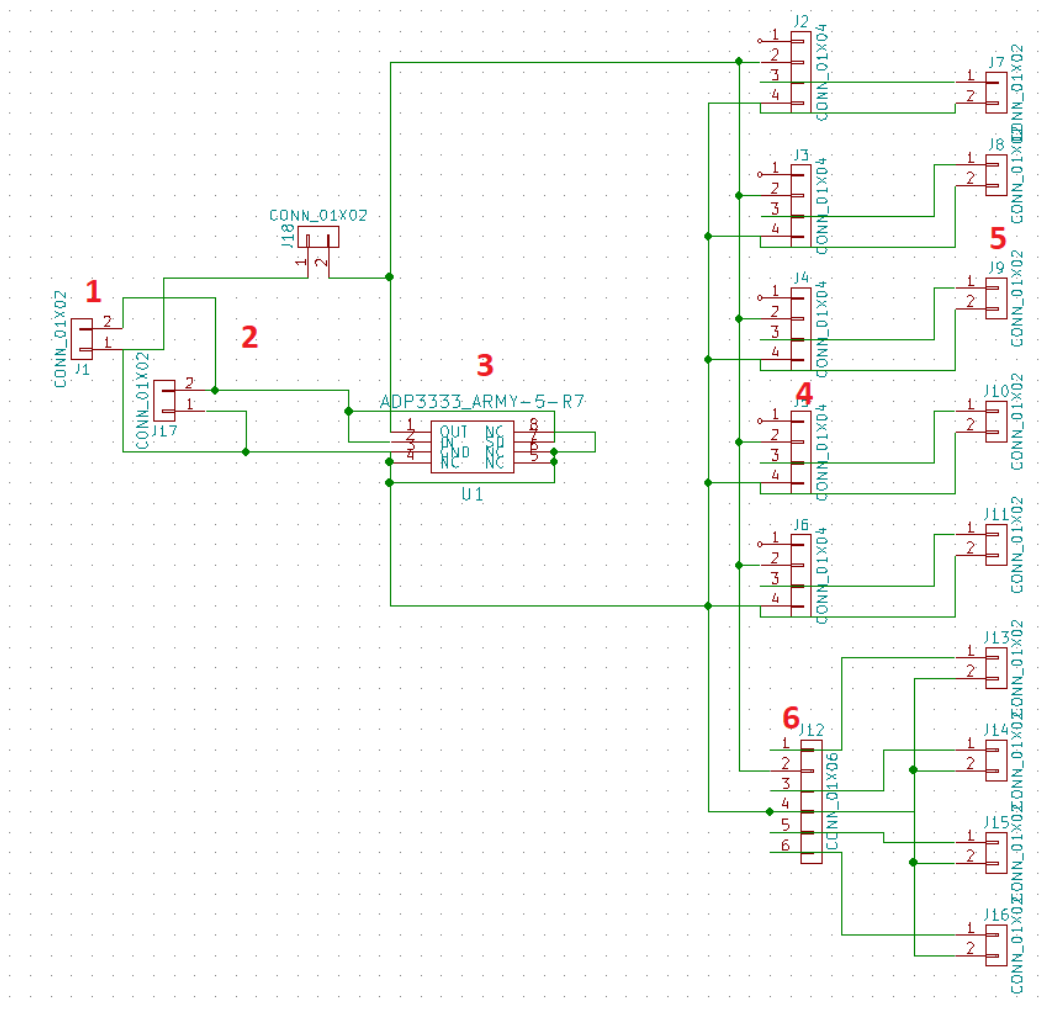
Pro zajištění správné funkce stabilizátoru bylo nutné doplnit zapojení ještě o dva kondenzátory s kapacitou vyšší než: 1 $\mu$ F. Byl použit kondenzátor s kapacitou o velikosti 1,2 $\mu$ F.

Když byly vybrány veškeré součástky, mohlo se začít s návrhem zapojení. Na obrázcích níže vidíte schémata pro jednotlivé obvodové desky. Na schématech jsou vyznačena a okomentovaná místa pro připojení jednotlivých součástek obvodu.



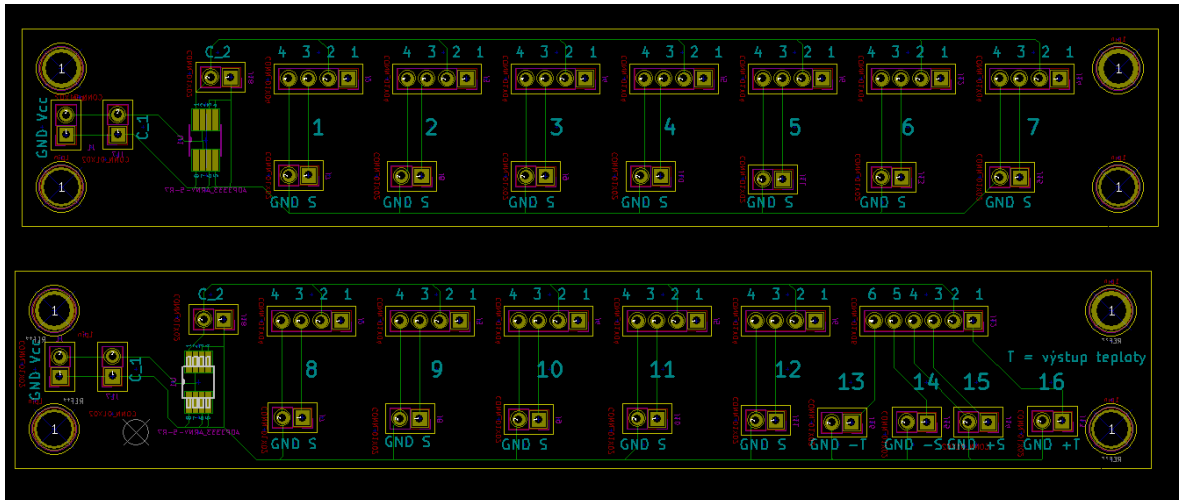
Obrázek 30 – Schéma obvodové desky pouze pro HSC (1. připojení zdroje; 2. kondenzátory, 3. regulátor, 4. prostor pro senzory, 5. připojení výstupního signálu)



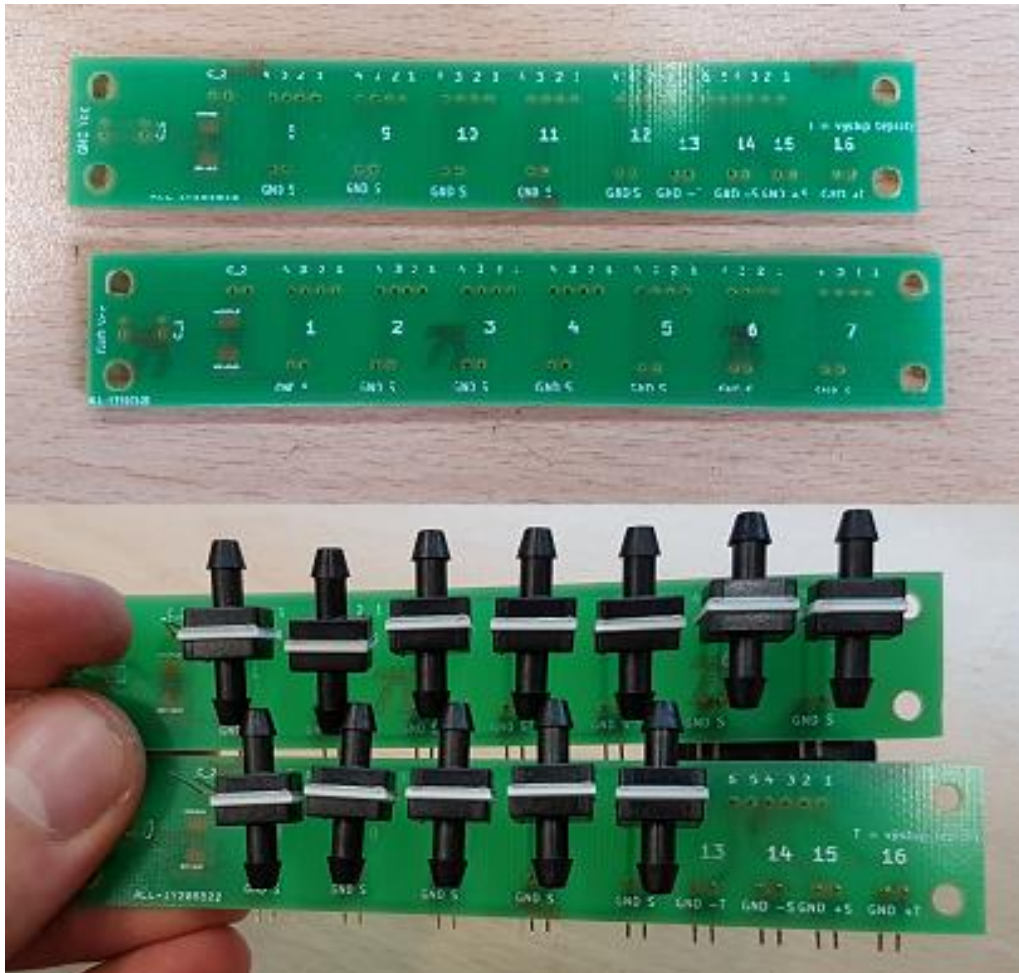


Obrázek 31 – Schéma obvodové desky pro oba druhy senzorů (1. připojení zdroje; 2. kondenzátory, 3. regulátor, 4. prostor pro senzory, 5. připojení výstupního signálu, 6. připojení senzoru SCX)

Po vytvoření schémat zapojení a přiřazení jednotlivých footprintů k součástkám bylo možné vytvořit samotnou PCB, která se následně nechala vyrobit. Návrh spočíval ve vhodném rozmístění jednotlivých komponent a jejich vzájemném propojení, volbě rozměru desky a určení montážních prvků. Dále byla deska doplněna o popisky jednotlivých komponentů a jejich portů. Na obrázku níže můžete vidět vizualizaci kompletních neosazených desek.



Obrázek 32 – Vizualizace desek pro výrobu



Obrázek 33 – Neosazené a osazené desky

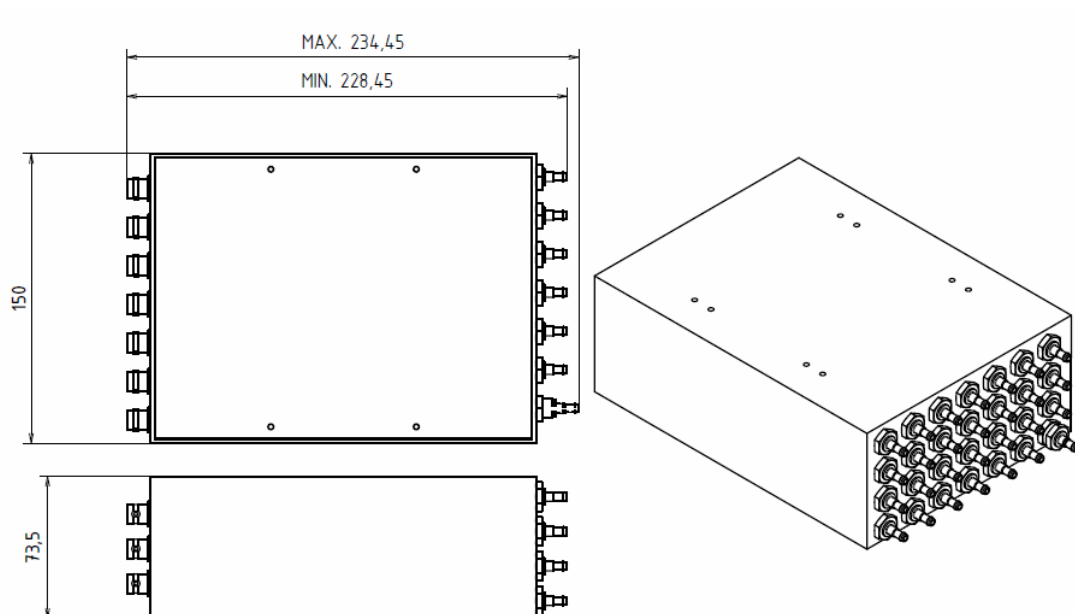
### 3.1.3 Montážní krabička a kompletace

Pro usazení PCB byla navržena a vyrobena vlastní montážní krabička. Ta byla navržena s ohledem na umístění průchodek a konektorů jakožto i samotných desek se senzory. Pro usnadnění výroby byl zvolen 3D tisk pomocí metody FDM

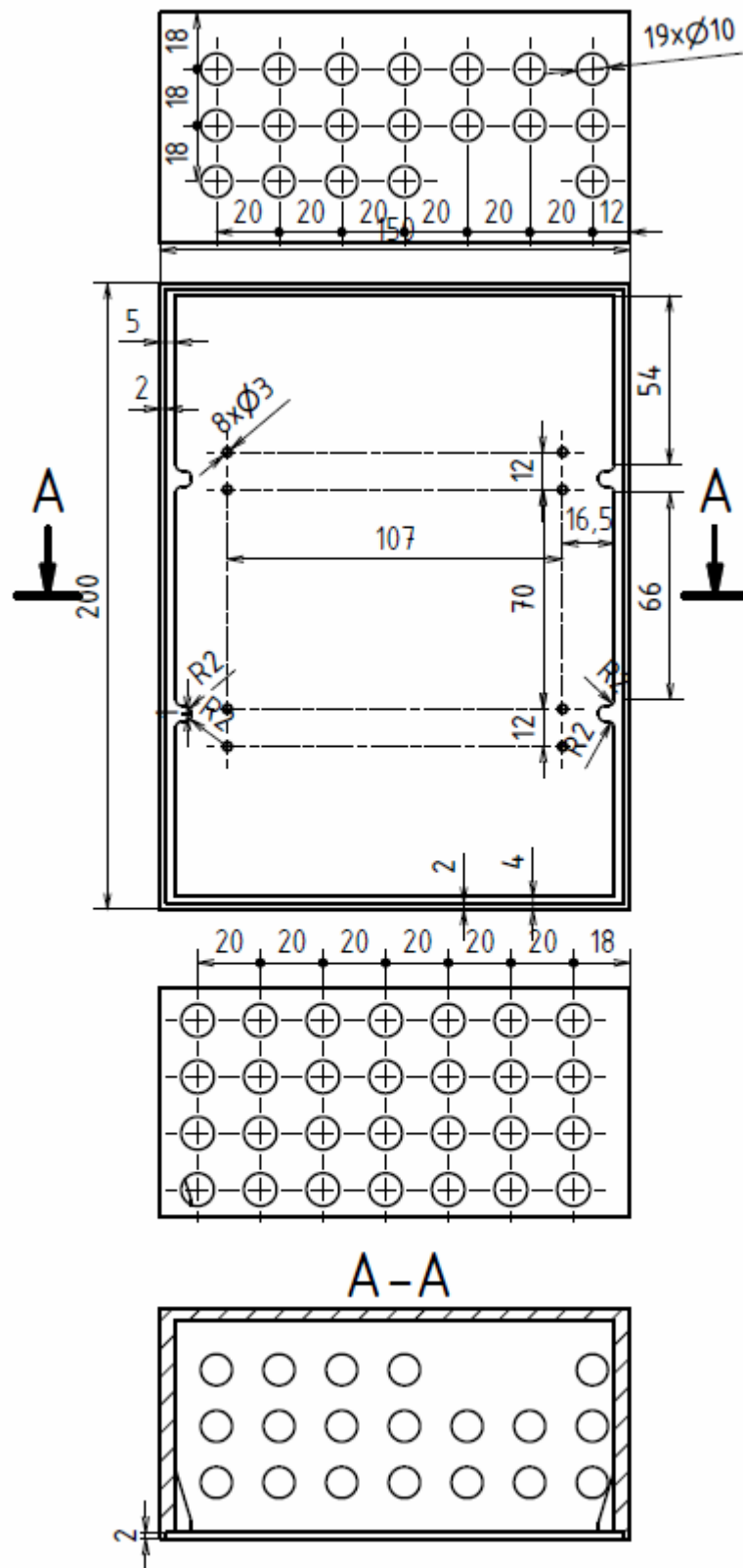
Propojení převodníku s měřicí kartou bylo zajištěno připojením BNC konektorů, které jsou shodné s typem koncovek použitých na měřicí kartě. Tyto konektory nejsou připojeny přímo k obvodové desce, ale jsou usazeny ve stěně montážní krabičky a s deskou spojeni pomocí vodiče.

Za účelem propojení tlakových hadic se senzory byly vybrány panelové průchodky značky Festo s označením SNC-PK-4.

Níže můžete vidět model montážní krabičky, vytištěnou verzi a kompletně osazený převodník.



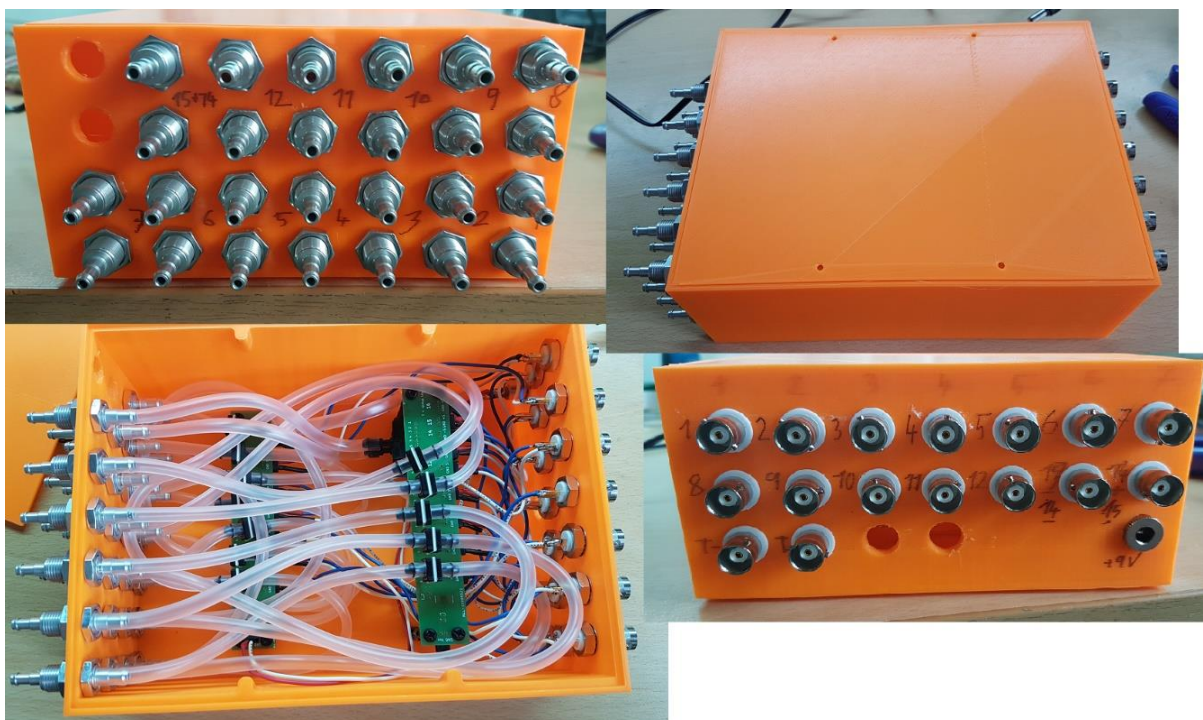
Obrázek 34 – Nákres osazené krabičky s vnějšími rozměry pro případné usazení do sestavy



Obrázek 35 – Rozměrový náčrtek krabičky



Obrázek 36 – Vytištěná neosazená krabička (průchodka a BNC konektor pro ilustraci umístění)



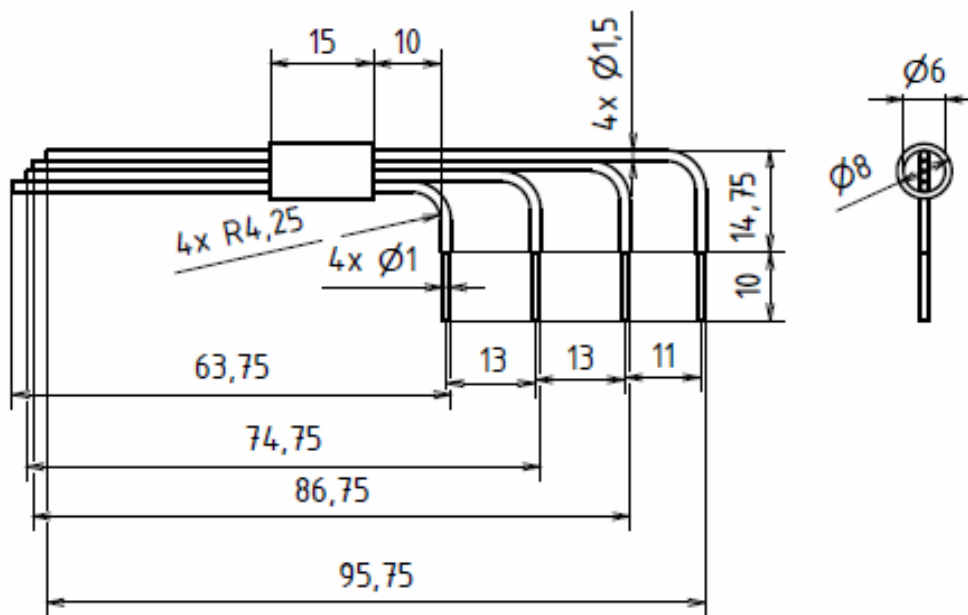
Obrázek 37 – Osazená krabička

### 3.2 Návrh a realizace rychlostní sondy

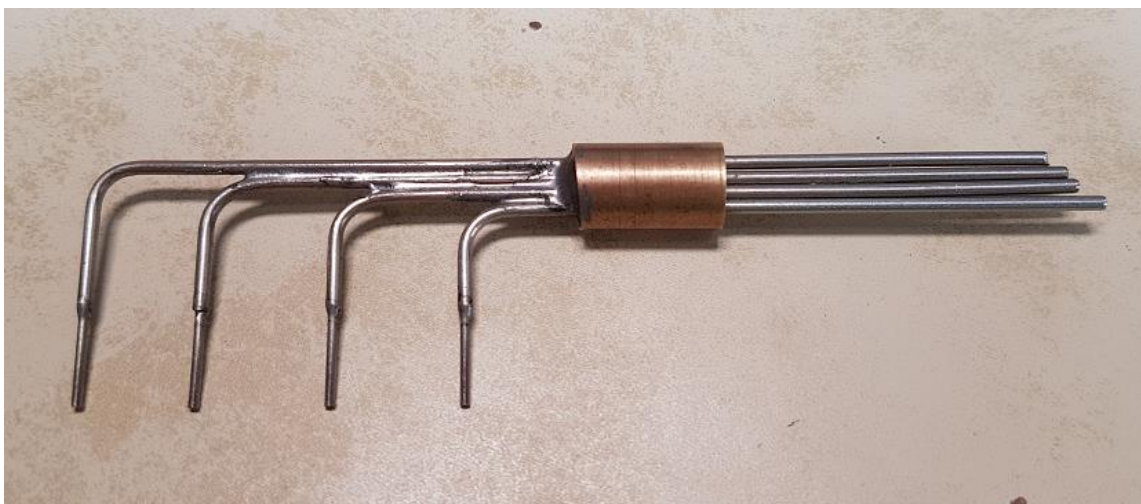
V této části se blíže podíváme na návrh a realizaci jednoduché rychlostní sondy, respektive návrhu pole více sond.

Použitým typem sondy je Pittotova trubice, která odečítá celkový tlak proudění. Zvolena byla proto, že se jedná o nejjednodušší sondu na výrobu a je dostačující pro účely tohoto měření.

Celé pole se skládá z 4 trubic, které jsou vzájemně v pevně dané a známé poloze. Na obrázku níže naleznete schéma s vyznačenými rozměry. Vnitřní průměr vstupní trubičky je 0,8mm. Rozdílná rozteč nejvzdálenější trubičky je snaha o zhuštění pole na okraji měřeného proudění. Jednotlivé části jsou k sobě pájeny. Napájen je taky měděný váleček, který slouží ke zpevnění a uchycení sond do měřící soustavy.



Obrázek 38 – Návrh sondy



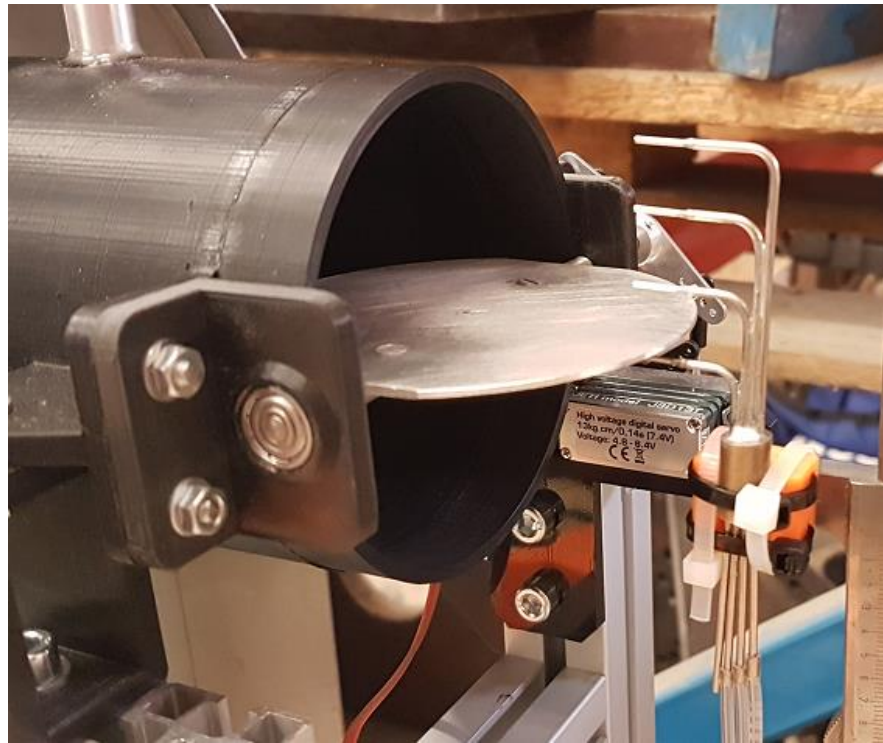
Obrázek 39 – Vyrobená sonda

### 3.3 Ověření funkčnosti převodníku a sondy

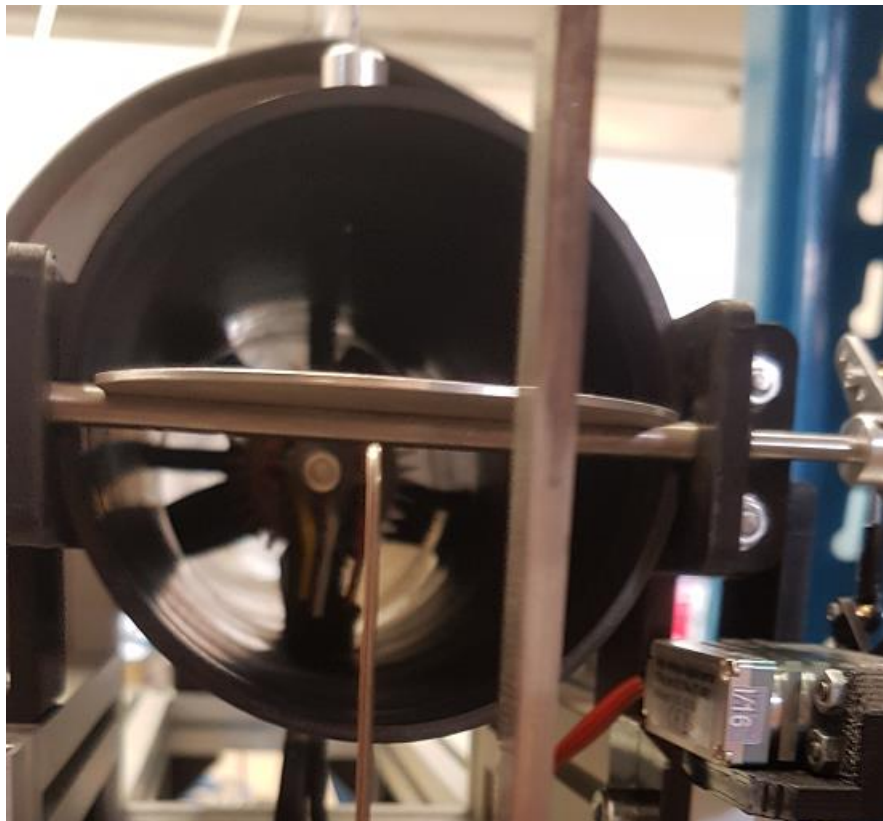
Pro ověření funkčnosti převodníku a sondy bylo zvoleno měření rychlostního profilu za výstupem dmychadla, které bylo vyrobeno pro účely jiné bakalářské práce. [10] Účelem tohoto měření bylo, mimo ověření funkčnosti, zjistit vliv kabelového svazku na rychlost proudění.

Parametry měření:

Teplota ovzduší	27,4 °C
Atmosférický tlak	98780 Pa
Vlhkost vzduchu	37%



Obrázek 40 – Sonda připravená pro měření v horní polovině průměru

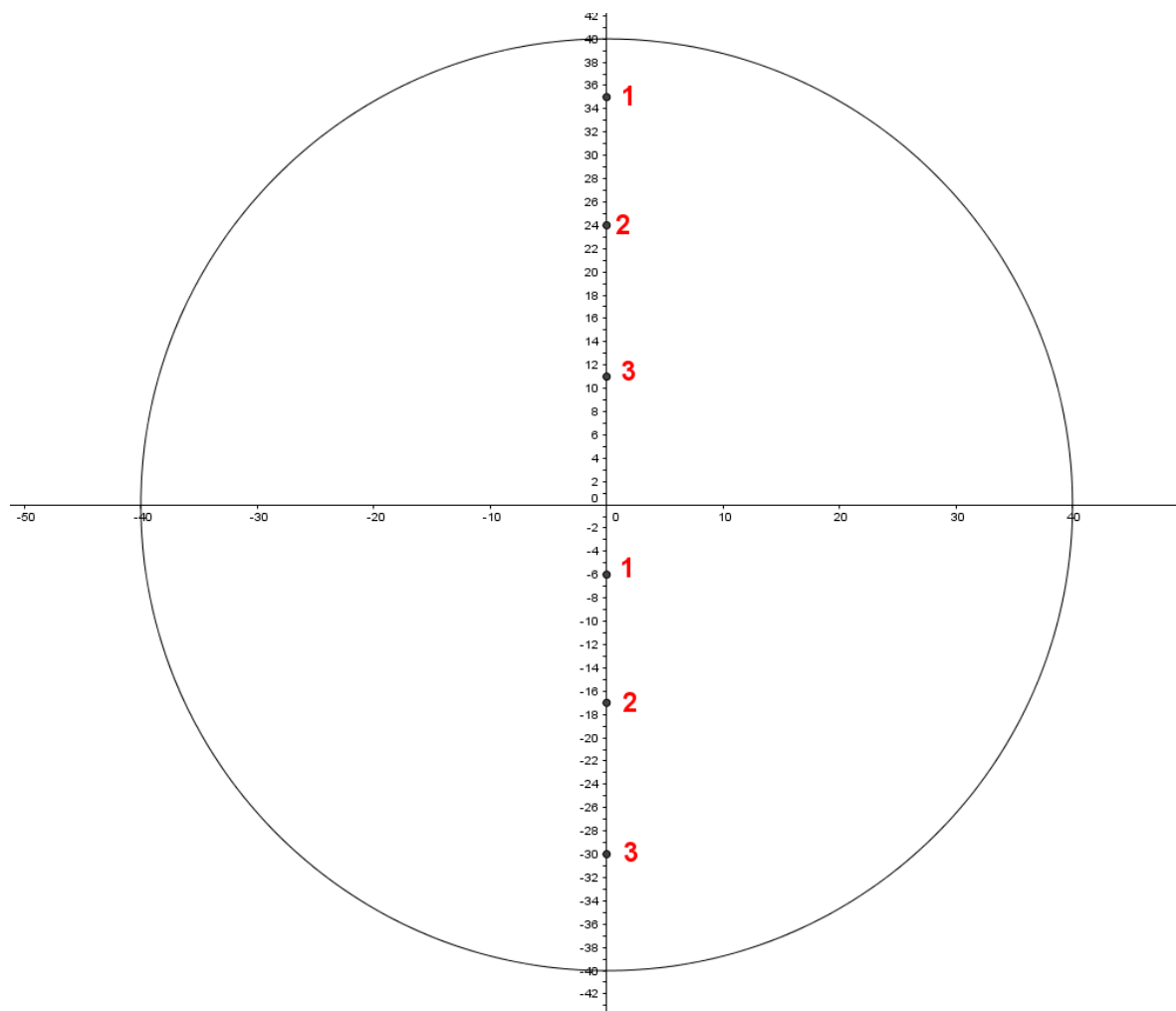


Obrázek 41 – Pohled do výstupu dmychadla (kabelový svazek ve spodní části)



Pro účely tohoto měření byly zapojeny pouze tři ze čtyř trubiček. Vzhledem k povaze měření, které mělo za hlavní účel ověřit funkčnost převodníku a sondy, to byl postačující počet.

Měření proběhlo ve dvou polohách. První poloha byla v horní polovině průměru dmychadla. Druhá poloha pak v dolní polovině. Vzhledem k měřenému průměru byly zapojeny pouze tři ze čtyř trubiček. Vynechána byla spodní trubička. Na schématu níže můžete vidět polohu jednotlivých měřících bodů vůči středu.



Obrázek 42 – Rozložení měřících bodů v obou polovinách průměru dmychadla. Čísla označují odběr (trubičku) na sondě.

V každé poloze byla provedena dvě měření. Jelikož převodník pracuje na principu převádění tlakové síly na elektrický signál, je jeho výstupem napětí ve voltech. Proto bylo nutné tuto výstupní hodnotu převést zpět na tlak v Pa. K tomu účelu slouží převodní funkce, kterou nalezneme v datasheetu. Její tvar pro tento senzor je:

$$V_o = \frac{0,8 * V_s}{P_{max} - P_{min}} * (P_a - P_{min}) + 0,1 * V_s$$

Úpravou této rovnice získáme naměřený tlak  $P_a$ . Rovnice má potom následující tvar:

$$P_a = (V_o - 0,1 * V_s) * \frac{P_{max} - P_{min}}{0,8 * V_s} + P_{min}$$

Do této rovnice následně dosadíme parametry regulátoru a naměřenou hodnotu.

#### Parametry regulátoru

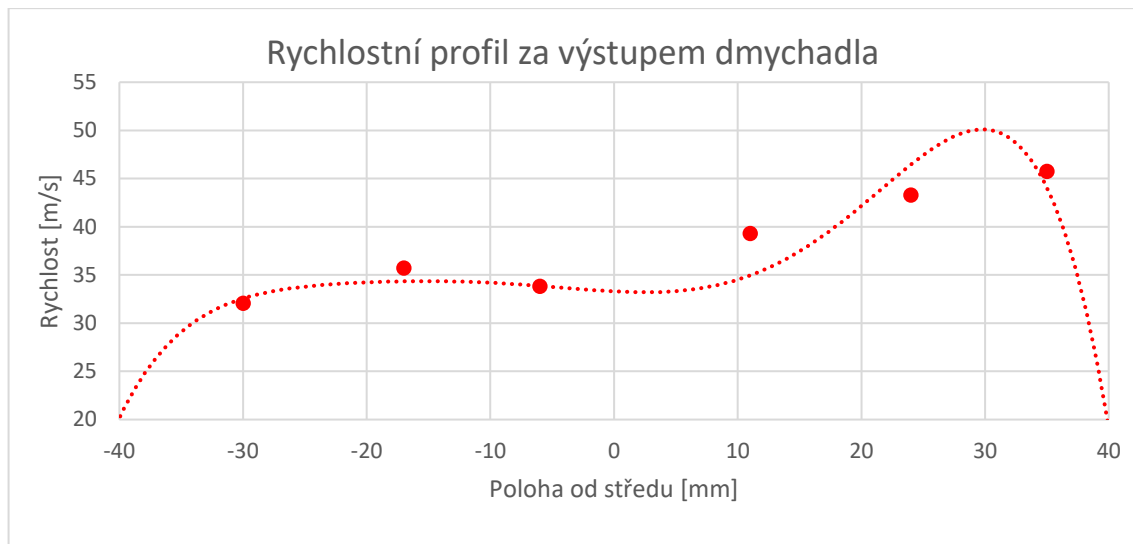
$V_s$	5 V
$P_{max}$	1 psi
$P_{min}$	-1 psi
$V_o$	Naměřená hodnota

Jelikož převodník obsahuje diferenciální senzory tlaku, které ukazují rozdíl mezi tlakem na jednom a druhém portu, ukazují nám již dynamický tlak  $P_d$ , Proto je dopočet rychlosti jen lehkou úpravou vzorce, který byl zmíněn na začátku této práce. Úpravou dostaneme následující vzorec:

$$v = \sqrt{2 * \frac{P_d}{\rho}}$$

Přibližná hustota vzduchu při teplotě 27,4 °C je 1,1649 kg/m<sup>3</sup>. Nyní nám již nic nebrání dopočítat rychlosti proudění v místech jednotlivých odběrů.

Odběr	1	2	3
Horní polovina [m/s]	45,75	43,29	39,29
Dolní polovina [m/s]	33,82	35,72	32,06



Graf 1 – Grafické znázornění rychlostního profilu proložené polynomem šestého stupně (doplněno o nulové body na okraji průměru)

Z vypočtených hodnot vyplývá, že kabelový svazek má znatelný vliv na rychlost proudění. Nicméně je jasné, že pro přesnější proměření by bylo nutné zvolit jinou konfiguraci sondy. A to buď zmenšit rozteč jednotlivých trubiček nebo traverzovat nahoru a dolů v měřeném prostoru. Nicméně měření splnilo svůj účel a ukázalo, že nově zkonstruovaný převodník funguje, jak má.

## 4 Závěr

Cílem práce, jak již bylo zmíněno na začátku, bylo navržení a konstrukce tlakového převodníku a rychlostní sondy pro aerodynamická měření.

Nejprve byla provedena rešerše zabývající se danou problematikou. Byly stručně popsány jednotlivé metody pro měření tlaku a zařízení k tomu účelu používané. Dále byly shrnuty nejčastější druhy rychlostních sond, které se používají pro měření na letadlech a v aerodynamickém tunelu.

Po znalostech získaných v teoretické části práce bylo možné přejít k samotnému návrhu převodníku a sondy. V první řadě bylo nutné vybrat senzory, které se použijí. Tuto část vyřešil vedoucí práce, který měl již senzory nakoupené. Jednalo se o dva druhy senzorů značky HoneyWell, které pracují na principu piezoelektrického jevu. Pro usazení senzorů bylo nutné navrhnout obvodovou desku. Ta byla doplněna o stabilizátor napětí, který reguluje napětí z 9V poskytovaných zdrojem na stabilizovaných 5V. Deska byla doplněna o další součástky nutné ke správné funkci stabilizátoru. Jednalo se o dvojici kondenzátorů o

kapacitě  $1\mu\text{F}$ . Po navržení obvodové desky bylo možné začít s návrhem montážní krabičky, do které budou senzory usazeny spolu s nutnými průchodkami a konektory pro napájení a spojení výstupního signálu s měřicí kartou. Montážní krabička byla vyrobena formou 3D tisku. To umožnilo realizovat návrh již s potřebnými montážními otvory, což zjednodušilo výrobu. Pro spojení senzorů s měřicí kartou byly zvoleny standardizované BNC konektory a pro vyvedení měřicích hadiček ven z montážní krabičky byly zvoleny panelové průchodky značky Festo. Další navrženou částí byla „hrabičková“ sonda, které je složena ze 4 Pitotových trubic. Sonda byla navržena tak, aby byla co nejuniverzálnější a dala se použít pro různá měření.

Celý navržený systém bylo nutné následně otestovat. Pro testování bylo použito dmychadlo zkonstruované pro potřeby jiné bakalářské práce [10]. Měřil se rychlostní profil za výpustí dmychadla. Na naměřených datech bylo patrné, že kabelový svazek, který vede od motoru svisle dolů, má významný vliv na rychlost proudění v tělese dmychadla. Měření zároveň prokázalo funkčnost systému.

## Použitá literatura a zdroje

- [1] Kadlec K., Kmínek M.: Měřicí a řídicí technika. Elektronický učební text, VŠCHT Praha 2001 <http://uprt.1.cz/ucebnice/MRT>
- [2] Kadlec K.: Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1, 2, 3, 4). AUTOMA č. 2, č. 7, č. 10, č. 11 (2007) – <http://automa.cz>
- [3] JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Dotisk 3. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000
- [4] RUSSO, Giuseppe P. *Aerodynamic measurements: from physical principles to turnkey instrumentation*. Philadelphia, PA: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 18-456-9992-0.
- [5] WILLINGER, R. – BENONI, A. *Unterlagen zur Laborübung: „Strömungsmessung mit pneumatischen Sonden“*. Wien: Technische Universität Wien, 2010. 24 s.
- [6] FLEMINGER, AMIR. *Quora* [online]. [cit. 18.7.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.quora.com/What-are-the-functions-of-static-ports-on-airplanes>
- [7] *TruStability® Board Mount Pressure Sensors: HSC Series Datasheet* [online]. 34 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/187/honeywell-sensing-trustability-hsc-series-high-acc-708740.pdf>
- [8] *Microstructure Pressure Sensors: SCX Series Datasheet* [online]. 4 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-scx-series-microstructure-pressure-sensors-product-sheet-008096-1-en.pdf>
- [9] *High Accuracy Ultralow IQ, 300 mA, anyCAP Low Dropout Regulator: ADP3333 Datasheet* [online]. 12 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP3333.pdf>
- [10] HEJNA, Jiří. *Merení charakteristik modelového dmyhadla*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.

# Přílohy

1. Montážní krabička
2. Osazená krabička rozměry
3. Rychlostní sonda
4. Obvodové desky