

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Adam Romaňák



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

## MONITOR TLAKU PRO MIKROFLUIDNÍ SYSTÉMY

PRESSURE MONITOR FOR MICROFLUIDIC SYSTEMS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Romaňák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.

BRNO 2021

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Biomedicínské a ekologické inženýrství**

Ústav biomedicínského inženýrství

**Student:** Bc. Adam Romaňák

**ID:** 186683

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Monitor tlaku pro mikrofluidní systémy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1) Provedte literární rešerši v oblasti měření fyzikálních parametrů, zejména tlaku, v laboratorních průtokových systémech malých objemů. 2) Navrhněte optimální metodiku měření tlaku v nízkoobjemovém průtokovém systému, způsob záznamu, ukládání a zobrazování dat s využitím mikroprocesorové techniky a uživatelského programového vybavení. 3) Zvolte vhodný tlakový senzor umožňující stabilní i dlouhodobé měření tlaku tekutin alespoň do 0,3 baru s dostatečnou přesností. 4) Realizujte hardwarovou část měřicího systému založeného na zvoleném tlakovém senzoru. Vytvořte konstrukci pro připojení tlakového měřiče k mikrofluidnímu systému. 5) Realizujte softwarové vybavení pro měření a zobrazení proměnlivého tlaku dle návrhu v bodě 2). 6) Ověřte správnou funkci realizovaného systému v reálném průtokovém systému. Provedte diskusi nad dosaženými výsledky.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] DIXIT, Ch. K., KAUSHIK, A. Microfluidics for Biologists. Springer, 2016. ISBN-10: 3319400355

[2] WILSON, J. Pressure Measurement: Principles and Practice. 2013. Dostupné z  
[<https://www.fierceelectronics.com/components/pressure-measurement-principles-and-practice>]

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 21.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.

**prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.**  
předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaoberá meraním tlaku v mikrofluidných systémoch. Teoretická časť práce je venovaná mikrofluidike, tlaku v kvapalinách, meraniu tlaku, rozdeleniu tlakových senzorov a ich špecifikácii. Následne je navrhnuté hardwarové a softwarové riešenie meracieho systému na meranie tlaku v mikrofluidnom systéme za využitia mikroprocesorovej techniky. Praktická časť pokrýva samotnú hardwarovú a softwarovú realizáciu meracieho systému.

## **Kľúčová slova**

Meranie tlaku, tlakový senzor, ESP32 DevKit V1, Python, Arduino IDE, mikrofluidný systém

## **Abstract**

The diploma thesis deals with measuring pressure in microfluidic systems. The theoretical part of the work is devoted to microfluidics, pressure in liquids, pressure measurement, distribution of pressure sensors and their specifications. Then follows the hardware and software solution of the measuring system for measuring the pressure in the microfluidic system using microprocessor technology. The practical part covers the hardware and software implementation of the measuring system.

## **Keywords**

Pressure measurement, pressure sensor, ESP32 DevKit V1, Python, Arduino ide, microfluidic system

## **Bibliografická citace:**

ROMAŇÁK, Adam. Monitor tlaku pro mikrofluidní systémy [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134441>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.

## **Prohlášení**

*„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Monitor tlaku pro mikrofluidní systémy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne: 19.5.2021

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vratislavu Čmielovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.*

V Brně dne: 19.5.2021

.....

podpis autora

# Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Teoretické východiska práce.....	13
2.1	Mikrofluidné systémy .....	13
2.1.1	Komponenty mikrofluidného systému.....	13
2.1.2	Tlakový senzor MPS.....	14
2.2	Mechanika kvapalín .....	16
2.2.1	Tlak v kvapalinách.....	16
2.2.2	Pascalov zákon.....	17
2.2.3	Hydrostatický tlak.....	17
2.3	Typy metód merania tlaku .....	18
2.3.1	Meranie absolútneho tlaku.....	18
2.3.2	Meranie relatívneho tlaku .....	19
2.3.3	Meranie diferenčného tlaku .....	19
2.4	Druhy tlakových senzorov .....	20
2.4.1	Odporové tlakové senzory .....	20
2.4.2	Kapacitné tlakové senzory .....	22
2.4.3	Piezoelektrické tlakové senzory.....	23
2.4.4	Optické tlakové senzory.....	23
2.4.5	MEMS (Micro Electro-Mechanical System) senzory .....	24
2.5	Tlakové senzory (rozdiel v pojmoch) .....	26
2.5.1	Tlakový senzor.....	26
2.5.2	Transducer (tlakový prevodník).....	27
2.5.3	Transmitter (tlakový vysielač) .....	27
2.6	Špecifikácia tlakových senzorov.....	28
3.	Návrh meracieho systému .....	30
3.1	ESP32 DevKit V1 .....	30
3.1.1	Popis ESP32 DevKit V1 .....	31
3.1.2	GPIO piny .....	32
3.2	Voľba tlakového senzoru .....	33
3.2.1	Tlakový senzor SSCDANT005PGAA5.....	34
3.3	Zapojenie meracieho systému .....	36



3.4	Návrh softwarové riešenie.....	38
4.	Hardwarové riešenie meracieho systému.....	40
4.1	Doska plošných spojov (DPS) .....	40
4.2	Krabička plastová Z30A PS .....	41
4.3	Pripojenie k mikrofluidnému systému .....	42
5.	Softwarové riešenie meracieho systému .....	44
5.1	Program Arduino IDE .....	44
5.2	Počítačový program .exe .....	46
5.3	Princíp fungovania .exe programu .....	48
6.	Overenie funkčnosti realizovaného meracieho systému .....	51
6.1	Overenie funkčnosti – 3 bodové overenie.....	51
6.2	Overenie na základe zmeny tlaku v čase.....	52
7.	Diskusia.....	59
8.	Záver .....	61

## Seznam obrázků

Obrázok 1 Ukážkové riešenie systému od spoločnosti ELVEFLOW [1].....	14
Obrázok 2 Tlakový senzor ELVEFLOW MPS [1].....	15
Obrázok 3 Rez tlakovým senzorom ELVEFLOW MPS [18].....	15
Obrázok 4 Hydraulický lis [12] .....	17
Obrázok 5 Hydrostatický tlak [12] .....	18
Obrázok 6 Meranie absolútneho tlaku [10] .....	18
Obrázok 7 Meranie relatívneho tlaku [10].....	19
Obrázok 8 Meranie diferenčného tlaku [10].....	20
Obrázok 9 Thin-film technológia [6].....	21
Obrázok 10 Thick-film technológia [6] .....	21
Obrázok 11 Piezorezistívny tlakový senzor [7] Tlak (Pressure) média pôsobí na membránu. Priestor medzi vnútornou stranou membrány a Si-chipom je vyplnený nestlačiteľným silikónovým olejom.....	22
Obrázok 12 Kapacitný tlakový senzor [4] .....	22
Obrázok 13 Piezoelektrický tlakový senzor [4] Tlak (Pressure) média pôsobí na membránu ktorá následne deformuje kryštál, výstupom piezoelektrického kryštálu je náboj úmerný tlaku. ....	23
Obrázok 14 Mechanický optický senzor tlaku [4].....	24
Obrázok 15 Optický senzor tlaku [4].....	24
Obrázok 16 MEMS kapacitný tlakový senzor [4] .....	25
Obrázok 17 Diferenčný tlakový senzor [8].....	27
Obrázok 18 Transducer (tlakový prevodník) [8] .....	27
Obrázok 19 Transmitter (tlakový vysielateľ) [8].....	28
Obrázok 20 Blokové schéma meracieho systému .....	30
Obrázok 21 ESP32 DevKit V1 .....	31
Obrázok 22 Total error band (TEB) zahŕňa všetky možné zdroje chyb, ako offset, nelinearita, hysterezia, tepelný efekt [14].....	34
Obrázok 23 Tlakový senzor SSCDANT005PGAA5 [14] .....	34
Obrázok 24 Transformačná funkcia senzora [14].....	35
Obrázok 25 Menič step UP DC/DC 1-5 V to 5 V 500 mA [15].....	36

Obrázok 26 Delič napätia.....	37
Obrázok 27 Schéma zapojenia obvodu.....	38
Obrázok 28 Návrh vizualizácie programu .....	39
Obrázok 29 Doska plošných spojov (DPS) .....	40
Obrázok 30 Krabica plastová Z30A PS čierná [16].....	41
Obrázok 31 DPS uchytená v konštrukčnej krabici.....	41
Obrázok 32 T-kus na pripojenie k mikrofluidnému systému .....	42
Obrázok 33 Zostrojený merací systém .....	42
Obrázok 34 Kompletné zapojenie systému .....	43
Obrázok 35 ESP 32 - charakteristika 12-bit. A/D prevodníka [17].....	44
Obrázok 36 Blokové schéma - ARDUINO IDE.....	45
Obrázok 37 Ukážka kódu - ARDUINO IDE .....	46
Obrázok 38 Ukážka realizovaného .exe programu .....	48
Obrázok 39 Ukážka - chybová hláška - nepripojené zariadenie.....	48
Obrázok 40 Ukážka .exe programu - výber logov.....	49
Obrázok 41 Ukážka .exe programu – log .....	50
Obrázok 42 Ukážka .exe programu - chybové hlášky .....	50
Obrázok 43 Inicializácia a prvý tlakový impulz.....	53
Obrázok 44 Druhý tlakový impulz .....	53
Obrázok 45 Tretí tlakový impulz.....	53
Obrázok 46 Štvrtý tlakový impulz.....	53
Obrázok 47 Piaty tlakový impulz .....	53
Obrázok 48 Graf - Vývoj tlaku v čase (Flow EZ) .....	54
Obrázok 49 Graf - Vývoj tlaku v čase - Monitor tlaku - neúspešné experimenty ...	55
Obrázok 50 Graf - Vývoj tlaku v čase - Monitor tlaku.....	56
Obrázok 51 Graf - porovnanie merania číslo 3.....	56
Obrázok 52 Graf - porovnanie merania číslo 4.....	57

## Seznam tabulek

Tabuľka 1 Základné parametre senzora [14] .....	35
Tabuľka 2 Údaje z merania.....	51

# 1. ÚVOD

Mikrofluidika je štúdium systémov, ktoré spracúvajú malé množstvá tekutín pomocou malých kanálikov s miniatúrnymi rozmermi - zvyčajne desiatky až stovky mikrometrov. Z mikrofluidiky sa rýchlo stáva prelomová technológia, ktorá nachádza uplatnenie v rôznych oblastiach od biológie a chémie po informačné technológie a optiku. Taktiež je často nazývaná ako lab-on-a-chip, teda laboratórium na čipe. Technológia sa uplatňuje v mnohých nových oblastiach, čím šetrí peniaze a čas strávený výskumom.

Témou diplomovej práce je Monitor tlaku pre mikrofluidné systémy. V teoretickej časti práce sú zahrnuté potrebné informácie nevyhnutné pre následne riešenie tejto problematiky. Sú zamerané na mikrofluidku, tlak, meranie tlaku a tlakové senzory.

Praktická časť práce obsahuje návrh meracieho systému po hardwarovej aj softwarovej stránke vrátane výberu vhodného tlakového senzoru pre túto aplikáciu. Na základe návrhu je prístupné k samotnej realizácii meracieho systému. Po úspešnej realizácii je prevedené overenie správnej funkčnosti zostrojeného meracieho systému. Poznatky z overenia sú uvedené v diskusii aj s komentárom.

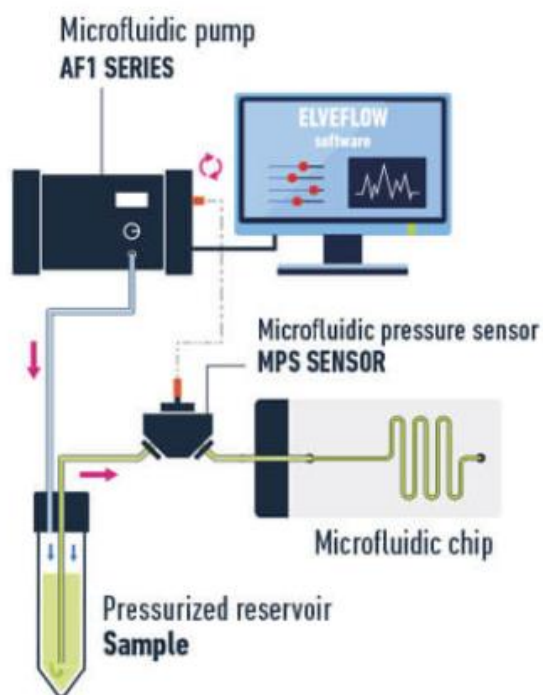
## 2. TEORETICKÉ VÝCHODISKA PRÁCE

### 2.1 Mikrofluidné systémy

Mikrofluidika sa zaoberá manipuláciou s malými objemmi tekutín (zvyčajne nanolitre alebo menej) v sieťach kanálikov, ktorých rozmery sú zvyčajne od desiatok do stoviek mikrometrov. Výhodou a profitom je to, že týmto spôsobom zabezpečíme malé nároky na objem vzoriek a reagensí, krátke doby analýzy a veľkú mieru kontroly nad prebiehajúcimi procesmi. To umožňuje miniaturizáciu jednotlivých laboratórnych postupov. Známe sú taktiež aj pod pojmom „lab-on-a-chip“. Mikrofluidné platformy sa používajú v širokom spektre oblastí, od chémie po lifescience. Považuje sa to za revolúciu v spôsobe vykonávania výskumu a kvalite informácií, ktoré je možné získať. Mikrofluidné systémy umožňujú ľahkú a flexibilnú detekciu a testovanie rôznych biomolekúl. Sú schopné vzorkovať, filtrovať, prekoncentrovať, separovať a opätovne skladovať a detekovať biomolekuly. Na základe typu toku je možné mikrofluidné systémy rozdeliť na spojité a diskkrétne. [2][3]

#### 2.1.1 Komponenty mikrofluidného systému

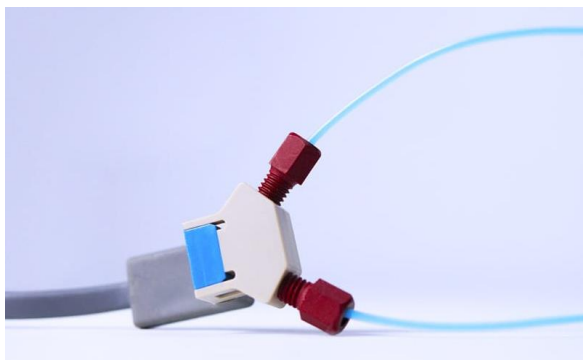
Mikrofluidné systémy na monitorovanie tlaku tekutiny (médiu) v systéme pozostávajú z viacerých komponent, záleží presne na danom type systému. Systémy je možné zložiť z viacerých modulov, záleží iba na požiadavkách pre danú aplikáciu. Na obrázku nižšie je vyobrazené jedno riešenie systému od spoločnosti ELVEFLOW, ktoré vcelku pokrýva tému tejto diplomovej práce. Prvým dôležitým komponentom je mikrofluidná pumpa, ktorá zabezpečuje tlak vzduchu vháňaného do rezervoára s tekutinou (médiom). Druhou súčasťou je práve spomínaný rezervoár s tekutinou. Z neho je daná tekutina za pomoci vzduchu hnaná smerom k mikrofluidnému čipu. Jednotlivé komponenty sú prepojené pomocou PUR hadičiek malých priemerov. Ako je vidieť na obrázku, tak medzi rezervoárom a mikrofluidným čipom je umiestnený tlakový senzor, ktorý sníma tlak hnaného média. Tlakový senzor je zapojený spôsobom in-line. [1] Témou tejto práce je práve navrhnúť a realizovať takýto merací systém s tlakovým senzorom, ktorý bude následne možné zapojiť do celého mikrofluidného systému.



Obrázok 1 Ukážkové riešenie systému od spoločnosti ELVEFLOW [1]

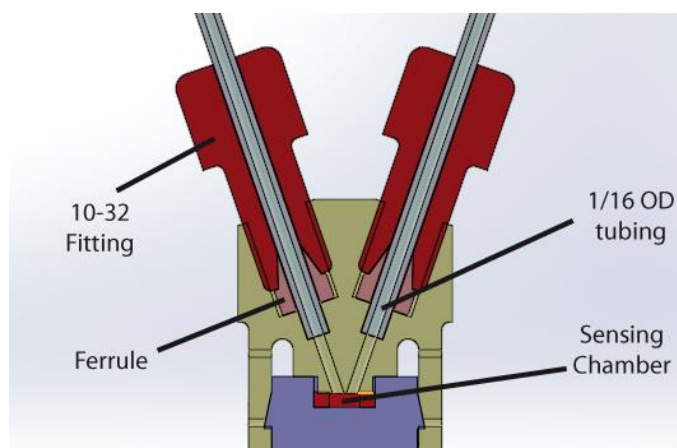
### 2.1.2 Tlakový senzor MPS

Použitý tlakový senzor MPS v zapojení systému spoločnosti ELVEFLOW je tlakový senzor merajúci relatívny tlak, teda za referenčný bod berie atmosférický tlak okolia. Je to senzor vhodný na použitie s kvapalinami a plynmi. Konštrukčné riešenie senzoru je optimalizované na odstránenie mŕtveho objemu. A taktiež má malý vnútorný objem (7.5  $\mu\text{L}$ ), teda táto konštrukcia senzoru je ideálna pre mikrofluidné systémy. Treba zdôrazniť, že senzor nijak neovplyvní tok tekutiny pretekanej nim. Presnosť týchto senzorov je až 0,2% celého rozsahu. [1][18]



**Obrázok 2 Tlakový senzor ELVEFLOW MPS [1]**

Na obrázku nižšie (viď. Obrázok 3) je rez tlakovým senzorom MPS. Ako je možné vidieť senzor ma dva otvory so závitmi do ktorých sa našrubujú priechodky (10-32 Fitting). Rozmer priechodky závisí na priemere hadičky, v tomto prípade je to hadička s vonkajším priemerom 1/16 palca. Dôležitou časťou sú takzvané objímky (Ferrule), ktoré zabraňujú netesnosti a unikom tekutiny. Tieto objímky sú navlečené na hadičke a doťahovaním priechodky v závite sa vtlačia do samotnej priechodky, a tým zatesnia samotnú hadičku v priechodke. Princíp senzoru je založený na meraní pozitívneho alebo negatívneho pretlaku voči atmosférickému tlaku. Tlakový senzor je pripojený k originálnej sensorovej čítačke, ktorá je následne pomocou USB pripojená k počítaču. V softwary je možné zobrazovať, zaznamenávať a analyzovať dáta. [18][1]



**Obrázok 3 Rez tlakovým senzorom ELVEFLOW MPS [18]**



## 2.2 Mechanika kvapalín

“Tekutinami rozumieme látky, ktoré "tečú". To znamená teda, že nemajú stály tvar, ale prispôbujú sa tvaru nádoby, do ktorej ich umiestnime. Patria sem preto kvapaliny aj plyny. Hoci sa jedná o dve rozdielne skupenstva hmoty, majú množstvo spoločných vlastností.” [11]

Ideálna kvapalina je kvapalina bez vnútorného trenia a považuje sa za nestlačiteľnú. Zanedbávame molekulárnu štruktúru a považujeme ju za spojitú [12].

### 2.2.1 Tlak v kvapalinách

Tlak určuje stav kvapaliny v pokoji na určitom mieste. Tlak  $p$  je definovaný nasledujúcim vzťahom

$$p = \frac{F}{S} \quad (1)$$

kde  $F$  je veľkosť sily pôsobiacej kolmo na rovinnú plochu s obsahom  $S$  [12].

Vo všeobecnosti však platí, že tlak v tekutine nie je v každom mieste rovnaký, teda treba upraviť vzťah na tvar, kde tlak bude vyjadrený diferenciálnym podielom

$$p = dF / dS \quad (2)$$

kde  $dF$  je sila pôsobiaca na diferenciálne malú plochu  $dS$  [11][12].

Zo vzťahu je možné odvodiť jednotku tlaku a to  $N/m^2$ . Táto jednotka má svoj vlastný názov **pascal**, značka **Pa** ( $Pa = N / m^2 = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$ ). Vedľajšími jednotkami tlaku sú **bar** a **torr** [11][12].

Pri vzatí do úvahy, že tlak  $p$  je vo všetkých miestach tekutiny rovnaký, platí že na ľubovoľne orientovanú rovinnú plochu s obsahom  $S$ , ktorá je v kontakte s tekutinou, pôsobí kolmá tlaková sila  $F$  a pre jej veľkosť teda platí vzťah

$$F = p \cdot S \quad (3)$$

kde  $p$  je tlak a  $S$  je obsah rovinatej plochy [12].

Ak tlak  $p$  nebude v rôznych miestach rovinatej plochy s obsahom  $S$  rovnaký, potom platí, že veľkosť kolmej tlakovej sily  $F$  bude vyjadrená vzťahom

$$F = \int_S p dS. \quad (4)$$

Tlak v tekutine môže byť vyvolaný buď vlastnou tiažovou silou, ktorá pôsobí na tekutinu alebo vonkajšou silou, prípadne súčasne oboma [12].

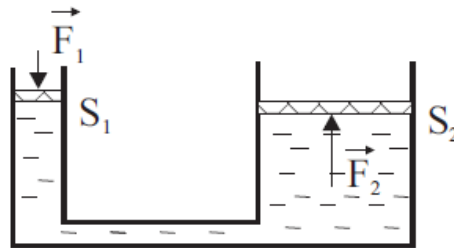
### 2.2.2 Pascalov zákon

Pascalov zákon hovorí o tom, že pre tlak vyvolaný vonkajšou silou platí: “tlak vyvolaný vonkajšou silou pôsobiacou na povrch kvapaliny alebo plynu sa v nich šíri všetkými smermi a je všade rovnaký.

Pascalov zákon sa využíva v hydraulických (pneumatických) zariadeniach. Sú to dva valce s piestami obsahov  $S_1 < S_2$  spojené trubicou a naplnené kvapalinou (vid'. Obrázok 4). Ak na piest s obsahom  $S_1$  pôsobí sila  $F_1$ , vyvolá v kvapaline tlak  $p_1 = F_1/S_1$ . Tento tlak sa šíri kvapalinou a v mieste väčšieho piestu s obsahom  $S_2$  kvapalina pôsobí silou veľkosti

$$F_2 = p_2 S_2 = p_1 S_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$$

Teda silou  $F_1$  môžeme vyvolať väčšiu silu  $F_2$ .”[12]



Obrázok 4 Hydraulický lis [12]

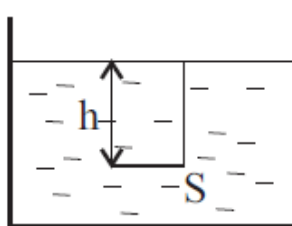
### 2.2.3 Hydrostatický tlak

Pod pojmom hydrostatický tlak rozumieme všeobecne každý tlak v kvapaline, patrí tu tlak spôsobený vlastnou tiažou kvapaliny, a taktiež tlak spôsobený prípadne vonkajšou silou (napríklad tlak vzduchu na kvapalinu) [12].

Predstavme si, že máme nádobu v ktorej je kvapalina o danej hustote  $\rho_k$ . V ľubovoľnej hĺbke  $h$  si zvolíme ľubovoľnú plochu s obsahom  $S$  (vid'. Obrázok 5). Na túto plochu bude pôsobiť stĺpec kvapaliny svojou tiažovou silou  $G = S \cdot h \cdot \rho_k \cdot g$  a tá práve vyvolá hydrostatický tlak

$$p = \frac{G}{S} = h \cdot \rho_k \cdot g \quad (5)$$

Hydrostatický tlak závisí iba na hustote kvapaliny, hĺbke pod hladinou a tiažovom zrýchlení. Nezávisí na tvare nádoby a množstva kvapaliny v nej [11][12]. Hydrostatický paradox – keď máme nádoby s rovnakou výškou rovnakej kvapaliny ale s rôznou plochou dna, potom bude hydrostatický tlak pôsobiaci na dno nádob rovnaký [12].



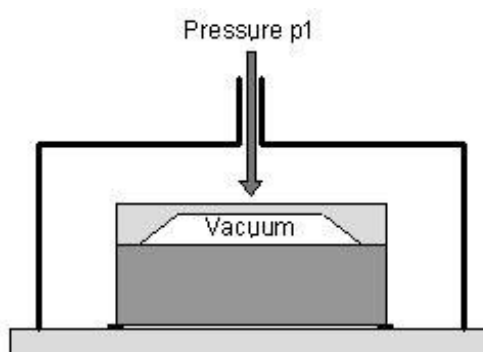
Obrázok 5 Hydrostatický tlak [12]

## 2.3 Typy metód merania tlaku

Meranie tlaku je možné rozdeliť na tri hlavné skupiny a to meranie absolútneho, relatívneho a diferenčného tlaku.

### 2.3.1 Meranie absolútneho tlaku

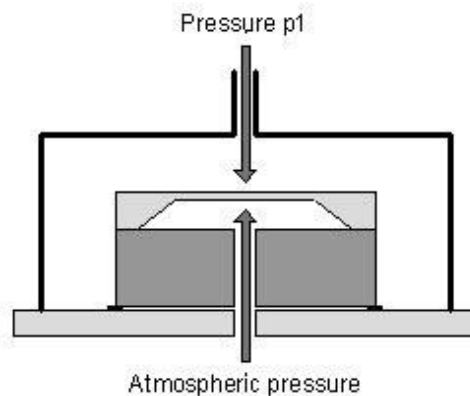
Pri meraní absolútneho tlaku sa za referenčný bod považuje nula alebo vákuum [4]. Absolútne piezorezistívne tlakové senzory merajú tlak vo vzťahu k referenčnej hodnote vysokého vákua utesneného za membránou (viď. Obrázok 6). Vákuum musí byť zanedbateľné v porovnaní s meraním tlakom [10]. Dôležitá je aplikácia v leteckom priemysle, keďže tlak vzduchu sa mení s nadmorskou výškou [5]. Jedna strana senzoru je pripojená k meranému médiu (Pressure  $p_1$ ) a druhá strana je utesnená (efekt vákua) (viď. Obrázok 6) [4].



Obrázok 6 Meranie absolútneho tlaku [10]

### 2.3.2 Meranie relatívneho tlaku

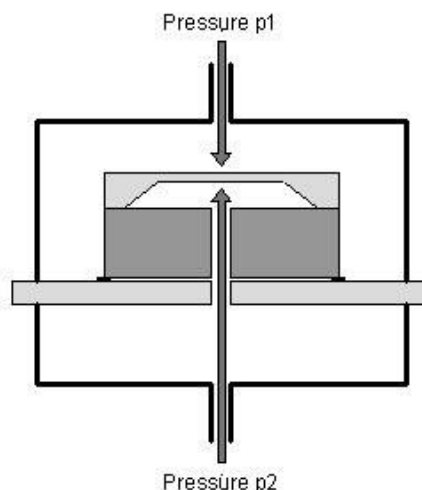
Meranie relatívneho tlaku je meranie vzťahovane ku tlaku okolia, teda atmosférickému tlaku. Jedná strana senzoru je pripojená k danému meranému systému (Pressure  $p_1$ ) a druhá je voľná k atmosférickému tlaku (Atmospheric pressure) (viď. Obrázok 7) [4]. Síce daný príklad nesúvisí s touto témou diplomovej práce ale ideálny spôsob predstavy je meranie tlaku v pneumatike. Ak tlakomer ukáže 35 PSI tak to znamená, že tlak v pneumatike je o 35 PSI väčší ako atmosférický tlak [5]. Alebo ako príklad môžeme vziať vákuové pumpy použité počas alebo po operáciách. Používajú sa na odstránenie telesných tekutín, plynov a dokonca aj tkanív. Zvyčajne je potrebné len malé, jemne regulované vákuum, aby sa zabránilo zraneniu. Toto vákuum je potrebné nastaviť vo vzťahu k miestnemu atmosférickému tlaku [4].



Obrázok 7 Meranie relatívneho tlaku [10]

### 2.3.3 Meranie diferenčného tlaku

Niekedy nie je potrebné poznať absolútny tlak daného média. Namiesto toho potrebujeme poznať iba rozdiel medzi dvoma bodmi v meranom systéme [4][1]. Pri meraní diferenčného tlaku teda dostávame rozdiel dvoch tlakov, nejde o meranie voči nijakému referenčnému bodu [5]. Vykonané meranie je úplne nezávislé od atmosférického tlaku [4]. Jedna strana senzoru pripojená na jedno médium (Pressure  $p_1$ ) a druhá na druhé (Pressure  $p_2$ ) (viď. Obrázok 8). Dané senzory môžu merať obojsmerne, teda pozitívnu aj negatívnu tlakovú diferenciu ( $P_1 > P_2$  alebo  $P_1 < P_2$ ). Alebo jednosmerne, teda iba pozitívnu tlakovú diferenciu ( $P_1 > P_2$ ) [10].



**Obrázok 8 Meranie diferenčného tlaku [10]**

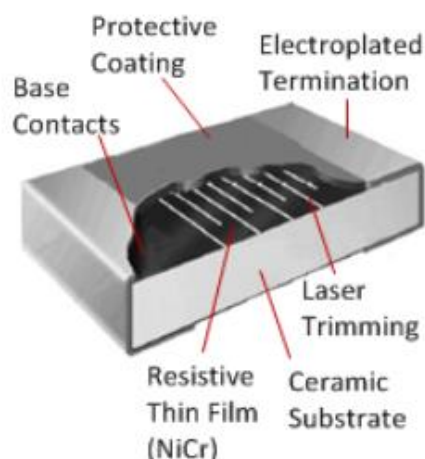
## 2.4 Druhy tlakových senzorov

Tlakové senzory sú prístroje alebo zariadenia, ktoré prevádzajú veľkosť tlaku, ktorý je vyvíjaný na senzor na výstupný elektrický signál, ktorý môže byť použitý na stanovenie kvantitatívnej hodnoty tlaku. Existuje mnoho rôznych typov tlakových senzorov, ktorých princíp fungovania je podobný, ale pri prevode tlaku na výstupný elektrický signál sa opierajú o rôzne technológie [5].

Princíp technológie použitej snímačom môže ovplyvniť presnosť, spoľahlivosť, rozsah merania a kompatibilitu s cieľovým prostredím. Nižšie je uvedených 5 rôznych technológií, ako sa vstupný tlak vyvíjaný na senzor vo vnútri snímača prevedie na výstupný elektrický signál [4].

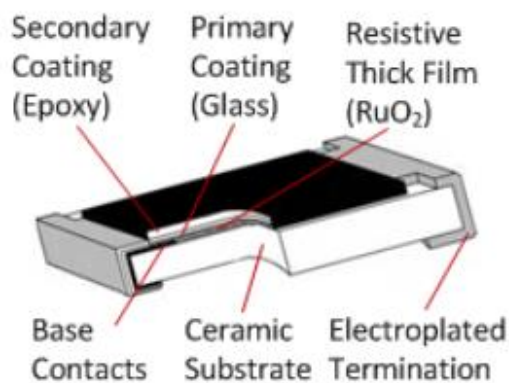
### 2.4.1 Odporové tlakové senzory

Odporové tlakové senzory využívajú zmenu elektrického odporu tenzometra pripojeného k membráne vystavenej tlaku média. Tenzometre často pozostávajú z kovového odporového elementu na pružnom podklade spojenom s membránou alebo priamo naneseného na tenkú fóliu. Kovová membrána poskytuje vysokú toleranciu tlaku ktorý znesie bez zmeny chovania (proof pressure), a taktiež vysokú toleranciu tlaku pri ktorom nedôjde k poškodeniu (burst pressure) [4].



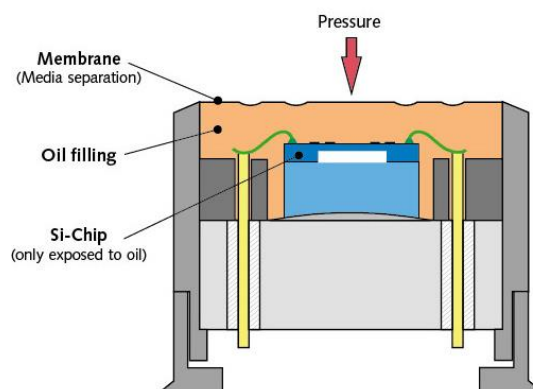
**Obrázok 9 Thin-film technológia [6]**

Tiež môže byť tenzometer nanesený na keramickú membránu pomocou tzv. procesu thick-film. Známe ako SMD čipy [6]. Tolerancia ‚proof pressure‘ a ‚burst pressure‘ je zvyčajne oveľa nižšia ako v prípade varianty s kovovou membránou [4].



**Obrázok 10 Thick-film technológia [6]**

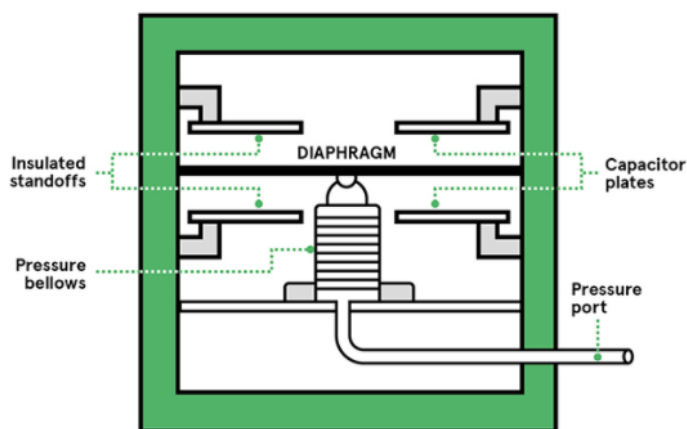
Piezorezistívne tlakové senzory využívajú zmenu rezistivity polovodičových materiálov [4]. V piezorezistívnych senzoroch tlaku je meracím prvkom Wheatstoneov mostík na báze kremíka. Takto sa minimálne rozširuje pod tlakom meniacim elektrický odpor. Tento efekt poznáme bežne pod pojmom piezorezistívny efekt. Tlak je snímaný kremíkovým čipom cez membránu a nestlačiteľný silikónový olej. Čip je napájaný cez izolačný priechod skla a prepojovacie vodiče [7]. Veľkosť zmeny môže byť stokrát väčšia ako zmena odporu vyvolaná kovovým tenzometrom. Preto piezorezistívne senzory môžu merať menšie zmeny tlaku ako kovové alebo keramické senzory [4].



**Obrázok 11 Piezorezistívny tlakový senzor [7] Tlak (Pressure) média pôsobí na membránu. Priestor medzi vnútornou stranou membrány a Si-chipom je vyplnený nestlačiteľným silikónovým olejom.**

## 2.4.2 Kapacitné tlakové senzory

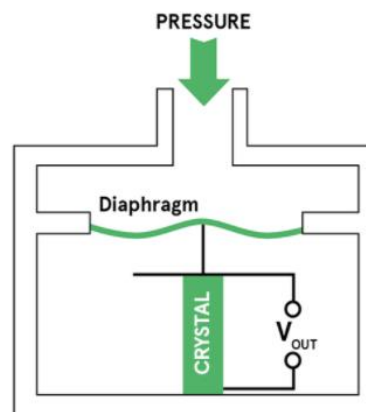
Kapacitné tlakové senzory zaznamenávajú zmenu kapacity na kondenzátore. Kondenzátor sa skladá z dvoch paralelných vodivých dosiek (capacitor plates) oddelených malou medzerou. Kde jedna z dosiek funguje ako membrána (diaphragm), ktorá je posúvaná vplyvom tlaku ktorý na ňu pôsobí. Čo ma za následok to, že sa mení kapacita obvodu (viď. Obrázok 12). Kapacitné tlakové senzory môžu mať vysokú citlivosť, dokážu merať tlaky pod 10 mbar a vydržať veľký ‚proof pressure‘. Obmedzenia v oblasti materiálov a požiadavky na spájanie a tesnenie však môžu aplikácie obmedziť [4].



**Obrázok 12 Kapacitný tlakový senzor [4]**

### 2.4.3 Piezoelektrické tlakové senzory

Piezoelektrické tlakové snímače využívajú vlastnosti piezoelektrických materiálov, ako je napríklad kremeň, na generovanie náboja na povrchu, keď na neho pôsobí tlak. Veľkosť náboja je úmerná použitej sile a polarita vyjadruje jeho smer. Náboj sa hromadí a rýchlo sa rozptýli pri zmene tlaku, čo umožňuje meranie rýchlo sa meniacich dynamických tlakov. Na rozdiel od piezorezistívnych a kapacitných tlakových senzorov, piezoelektrické senzory nevyžadujú žiadny externý zdroj napätia alebo prúdu. Generujú výstupný signál priamo z aplikovaného tlaku. Výstupom piezoelektrického kryštálu je náboj úmerný tlaku. Na prevod signálu na napätie je potrebný tzv. charge amplifier [4].

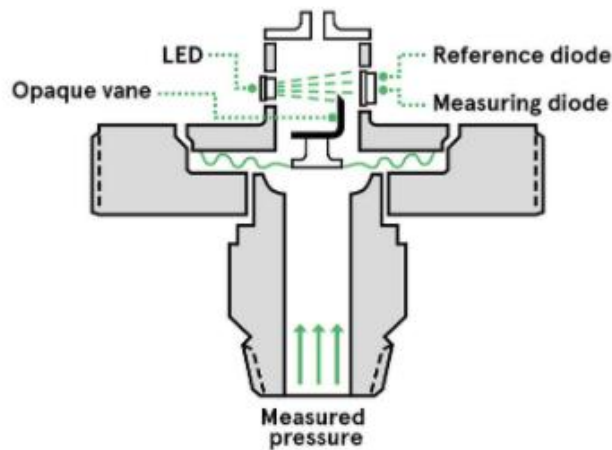


**Obrázok 13 Piezoelektrický tlakový senzor [4] Tlak (Pressure) média pôsobí na membránu ktorá následne deformuje kryštál, výstupom piezoelektrického kryštálu je náboj úmerný tlaku.**

### 2.4.4 Optické tlakové senzory

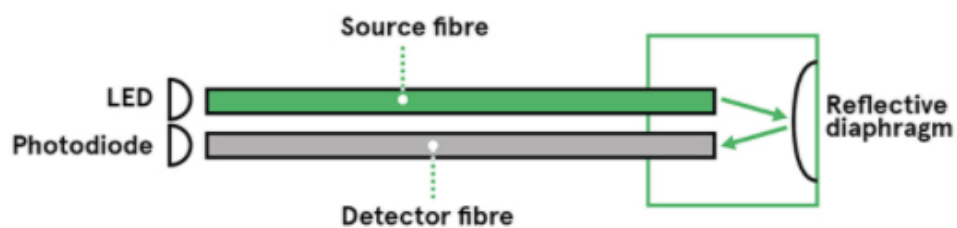
Optické tlakové senzory detekujú zmenu tlaku prostredníctvom pôsobenia tlaku na svetlo. V najjednoduchšom prípade to môže byť mechanický systém, ktorý blokuje svetlo zvyšujúcim sa tlakom. Napríklad v mechanizme zobrazenom nižšie tlak pohybuje membránou, ku ktorej je pripojená nepriehľadná clona (lopatka – opaque vane), ktorá blokuje svetlo z LED. Pokles intenzity svetla z LED je detekovaný fotodiódou (measuring diode) a poskytuje priame meranie tlaku. Takýto optický senzor tlaku vyžaduje aj referenčnú fotodiódu (reference diode), ktorú clona nikdy nezakrýva. Senzor potom zmeria zmenu prijatého svetla [4].





**Obrázok 14 Mechanický optický senzor tlaku [4]**

Tieto mechanické systémy sú pomerne veľké. Oveľa menšie verzie môžu byť skonštruované s reflexnou membránou a dvoma optickými vláknami (viď. Obrázok 15), jedno slúži ako zdroj svetla (source fibre) a druhé slúži na príjem odrazeného svetla (detector fibre). Tlak pôsobí na membránu a ohýba ju, teda sa mení množstvo odrazeného svetla späť do detektora [4].



**Obrázok 15 Optický senzor tlaku [4]**

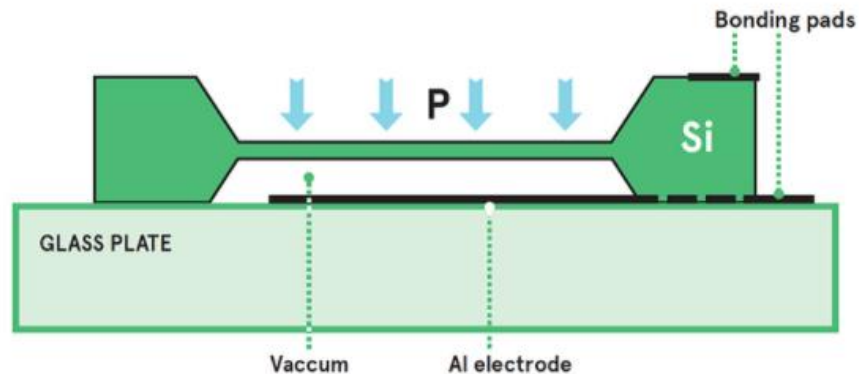
### 2.4.5 MEMS (Micro Electro-Mechanical System) senzory

Zariadenia mikroeletromechanických systémov (MEMS) kombinujú malé mechanické a elektronické súčiastky na kremíkovom čipe. Sú to malé zariadenia, zvyčajne iba asi 2 - 3 mm. Technológiu MEMS je možné použiť na výrobu rôznych senzorov. Umožňuje kombináciu presných senzorov, výkonného spracovania a bezdrôtovej komunikácie (napríklad Wi-Fi, Bluetooth) na jednom integrovanom obvode. Sensory MEMS obsahujú najbežnejšie piezorezistívny alebo kapacitný mechanizmus snímania tlaku [4].

### 2.4.5.1 MEMS kapacitný tlakový senzor

Na vytvorenie kapacitného snímača sú vodivé vrstvy nanášané na membránu a dno dutiny, aby sa vytvoril kondenzátor. Kapacita je zvyčajne v niekoľko pikofarádach. Deformácia membrány vplyvom tlaku ( $P$ ) znižuje priestor pod ňou, a tým mení kapacitu (viď. Obrázok 16). Zmenu je možné merať zahrnutím senzora (Al electrode) do rezonančného obvodu, ktorý mení svoju frekvenciu so zmenou tlaku. Senzor je možné použiť s elektronickými komponentmi na čipe k vytvoreniu oscilátora, ktorý generuje výstupný signál. Pretože je ťažké vyrobiť veľkú indukčnosť na kremíku, bude to obvykle založené na RC obvode [4].

Alternatívne je možné kapacitu zmerať priamo zmeraním času ktorý je potrebný na nabitie kondenzátora. To je potom možné porovnať s referenčným kondenzátorom, aby sa zohľadnila tolerancia a redukovali sa tepelné účinky. V oboch prípadoch vzdialenosť elektroniky a senzoru minimalizuje chyby spôsobené parazitnou kapacitou a šumom [4].



Obrázok 16 MEMS kapacitný tlakový senzor [4]

### 2.4.5.2 MEMS piezorezistívny tlakový senzor

Piezorezistívne tenzometrické senzory boli prvými úspešnými MEMS senzormi tlaku a sú široko používané v automobilovom priemysle, lekárstve a domácich spotrebičoch. Vodivé snímacie elementy sú nanosené priamo na membránu. Aplikovaný tlak zapríčiňuje zmeny odporu týchto vodičov. Zmena odporu je úmerná napätiu, ktoré je relatívnou zmenou dĺžky vodiča. Rezistory sú zapojené vo Wheatstoneovom mostíku, čo umožňuje veľmi presné meranie zmien odporu [4].

## 2.5 Tlakové senzory (rozdiel v pojmoch)

Existuje niekoľko pojmov spojených so zariadeniami na meranie tlaku, ktoré je si ľahko zameniť, respektíve pomýliť. Jedná sa o pojmy senzor, transducer (prevodník) a transmitter [5][8]. Výrobcovia a dodávatelia týchto zariadení môžu na opis svojich produktov používať jeden alebo viac z týchto pojmov. Všeobecne však primárny rozdiel medzi týmito pojmi musí súvisieť s elektrickým výstupným signálom, ktorý sa generuje, a s výstupným rozhraním zariadenia. Avšak medzi dodávateľmi existujú rozdiely v klasifikácii ich zariadení [5].

Jedným zo spôsobov, ako je možné odlíšiť tlakové senzory od ostatných dvoch, teda transmitter a transducer (prevodník) je to, že tlakové senzory nemajú na rozdiel od nich zabudovanú elektroniku, ktorá upravuje a zosilňuje výstupný signál [5]. V tejto práci sa bude používať všeobecný pojem tlakový senzor.

### 2.5.1 Tlakový senzor

Tlakové senzory, aj keď sa používajú ako všeobecný pojem pre všetky tieto tri typy zariadení, zvyčajne majú výstupný signál v milivoltoch. Keďže sa jedná o výstupný signál senzoru v milivoltoch, plus musíme zobrať ohľad na odpor vodičov, tak typické použitie je limitované na vzdialenosť tri až šesť metrov od elektroniky bez výraznej straty signálu. Výstupný signál je úmerný napájaciemu napätiu senzora. Napríklad senzor s napájaním 5 VDC, ktorý generuje výstup 10 mV/V bude mať výstupný signál s veľkosťou od 0 do 50 mV [5][8]. Staršie technológie, ako napríklad tenzometre s lepenou fóliou alebo technológiou thin-film, generujú 2 - 3 mV/V, zatiaľ čo vyššie spomínaná technológia MEMS dokáže spoľahlivo generovať 20 mV/V [8]. Výstupný signál v milivoltoch nám umožňuje navrhnuť úpravu signálu podľa potreby pre danú aplikáciu a pomáha znížiť náklady aj rozmery [5][8]. Obmedzenia týchto senzorov spočívajú v tom, že musia byť napájané daným určeným napätím, pretože výstup v plnom rozsahu je úmerný napájaciemu napätiu. Výstupný signál iba v milivoltoch tiež znamená, že tieto zariadenia sú menej vhodné na použitie v prostredí s elektronickým šumom [5].



**Obrázok 17 Diferenčný tlakový senzor [8]**

### **2.5.2 Transducer (tlakový prevodník)**

Transducer (prevodník) generuje vyššiu úroveň výstupného signálu alebo frekvencie tým, že má zabudované zosilňovače signálu, ktoré zvyšujú veľkosť výstupného signálu napríklad na 5 V alebo 10 V a frekvenciu na 1 až 6 kHz. Zvýšená úroveň výstupného signálu umožňuje použitie prevodníkov vo väčšej vzdialenosti od elektroniky, napríklad šesť metrov. Napájacieho napätia zvyčajne býva, napríklad 8 – 28 VDC [5][8]. Okrem prípadu, kde výstup je 0,5 - 4,5 V, kde sa vyžaduje regulované napájanie 5 VDC. Pri prípade, kde výstupný signál je 0 - 5 V, nemajú prevodníky tzv. „živú nulu“, kde sa hodnota výstupného signálu nachádza keď je tlak rovný nule. Existuje preto riziko, že systém nebude poznať rozdiel medzi nefunkčným prevodníkom bez výstupu a nulovým tlakom [8]. Vyššie výstupné napätia znižujú spotrebu prúdu, vďaka čomu sú prevodníky použiteľné v aplikáciách, kde je zariadenie napájané z batérie [5].



**Obrázok 18 Transducer (tlakový prevodník) [8]**

### **2.5.3 Transmitter (tlakový vysielač)**

Zatiaľ čo prevodníky a senzory tlaku generujú výstupný signál napät'ový, transmitters (vysielače) generujú prúdový výstup s nízkou impedanciou, ktorý sa

zvyčajne používa ako analógový signál v rozsahu 4 - 20 mA v dvojvodičovej alebo štvorvodičovej konfigurácii. Transmittery (vysielače) sa vyznačujú dobrou odolnosťou voči elektronickému šumu, a sú preto vhodné pre aplikácie, kde je potrebné prenášať signály na väčšie vzdialenosti [5][8]. Tieto zariadenia nevyžadujú regulované napájanie, ale vyšší prúdový výkon a spotreba energie ich robia nevhodnými pre aplikácie napájané batériami, pri maximálnom tlaku alebo blízko neho [5].



Obrázok 19 Transmitter (tlakový vysielač) [8]

## 2.6 Špecifikácia tlakových senzorov

Tlakové senzory sú zvyčajne špecifikované niekoľkými bežnými parametrami, ktoré sú uvedené nižšie. Treba zobrať na vedomie to že technické parametre týchto senzorov sa môžu líšiť od konkrétnych výrobcov a tiež, že technické parametre sa môžu líšiť v závislosti od konkrétneho typu dodávaného tlakového senzoru. Základné znalosti týchto špecifikácií uľahčia proces vyberania vhodného senzoru na danú aplikáciu [5].

- **Typ senzora (druh média)** – reflektuje druh média pre ktorý je senzor navrhnutý (napríklad vzduch, tekutiny a pod.)
- **Typ senzoru (druh tlaku)** - reflektuje druh tlaku, pre ktorý je senzor navrhnutý na prevádzku. Tu nájdeme pojmy ako absolútny tlak, relatívny tlak, diferenčný tlak a pod.
- **Rozsah meraného tlaku** - uvádza rozsah tlakov, pri ktorom môže senzor pracovať a generovať výstupný signál.
- **Maximálny tlak** - absolútna maximálna hodnota tlaku, pri ktorej môže senzor spoľahlivo fungovať bez poškodenia. Prekročenie maximálneho tlaku môže mať za následok poruchu senzoru alebo nepresný výstup signálu.
- **Full scale** - je rozdiel medzi maximálnym tlakom, ktorý dokáže snímač merať, a nulovým tlakom.

- **Typ výstupu** - popisuje povahu charakteristík výstupného signálu zo senzoru. Napríklad: analógový prúd, analógové napätie, frekvenciu alebo iné formáty.
- **Rozsah výstupu** - rozsah výstupu napríklad 0 - 25 mV, viazaný na celý rozsahu činnosti senzoru. Pre výstupne signály napät'ové to bude zvyčajne v milivoltoch alebo voltoch a pre prúdového výstupu v miliampéroch.
- **Presnosť** - miera odchýlky v meraní medzi hodnotou tlaku na výstupe senzora a skutočnou hodnotou tlaku. Presnosť sa často vyjadruje ako +/- hodnota tlaku alebo ako +/- percentuálna chyba (napríklad 2%) [5]. **Total Error Band (TEB)** je rozdiel medzi najnegatívnejšou a najpozitívnejšou odchýlkou od skutočného merania, stanovený z kombinácie všetkých známych chýb senzoru, v medziach rozsahu merania a prevádzkovej teploty [9].
- **Rozlíšenie** - predstavuje najmenšiu diferenciu vo výstupnom signály, ktorú je možné rozlíšiť sensorom.
- **Napájacie (vstupné) napätie** - veľkosť napätia potrebného na napájanie tlakového senzoru, udávaná vo voltoch, najčastejšie sa vyjadruje ako rozsah vstupného napätia, ktorý je prijateľný (napríklad 4,75 - 5,25 VDC).
- **Teplotný rozsah** - teplotné extrémny (vysoké a nízke), v ktorých je senzor navrhnutý tak, aby spoľahlivo pracoval a poskytoval výstupný signál.
- **Teplotná kompenzácia** – udáva či je senzor teplotne kompenzovaný

### 3. NÁVRH MERACIEHO SYSTÉMU

V tejto kapitole sa práca venuje návrhu celého meracieho systému na monitorovanie tlaku v mikrofluidnom systéme. Sú tu uvedené jednotlivé komponenty, ktoré sú použité, ich špecifikácie, zapojenie systému a taktiež odôvodnenia prečo práve dané komponenty a zapojenia boli vybraté ako tie najvhodnejšie pre túto aplikáciu. Nachádzajú sa tu aj výpočty niektorých prvkov meracieho systému.

Základným prvkom tohto meracieho systému na monitorovanie tlaku v mikrofluidnom systéme je vývojová doska ESP32 DevKit V1 od spoločnosti Espressif. Použitý tlakový senzor je od spoločnosti Honeywell a konkrétne sa jedna o senzor s katalógovým číslom SSCDANT005PGAA5.



Obrázok 20 Blokové schéma meracieho systému

#### 3.1 ESP32 DevKit V1

Základ vývojovej dosky ESP32 DevKit V1 tvorí modul ESP-WROOM-32, ktorý je osadený na čipe ESP32-D0WDQ6. Je navrhnutý tak aby dosiahol čo najlepší výkon, preukázal odolnosť, univerzálnosť a spoľahlivosť v širokej škále aplikácii. ESP32 je úspešný nástupca ESP8266, ktorý ma niekoľko výhod oproti staršej verzii. Tými azda najzásadnejšími sú dvojjadrový procesor a kombinácia Wi-Fi a Bluetooth.

Základnými špecifikáciami ESP32 DevKit V1 sú už vyššie spomínaný dvojjadrový procesor s frekvenciou až 240 MHz, 512 kB RAM, 2,4 GHz Wi-Fi modul (až do 150 Mbits/s), BLE (Bluetooth low energy) [19].

Počet GPIO pinou môže byť buď 30 alebo 36. V našom prípade pracujeme s 30 pinovou verziou.

### 3.1.1 Popis ESP32 DevKit V1

#### USB-UART most

Napájanie a prenos dát sú riešené pomocou USB-UART mostu. V tomto module je osadený konkrétne typ CP2102, ktorý poskytuje jednoduché riešenie prepojenia USB a UART rozhrania.

#### BOOT/EN tlačidla

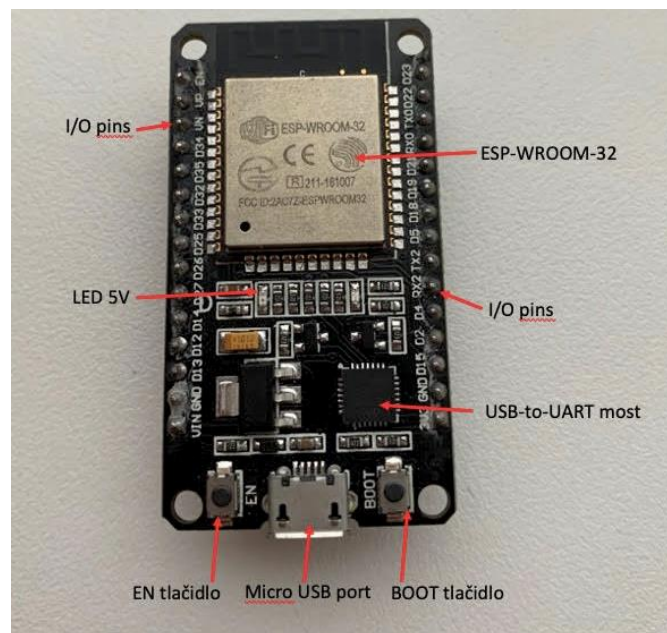
Nahratie nového kódu do systému pomocou tlačidla BOOT. Tlačidlo EN slúži na resetovanie systému. Podržaním tlačidla BOOT a stisnutia EN sa inicializuje režim sťahovania firmvéru cez sériový port.

#### Micro USB port

Slúži na napájanie vývojovej dosky a taktiež na komunikáciu medzi doskou a počítačom.

#### LED dióda 5 V

Na vývojovej doske sa nachádza LED dióda, ktorá rozsvietením signalizuje pripojenie zdroja napätia k doske. Buď sa jedná o pripojenie cez USB k počítaču alebo k externému zdroju napätia.



Obrázok 21 ESP32 DevKit V1



### **3.1.2 GPIO piny**

S ESP32 vďaka funkcii multiplexovania, ktorá umožňuje priradiť viac funkcií rovnakému pinu, sa môžeme rozhodnúť, ktoré piny budú UART, I2C alebo SPI - stačí to nastaviť v kóde. Ak ich v kóde nenastavíme inak tak sa použijú tak ako sú predvolené. [19]

#### **Napájacie piny**

Výstupy napájania na vývojovej doske ESP32 DevKit V1 sú dva buď to môže byť riešené cez 3V3 pin alebo pin VIN, ktorý ma päť voltov.

#### **EN pin**

Tento pin sa používa na aktiváciu ESP32. Keď je na pin EN privedená logická jednotka tak je čip zapnutý, ak je privedená logická nula tak je čip vypnutý.

#### **A/D prevodníky**

ESP32 DevKit V1 podporuje meranie na 15 rôznych ADC kanáloch. Jedna sa o 12-bitové prevodníky. To znamená, že keď čítame analógový vstup, jeho rozsah sa môže pohybovať v rozmedzí od 0 do 4095. Takže 0 bude patriť 0 V a 4095 bude pre 3,3 V.

#### **D/A prevodníky**

Nachádzajú sa tu dva 8-bitové DAC kanály, ktoré slúžia na prevod dvoch digitálnych signálov na analógové napät'ové signály.

#### **SPI**

Na vývojovej doske sa nachádzajú tri sériové periférne rozhrania (SPI, HSPI, VSPI) fungujúce na princípe master/slave.

#### **UART**

ESP32 DevKit V1 má tri UART rozhrania (UART0, UART1, UART2), ktoré poskytujú asynchrónnu komunikáciu (RS232) s rýchlosťou až 5 Mb/s.

## 3.2 Voľba tlakového senzoru

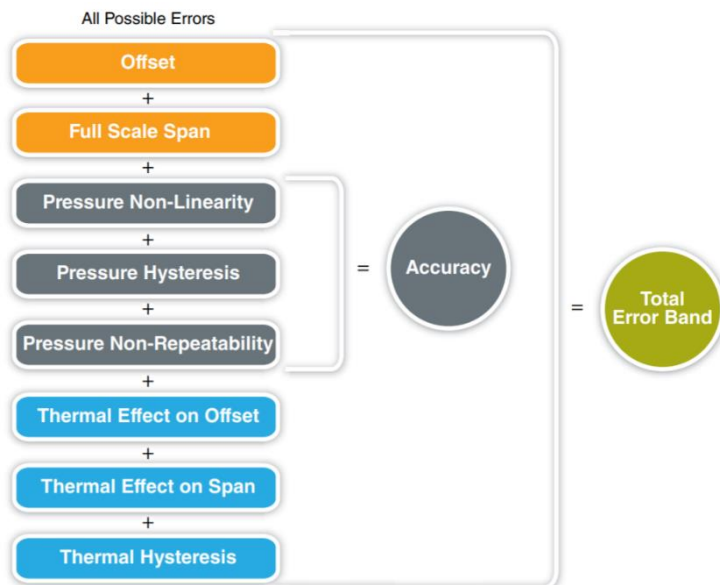
Pri výbere vhodného tlakového senzora na monitorovanie tlaku v mikrofluidnom systéme sa kládol dôraz na predom definované a konzultované požiadavky. Týmito požiadavkami boli :

- Typ senzora vhodný pre tekutiny, keďže použitie v našej aplikácii je v kontakte s tekutinou a nie každý senzor je vhodný pre toto médium.
- Typ senzoru ktorý meria relatívny tlak, teda za referenčný bod voči ktorému senzor meria tlak sa berie atmosféricky tlak okolia.
- Rozsah meraného tlaku ideálne do 0,3 baru, prípadne blízko tejto hodnoty, aby rozsah nebol zbytočne príliš veľký, keďže chceme čo najväčšiu presnosť v tomto rozsahu.
- Presnosť a TEB (Total error band) dostať čo najlepšiu možnú hodnotu.
- Výstup senzoru aby bol analógový napäťový a v jednotkách voltoch (ideálne 0 - 3,3 V), keďže piny ADC na ESP32 DevKit V1 majú rozsah 0 - 3V3.
- Napájanie senzora buď 3V3 alebo 5 V.
- Teplotná kompenzácia v tom prípade nehrala až takú veľkú rolu, keďže je predpoklad, že počas merania sa teplota tekutiny nejak nemení.

Na základe týchto predom definovaných požiadaviek som na internetových obchodoch hľadal vhodné senzory pre túto aplikáciu. Vybral som dva vhodné senzory, ktoré v čo najvyššej miere splňovali požiadavky.

Oba senzory sú od spoločnosti Honeywell, typ SSCDANT005PGAA5 je z produktovej rady SSC series (Standard Accuracy Silicon Ceramic). Druhý typ HSCMRNT005PGAA5 je z produktovej rady HSC series (High Accuracy Silicon Ceramic).

Hlavnými rozdielmi medzi týmito dvoma produktovými radami je parameter Total error band (TEB), ktorý zahŕňa všetky možné zdroje chýb (vid'. Obrázok 22). Senzor z HSC série ma 1% Total error band, zatiaľ čo senzor série SSC má 2% Total error band. A taktiež púzdro senzoru, HSC séria je SMT (surface mount technology) a SSC séria je DIP (dual inline pins). [14]

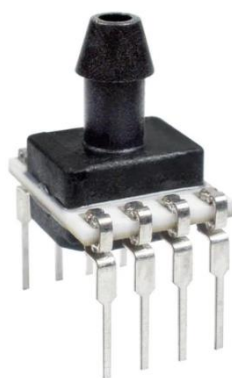


**Obrázok 22 Total error band (TEB) zahŕňa všetky možné zdroje chýb, ako offset, nelinearita, hysterzia, tepelný efekt [14]**

Čo sa týka ekonomického hľadiska tak senzor SSCDANT005PGAA5 zo série SSC je lacnejší ako HSCMRNT005PGAA5. Na základe tejto skutočnosti a tiež skutočnosti, že sa nejedná o SMT ale DIP, som sa rozhodol pre tento konkrétny senzor.

### 3.2.1 Tlakový senzor SSCDANT005PGAA5

Jedná sa o senzor série SSC, je to piezorezistívny senzor tlaku s analógovým výstupom na meranie tlaku v stanovenom rozsahu tlaku a rozsahu teplôt.



**Obrázok 23 Tlakový senzor SSCDANT005PGAA5 [14]**

Určený je na meranie relatívneho tlaku s rozsahom meraného tlaku udávaným výrobcom 0 - 5 PSI teda 0 až 0,345 baru. Taktiež senzor je vhodný na aplikáciu s tekutinami, konkrétne sa jedná o neiónové tekutiny. [14]

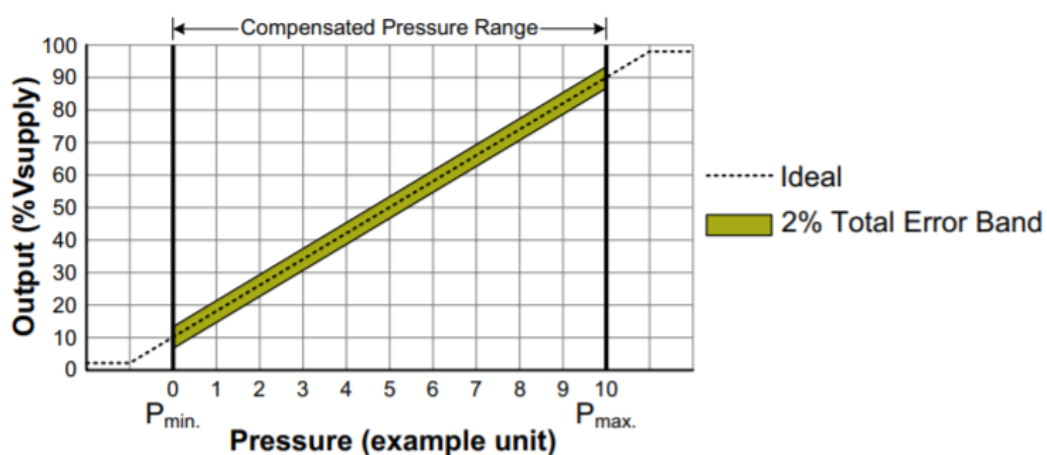
Senzor je plne kalibrovaný a teplotne kompenzovaný pre offset senzora, citlivosť, teplotné efekty a nelinearity pomocou integrovaného zákaznického obvodu (ASIC). Kalibrované výstupné hodnoty tlaku pre analógový napäťový výstup sú na približne 1 kHz. Teplotná kompenzácia senzoru je v rozsahu teplôt -20 °C až 85 °C.

Rozsah napájacieho napätia senzoru je od 4,75 V do 5,25 V. Analógový napäťový výstup senzoru je v rozsahu 0,5 V až 4,5 V.

Senzor je charakteristický extrémne nízkou spotrebou energie (menej ako 10 mW), teda znižuje požiadavky na napájanie systému a umožňuje predĺženie výdrži baterie, ak je ňou napájaný. [14]

**Tabuľka 1 Základné parametre senzora [14]**

Parameter	Hodnota
Druh tlaku	relatívny
Rozsah tlaku	0-5 psi
Max. tlak	30 psi
Presnosť	±0,25%
Total error band	2%
Napájanie (U)	4,75-5,25 V
Napájanie (I)	max. 3,5 mA
Druh výstupu	Analógový napäťový
Výstup (U)	0,5-4,5 V
Odozva	1 ms
Teplotný rozsah	-40 ~ 85 °C



$$\text{Output (V)} = \frac{0.8 \times V_{\text{supply}}}{P_{\text{max.}} - P_{\text{min.}}} \times (\text{Pressure}_{\text{applied}} - P_{\text{min.}}) + 0.10 \times V_{\text{supply}}$$

**Obrázok 24 Transformačná funkcia senzora [14]**

Na obrázku vyššie je vyobrazená transformačná funkcia senzoru, ako je vidieť v rozsahu 10 – 90% je TEB 2%.

Potencionálne možné aplikácie senzoru sú v priemysle a medicíne (napríklad anestéziologické prístroje, analyzátory krvi, plynová chromatografia, koncentrátory kyslíka, prístroje na spánkové apnoe, ventilátory, spirometre) [14].

### 3.3 Zapojenie meracieho systému

Základný prvok meracieho systému na monitorovanie tlaku v mikrofluidnom systéme je napájaný pomocou micro usb portu z počítača. Na ESP32 DevKit V1 je osadený stabilizátor napätia AMS1117 3.3, na jeho vstup je privedených pravé 5 V z micro usb a na výstupe je pevných 3,3 V na ktorých vývojový kit pracuje.

Komunikácia ESP32 DevKit V1 s počítačom je zabezpečená taktiež pomocou micro usb portu.

Napájanie samotného tlakového senzoru SSCDANT005PGAA5 je riešené cez vývojový kit a step up menič DC/DC, ktorý je osadený pomocou dutiniek na dosku plošných spojov. Ako je uvedené vyššie v popise senzoru, senzor je označovaný ako 5 V, konkrétne je to rozsah 4,75 - 5,25 V. ESP32 DevKit V1 ma ale iba výstup 3V3, ktorým sú bežne napájané senzory alebo iné periférie. To však nie je dostačujúce na napájanie nami zvoleného senzoru. Preto je napájanie senzoru riešene cez step up menič DC/DC, ktorý pri vstupnom napätí 1 - 5 V poskytuje na svojom výstupe napätie 5 V a maximálne 500 mA.



**Obrázok 25 Menič step UP DC/DC 1-5 V to 5 V 500 mA [15]**

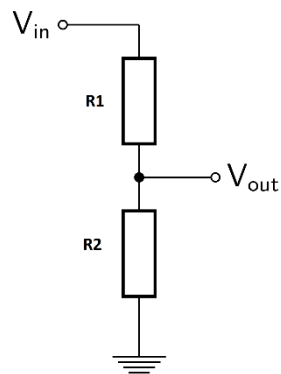
Výstupné analógové napätie z tlakového senzoru musí byť privedené na niektorý z ADC pinou (12-bit A/D prevodník) vývojového kitu ESP32 DevKit V1. Rozsah napätia na výstupe senzoru, ako je uvedené vyššie, je 0,5 - 4,5 V. Keďže všetky vstupné piny vývojového kitu, teda aj ADC, sú ohraničené maximálnym vstupným napätím

3V3, je potrebné medzi výstup senzoru a A/D prevodník vývojového kitu umiestniť delič napätia. Taktiež treba brať ohľad na to, že ADC nie je úplne lineárny teda pri 3,2 V a 3,3 V dostanem zhodnú hodnotu 4095. Z tohto dôvodu budeme rátať delič napätia na 3,2 V.

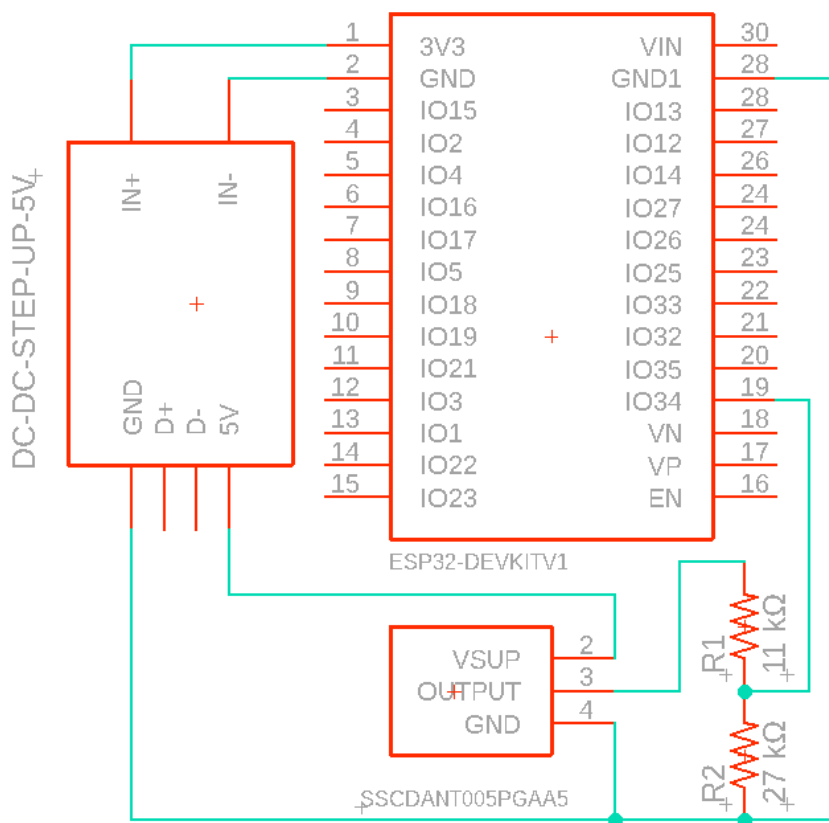
Hodnoty rezistorov deliča napätia boli vypočítané podľa vzťahu vychádzajúceho z Ohmova zákona

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

Kde  $V_{in}$  je vstupné napätia,  $V_{out}$  označuje výstupné napätia deliča a  $R_1$ ,  $R_2$  sú označenia rezistorov. V našom prípade teda  $V_{out}$  je hodnota 3,2 V, vstupné napätie  $V_{in}$  je 4,5 V. Vypočítané hodnoty rezistorov sú nasledovné, rezistor  $R_1$  11000 Ohmov a rezistor  $R_2$  27000 Ohmov.



**Obrázok 26** Delič napätia

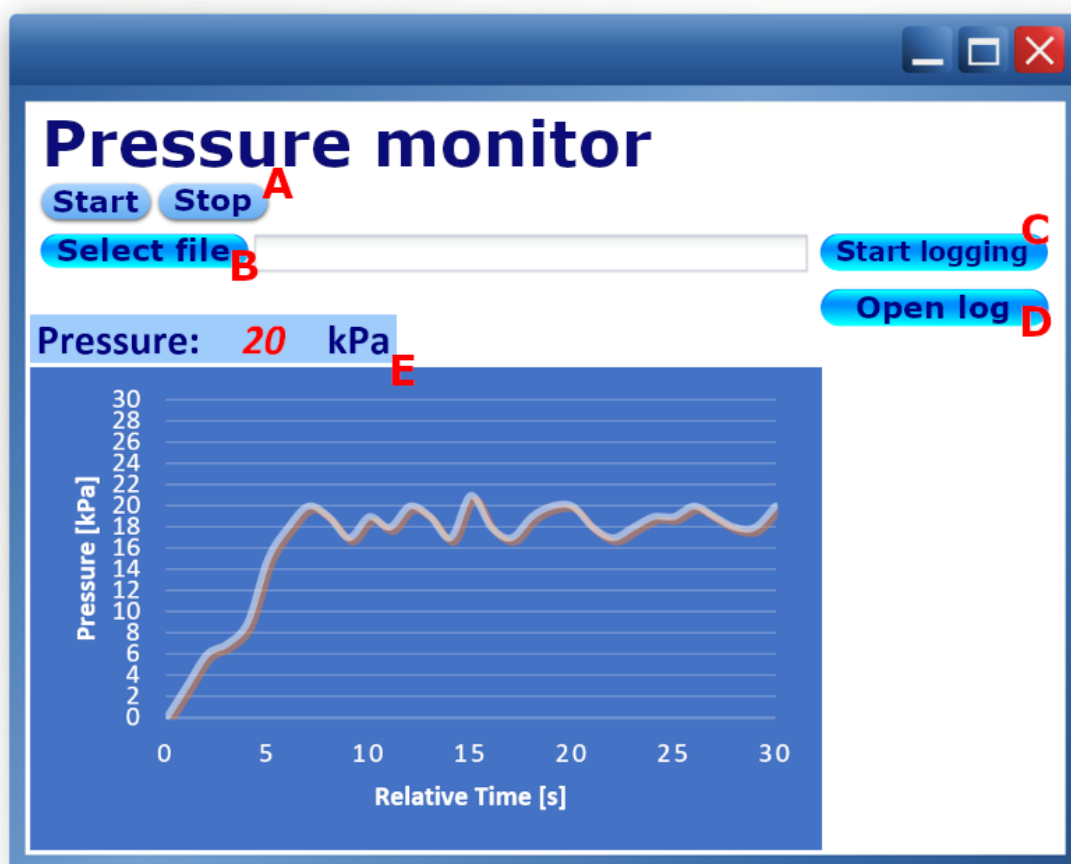


**Obrázok 27** Schéma zapojenia obvodu

### 3.4 Návrh softwarové riešenie

Hlavný program ktorý zaisti funkčnosť meracieho systému bude napísaný v programe ARDUINO IDE. Je potrebná konfigurácia tohto programu s ESP32 DevKit V1, keďže tento program je určený primárne pre vývojové dosky Arduino. Najprv sa v nastaveniach pridá URL požadovaného vývojového kitu, v našom prípade je to package\_esp32\_index. Následne v boards manager je možná inštalácia celého balička. Po tejto inštalácii je ESP32 DevKit V1 plne kompatibilné s programom ARDUINO IDE.

Následný záznam, ukladanie a zobrazovanie dát bude riešené v programovacom jazyku Python. Na nasledujúcom obrázku je návrh vizualizácie program (viď. Obrázok 28).



Obrázok 28 Návrh vizualizácie programu

Tlačidlami Start/Stop sa spúšťa/zastavuje samotné meranie (označené A). Voľba priečinku, kde sa bude daný log ukladať sa volí tlačidlom Select folder (označené B). Logovanie dát do priečinku zvoleného v prechádzajúcom bode je aktivované stlačením tlačidla Start logging (označené C). Prezeranie starších logov je možné po stlačení tlačidla Open log (označené D). Aktuálnu hodnotu tlaku, a taktiež aj grafický vývoj tlaku v čase je možné vidieť v spodnej časti (označené E).

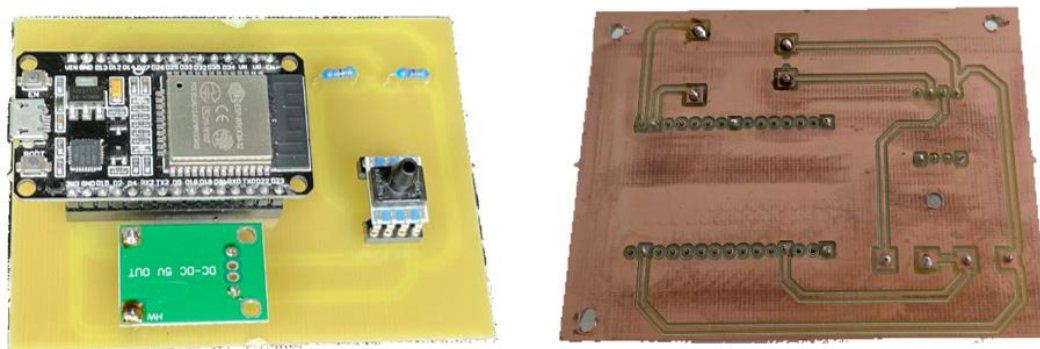


## 4. HARDWAROVÉ RIEŠENIE MERACIEHO SYSTÉMU

Prvotné zapojenia meracieho systému boli realizované na kontaktnom nepájivom poli. Po vyskúšaní a testovaní viacerých možných spôsobov zapojení meracieho systému sa zvolilo optimálne zapojenie, a prešlo sa k finálnemu návrhu dosky plošných spojov (DPS). Následne sa DPS osadila do konštrukčnej krabičky a mohol sa merací systém pripojiť k mikrofluidnému systému.

### 4.1 Doska plošných spojov (DPS)

Návrh dosky plošných spojov (ďalej iba DPS) na základe schémy zapojenia bol realizovaný v programe EAGLE. Následne navrhnutá DPS bola vyfrézovaná pomocou CNC frézky na kuprexidovú dosku. Prvá vyfrézovaná DPS nebola ideálna z dôvodu malých plôch na osadenie jednotlivých komponentov. Kvôli tomu bolo nutné upraviť DPS v programe EAGLE. Následne už bolo možné vyfrézovať DPS s väčšími plochami na osadenie jednotlivých komponentov. Na finálnu dosku neboli priamo osadené všetky komponenty, ale boli použité dutinky prípadne päťice. Tlakový senzor SSCDANT005PGAA5 bol osadený práve na päťicu z dôvodu, aby bolo možné v prípade potreby jednoduchšie vymeniť senzor. Podobným spôsobom cez dutinky bolo osadené ESP 32 Dev Kit V1. DPS je vyobrazená na obrázku nižšie (viď. Obrázok 29).



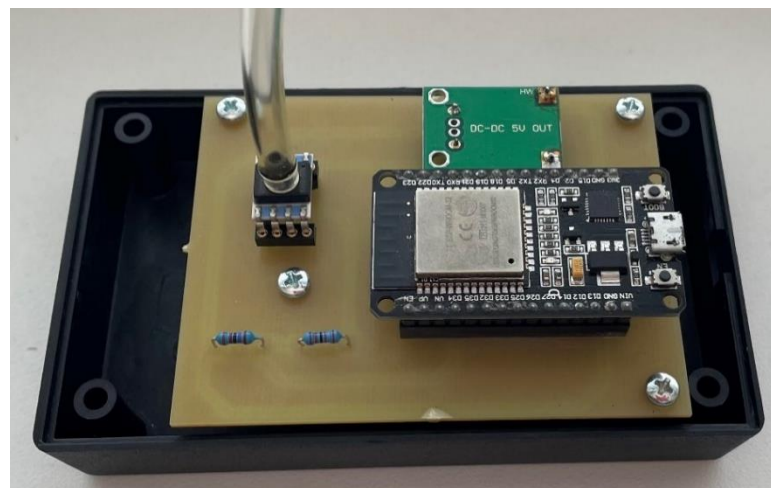
Obrázok 29 Doska plošných spojov (DPS)

## 4.2 Krabička plastová Z30A PS

Ako krycí obal na tento zostrojený merací systém bola zvolená konštrukčná krabička z GM Electronic. Krabička je plastová, dvojdielna spojená k sebe štyrmi skrutkami. Rozmery konštrukčnej krabičky sú 120 x 70 x 46 mm. DPS je v nej uchytená pomocou skrutiek do distančných stĺpikov, ktoré sú prilepené k spodnej časti krabičky. Do krabičky boli vyvrtané dva otvory. Jeden pre micro USB kábel, ktorý je potrebný na napájanie a prenos dát. Cez druhý otvor je vyvedená hadička z tlakového senzoru SSCDANT005PGAA5, ktorá je zaaretovaná práve vrchnou časťou krabičky, aby nedošlo k prípadnému odpojeniu tlakového senzora z päťice na DPS. Zostrojený merací systém je pripojený k mikrofluidnému systému cez rýchlospojku T-kus.



Obrázok 30 Krabička plastová Z30A PS černá [16]



Obrázok 31 DPS uchytená v konštrukčnej krabičke

### 4.3 Pripojenie k mikrofluidnému systému

Pripojenie meracieho systému k mikrofluidnému systému bolo realizované pomocou rýchlospojky T-kus. Konkrétne na tlakový senzor SSCDANT005PGAA5 je nasunutá polyuretánová hadička s vonkajším priemerom 6mm. Druhý koniec tejto hadičky je nasunutý do priechodky 6 mm/8 mm a následne do 8 mm T-kusu. Na ostatné dva vstupy T-kusu sú pripojené polyuretánové hadičky s vonkajším priemerom 8mm, do ktorých je nasunutá priechodka na 1,59 mm hadičky z mikrofluidného systému (viď. Obrázok 32).

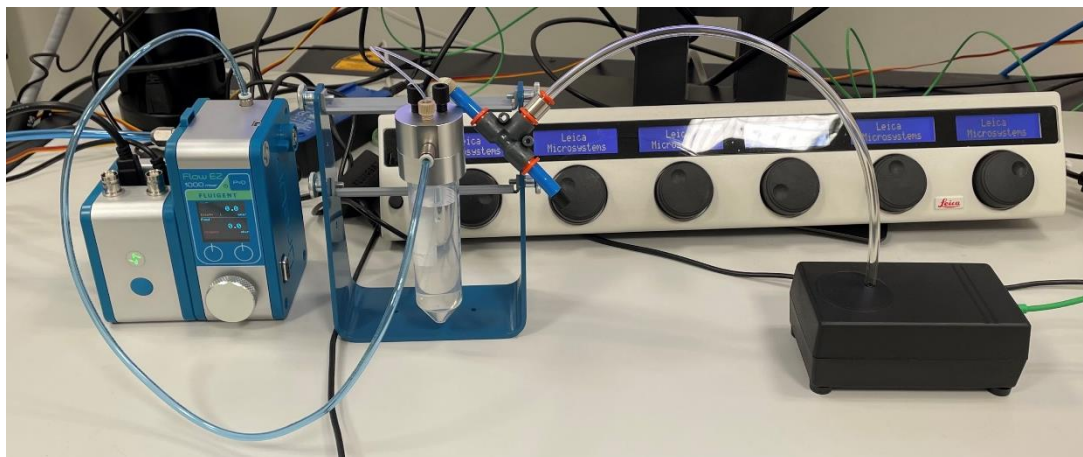


Obrázok 32 T-kus na pripojenie k mikrofluidnému systému



Obrázok 33 Zostrojený merací systém

Na obrázku nižšie (viď. Obrázok 34) je vyobrazené kompletne zapojenie celého systému, teda zostrojeného meracieho systému a mikrofluidného systému. Hlavnými komponentami sú kompresor, riadiaca jednotka, ktorá riadi tlak, rezervoár s médiom a zostrojený merací systém.



**Obrázok 34 Kompletné zapojenie systému**

Do riadiacej jednotky Flow EZ 1000 mbar je zapojený kompresor, ktorý zabezpečuje dostatočný tlak vzduchu. Riadiacu jednotku je možné nastaviť manuálne otočným potenciometrom na konkrétnu hodnotu tlaku, alebo je to možné realizovať cez software MAT v počítači. V softwary je možné nastavovať aj jednotlivé bloky s tlakovými impulzmi, tým sa diplomová práca zaoberá nižšie v kapitole o overení. Pomocou hadičky je napojená riadiaca jednotka do rezervoáru s médiom, v tomto prípade je to destilovaná voda. Pri aplikovaní tlaku vzduchu do rezervoáru, je médium v ňom vytlačané cez 1,59 mm hadičku smerom k T-kusu. Senzor meracieho systému je k T-kusu pripojený pomocou hadičky naplnenej destilovanou vodou. Tretí vstup T-kusu je určený na pripojenie k mikrofluidnému čipu, v tomto prípade bol tento vstup zaslepený čiernou záslepkou (viď. Obrázok 32, Obrázok 34).

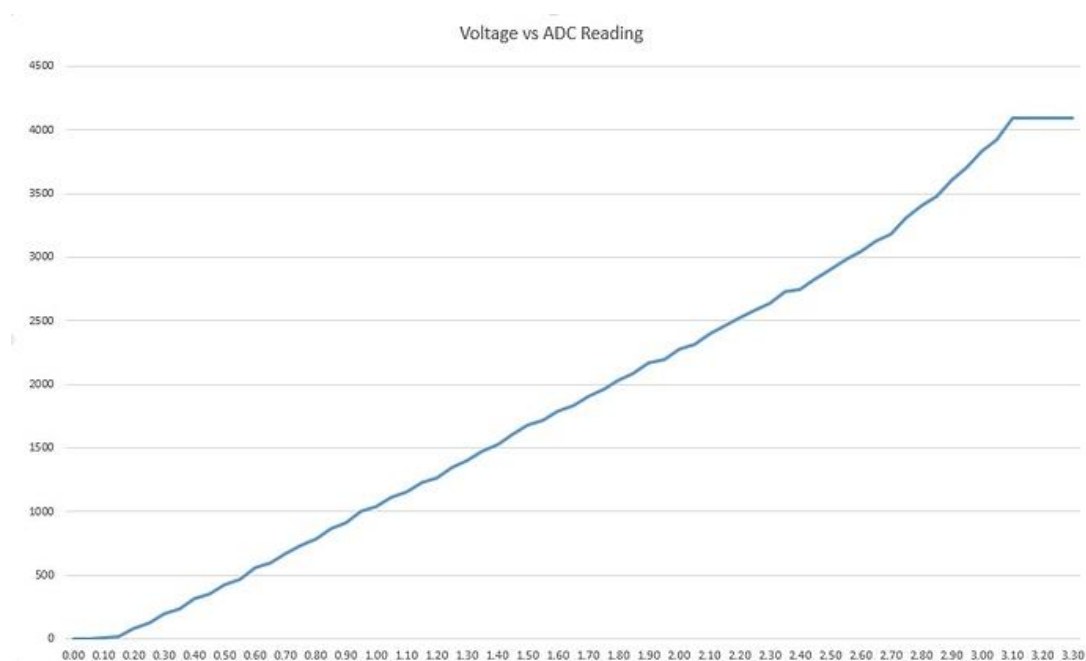
## 5. SOFTWAREVÉ RIEŠENIE MERACIEHO SYSTÉMU

Softwarové riešenie meracieho systému na monitorovanie tlaku v mikrofluidnom systéme je rozdelené do dvoch častí. Prvá časť je riešená v programe Arduino IDE a zabezpečuje sériovú komunikáciu medzi vývojovou doskou ESP32 Dev Kit V1 a počítačom. Druhá časť je riešená v programe Visual Studio Code v programovacom jazyku Python, tvorí počítačový program .exe zabezpečujúci čítanie, zobrazenie, zaznamenávanie a ukladanie dát.

### 5.1 Program Arduino IDE

Základ, ktorý zaisťuje funkčnosť meracieho systému je napísaný v programe ARDUINO IDE. Bola potrebná konfigurácia tohto programu s ESP32 DevKit V1, keďže tento program je určený primárne pre vývojové dosky Arduino.

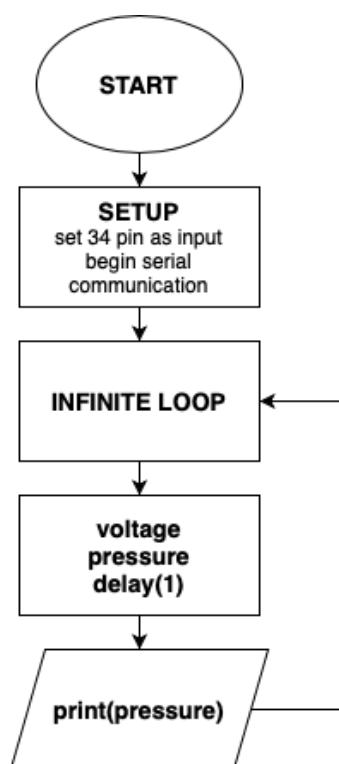
12-bitové A/D prevodníky na ESP32 Dev Kit V1 nemajú úplne lineárnu charakteristiku (viď. Obrázok 35), napr. pri hodnotách 3,2 V a 3,3 V je rovnaký výstup o hodnote 4095. To iste platí aj pre 0 V a 0,13 V, kde je na výstupe hodnota 0. Tento problém bol potlačený použitím knihovne ESP32AnalogRead.h.



Obrázok 35 ESP 32 - charakteristika 12-bit. A/D prevodníka [17]

Štruktúra programu sa skladá z dvoch častí presnejšie funkcii vid'. Obrázok 37. Funkcia `setup()` prebieha iba raz na začiatku pri spustení, slúži na nastavenie vstupného pinu 34 vývojového kitu ESP 32 DevKit V1. Ďalej otvorenie sériového portu a nastavenie prenosovej rýchlosti.

Kód vnútri funkcie `loop()` sa vykonáva v nekonečnej slučke. Do premennej *voltage* typu `float` sa ukladajú upravené hodnoty napätia. Je to z dôvodu, že na výstupe senzoru je 0,5 až 4,5 V, následne za deličom napätia sa to upravuje na 0 – 3,2 V. Týmto prepočtom sú získané pôvodné hodnoty pre deličom napätia. Do premennej *pressure* sa ukladajú hodnoty tlaku v jednotkách mbar. Tie sú vypočítavané z hodnôt napätia pomocou transformačnej funkcie z datasheetu senzoru vid'. Obrázok 24. Oneskorenie (`delay`) je nastavený na 1 ms. `Serial.println()` odosiela dáta na sériový port, v tomto prípade sú to hodnoty tlaku.



Obrázok 36 Blokové schéma - ARDUINO IDE

```

//funkcia - nastavenie pin a seriova komunikacia
void setup()
{
  adc.attach(34);
  Serial.begin(115200);
}

//funkcia - nekonecna slucka, vypočet napatia a tlaku
void loop()
{
  float voltage=(adc.readVoltage()*(27000+11000))/27000;
  float pressure=((345*(float (voltage)-0.5))/4);
  delay(1);
  Serial.println(pressure);
}

```

**Obrázok 37 Ukážka kódu - ARDUINO IDE**

Kontrola funkčnosti prebehla v programe Arduino IDE použitím nástroja monitor sériového portu.

Skript napísaný v programe Arduino IDE je priložený v prílohách k práci.

## 5.2 Počítačový program .exe

Kód pre počítačový program bol realizovaný v programe Visual Studio Code. Najprv bolo potrebné nainštalovať rozšírenie, ktoré umožní prácu v jazyku Python.

Prvým krokom bolo importovanie potrebných knižníc. Knižnica tkinter umožnila vytvoriť okennú aplikáciu so základnými grafickými prvkami ako sú tlačidlá, popisy a rámčeky. Knižnica matplotlib bola importovaná z dôvodu potreby použitia real-time vykresľovania hodnôt tlaku. Medzi ďalšie importované knižnice patri napríklad numpy, csv, serial.

Následne sa pristúpilo k deklarácii všetkých potrebných premenných. Program obsahuje funkcie na čítanie, zobrazenie, zaznamenanie a ukladanie dát.

Základom je funkcia Draw(), ktorá zabezpečuje vykreslenie hlavného okna vrátane všetkých tlačidiel, labelov, framerov. Na konci volá funkciu DrawGraph(), ktorá zabezpečuje vytvorenie grafu. Táto funkcia na konci volá funkciu RefreshGraph(), ktorá ho vykresľuje. Dôležitou funkciou je funkcia Refresher(), ktorá to aktualizuje každých 10 milisekúnd.

Každé vytvorené tlačidlo má priradenú funkciu, prípadne niektoré na konci v danej funkcii volajú funkciu iného tlačidla. Príkladom takýchto funkcií tlačidiel sú funkcie

StartReading(), EndReading(), ResetReading(), SelectFolder(), StartLogging(), StopLogging(), ConnectESP(), OpenLogs() a pod.

Po spustení funkcie ConnectESP() je otvorený sériový port. Následne po spustení funkcie StartReading() funkcia readFast() z premennej currentVal prevádza dáta (výstup z ESP32 DevKit V1) do premennej floutik typu float. Pri zapisovaní do logu je potrebné premennú floutik previesť na string. Log je vo formáte .txt a dáta v ňom vo formáte čas, hodnota tlaku (str(floutik)) a jednotka mbar.

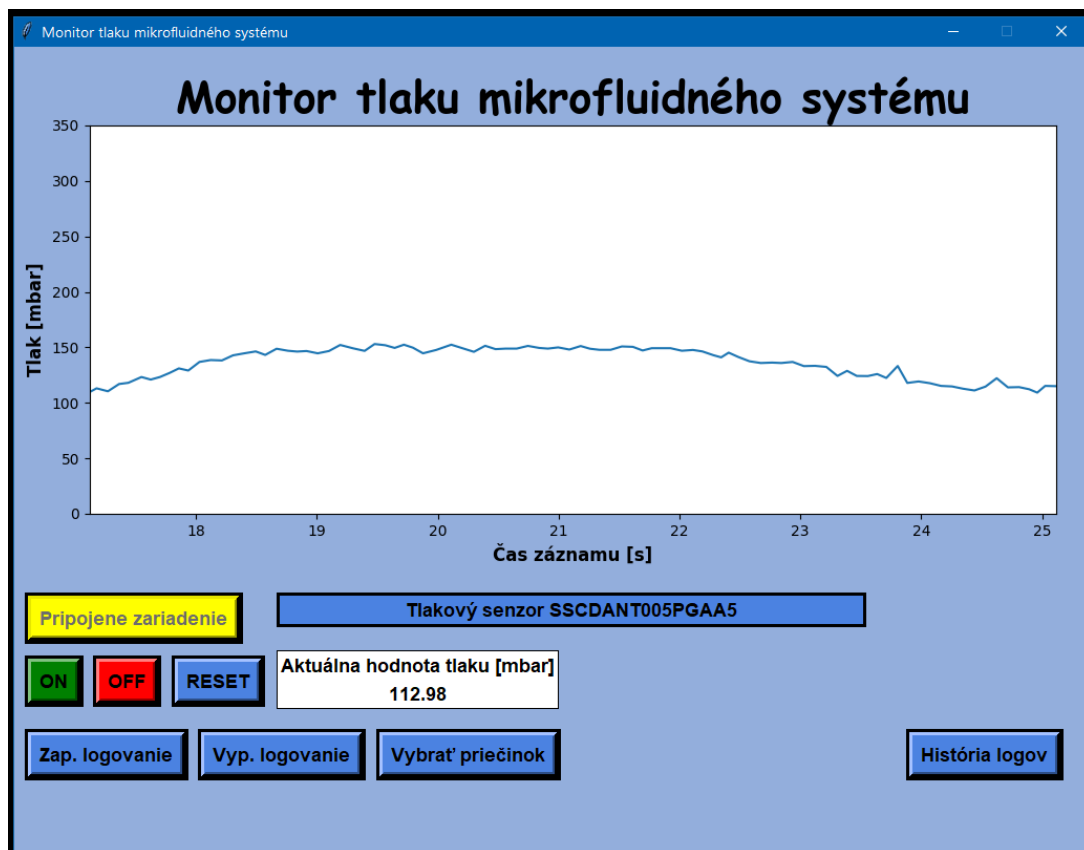
Kompletný kód napísaný v Pythone aj s popisom je priložený v prílohách k práci.

Po kompletnej realizácii kódu sa pristúpilo ku konvertovaniu pythone kódu na .exe počítačový program. K tomu bola potrebná inštalácia knižnice pyinstaller a následne v príkazovom riadku príkazom *pyinstaller --onefile -w -i 'iconname' 'filename.py'* prebehla konverzia na .exe program. Výsledný program je vyobrazený na obrázku nižšie (vid'. Obrázok 38). Z dôvodu veľkosti .exe súboru ho nebolo možné priložiť ako prílohu k práci a preto bol nahratý na GitHub. Odkaz na jeho stiahnutie je v poznámkovom bloku v prílohe k práci.

Ako je vidieť na ukážke, v hornej časti okna je real-time graf. Na os y sa vynášajú hodnoty tlaku, os ma rozsah od 0 do 350 mbar, tak ako je rozsah tlakového senzora SSCDANT005PGAA5. Os x je časová os v jednotkách sekúnd. Aktuálnu hodnotu tlaku v čase je možné odčítať aj z displeja označeného ako „Aktuálna hodnota tlaku [mbar]“.

Princíp programu aj s funkciami jednotlivých tlačidiel je podrobne popísaný v nasledujúcej podkapitole.

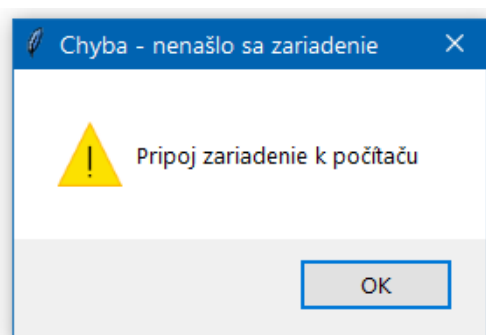




Obrázok 38 Ukážka realizovaného .exe programu

### 5.3 Princíp fungovania .exe programu

Prvým krokom po spustení programu je pripojenie zariadenia, ak je zariadenie už pripojené k počítaču je možné kliknúť na tlačidlo ‚Pripojenie zariadenia‘. Po stlačení tlačidla sa zmení jeho status na ‚Pripojené zariadenie‘. V prípade, že zariadenie nie je pripojené a je stlačené tlačidlo ‚Pripojenie zariadenia‘ sa zobrazí chybová hláška vid’. Obrázok 39.

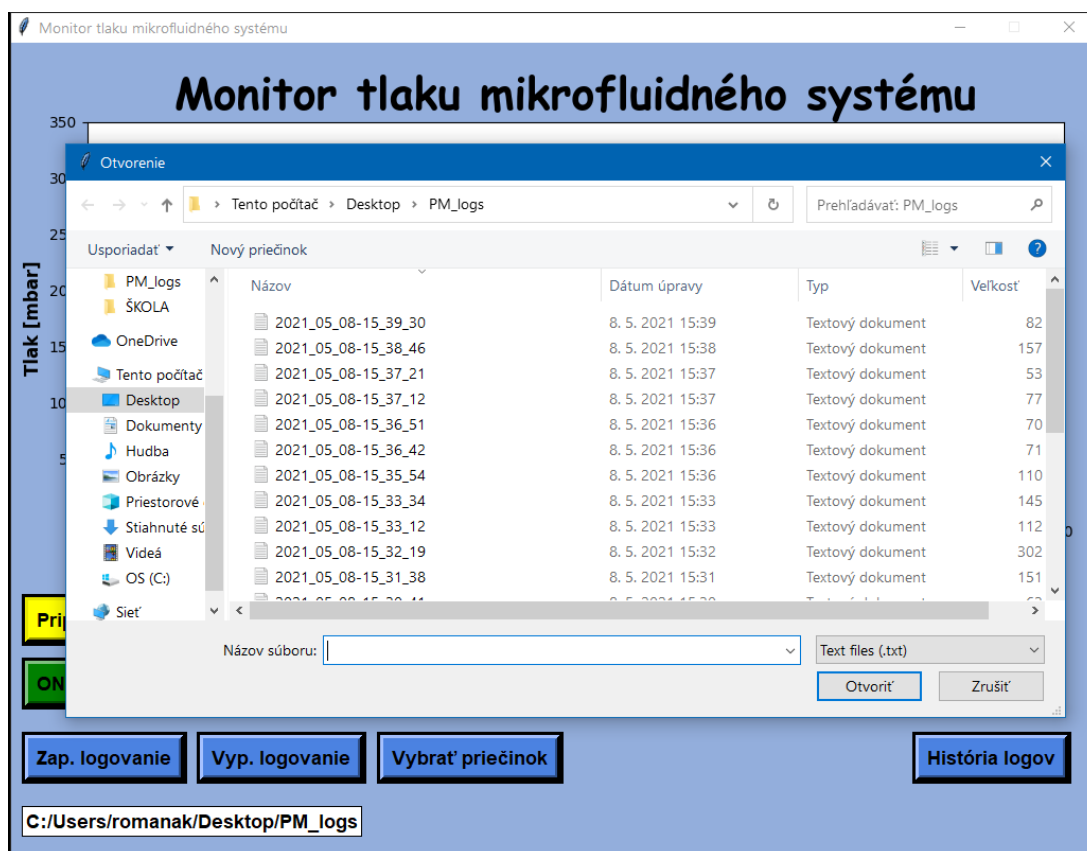


Obrázok 39 Ukážka - chybová hláška - nepripojené zariadenie

Po úspešnom pripojení zariadenia je potrebné zapnúť čítanie dát tlačidlom „ON“. Po stlačení je možné vidieť priebeh aktuálnej hodnoty tlaku na grafe aj displeji. Tlačidlá „OFF“ a „RESET“ slúžia na vypnutie čítania dát prípadne reset. Čítanie dát je podmienené pripojením zariadenia, teda je to taktiež ošetrené chybovou hláškou podobne ako pri pripojení zariadenia.

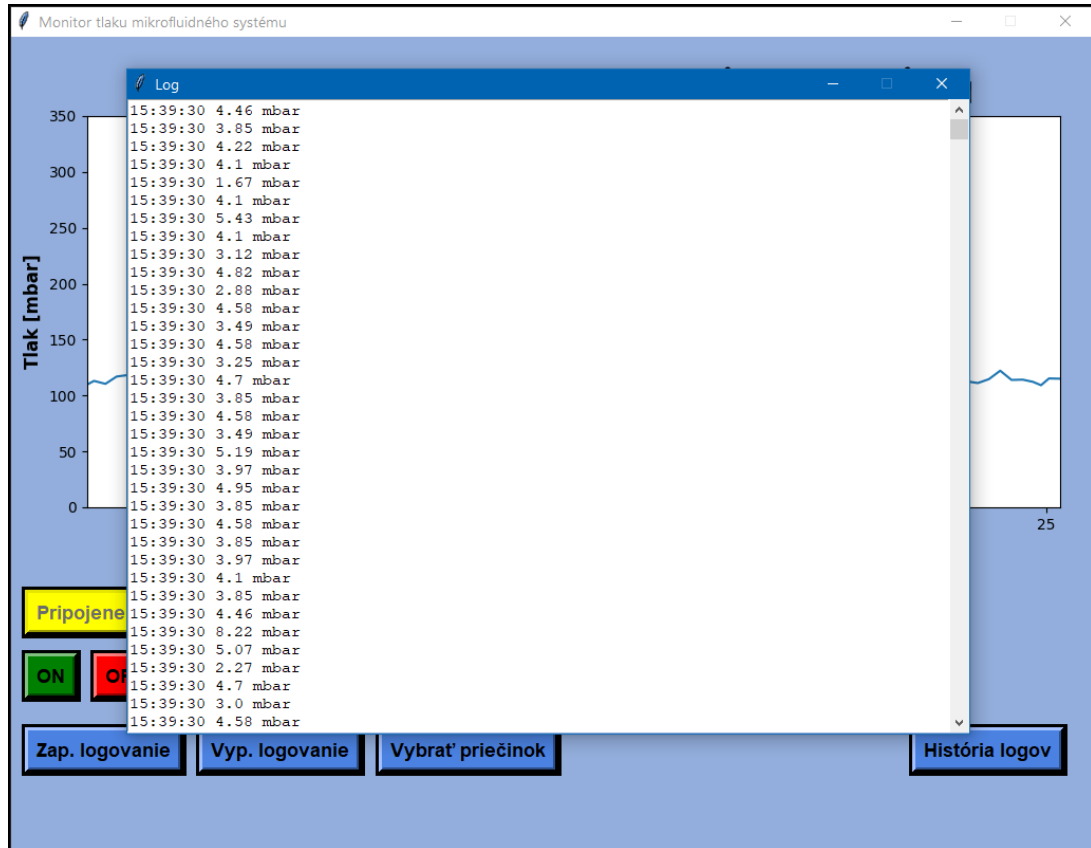
Zaznamenávanie, respektíve logovanie dát zabezpečuje uchovávanie 1000 hodnôt behom každej sekundy teda 1 hodnota = 1 ms (1 kHz). Prvým krokom je výber priečinka, kde sa budú dane dáta ukladať (tlačidlo „Vybrať priečinok“). Cesta k priečinku je vyobrazená pod tlačidlami na logovanie dát. Až po jeho zvolení je možné zapnúť samotné logovanie dát (tlačidlo „Zap. logovanie“). Prípadne následne vypnúť logovanie dát (tlačidlo „Vyp. logovanie“).

Tlačidlo „História logov“ slúži na prezeranie už zaznamenaných dát. Po stlačení sa zobrazí okno pre vyber daného logu vid'. Obrázok 40. Jednotlivé logy sú automaticky pomenúvané vo formáte rrrr-mm-dd\_hh-mm-ss.



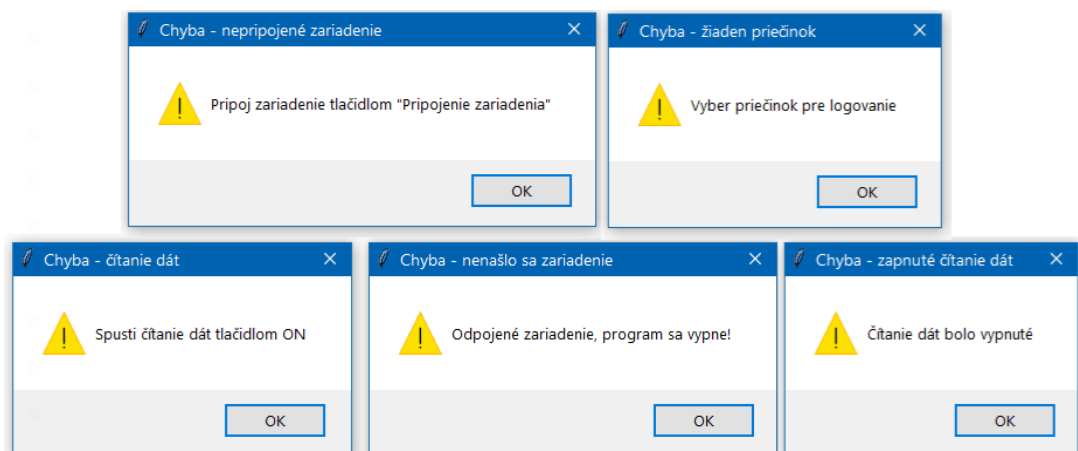
Obrázok 40 Ukážka .exe programu - výber logov

Po výbere logu sa zobrazí nové okno, kde sú dáta daného logu vid'. Obrázok 41. Logy majú formát typu čas (hh:mm:ss) a hodnota tlaku (mbar).



Obrázok 41 Ukážka .exe programu – log

Ako bolo spomenuté vyššie, jednotlivé kroky musia byť realizované v určitom logickom poradí, prípadné nesprávne postupy sú ošetrené chybovými hláškami. Na obrázku nižšie je možné vidieť práve tieto chybové hlášky.



Obrázok 42 Ukážka .exe programu - chybové hlášky

## 6. OVERENIE FUNKČNOSTI REALIZOVANÉHO MERACIEHO SYSTÉMU

Realizovaný, zostrojený merací systém bol pre overenie správnej funkčnosti pripojený k mikrofluidnému systému. Popis zapojenia celého systému je vyššie v diplomovej práci, v kapitole o hardwarovom riešení. Ako prvý krok k overeniu sa zvolilo overenie na troch referenčných bodoch. Na základe znalosti, že najčastejšie sa v mikrofluidnom systéme pracuje s tlakom 200 mbar, sa zvolili za referenčné body 100, 200 a 300 mbar. Následne druhým krokom sa v softvare určenom pre automatizované riadenie mikrofluidného systému MAT od spoločnosti FLUIGENT zostavili bloky s tlakovými impulzmi, ktoré simulovali zmeny tlaku v čase. Tieto kroky sú rozobrané nižšie v podkapitolách.

### 6.1 Overenie funkčnosti – 3 bodové overenie

Pri trojbodovom overení sa zvolili referenčné hodnoty tlaku 100, 200 a 300 mbar. Merací systém bol priamo napojený na výstup Flow EZ 1000 mbar, teda bez rezervoáru s médiom a T-kusu. Pre každú túto hodnotu sa manuálne na Flow EZ 1000 mbar nastavila požadovaná hodnota tlaku. Následne sa spustilo logovanie na zostrojenom meracom systéme. Logovali sa 3 - 4 sekundové záznamy. Následne sa z každého záznamu vybrala oblasť jednej sekundy, teda 1000 hodnôt. Z týchto hodnôt sa vypočítal priemer, smerodajná odchýlka a SNR. Následne aj MSE.

**Tabuľka 2 Údaje z merania**

Referenčná hodnota [mbar]	Zobrazovaná hodnota Flow EZ 1000mbar	Monitor tlaku (zostrojený)						MSE
		Priemer	Min	Max	SNR	Rozptyl	Smerodajná odchýlka	
100	100,200	104,927	99,220	118,280	46,968	4,991	2,234	27,330
200	199,800	206,102	199,440	216,800	63,111	10,665	3,266	50,380
300	300,100	309,073	299,950	324,110	69,922	19,539	4,420	100,060

V tabuľke vyššie sú uvedené jednotlivé vypočítané hodnoty. Priemery jednotlivých záznamov sú 104,927 mbar; 206,102 mbar a 309,073 mbar.

Aj z toho je možné vidieť, že zostrojený merací systém nadhodnocuje hodnoty tlaku, je tam teda offset. A to aj napriek tomu, že je použitý kalibrovaný tlakový senzor

a použitá transformačná funkcia z datasheetu. K odstráneniu tejto skutočnosti by bolo treba upraviť transformačnú funkciu, ktorá by bola vhodná pre celý merací systém. Tento aditívny offset vyzerá že súvisí do istej miery na sile signálu, na lepšiu interpretáciu by bolo potrebné zaznamenávať na viacerých bodoch následne to vyniesť do grafu.

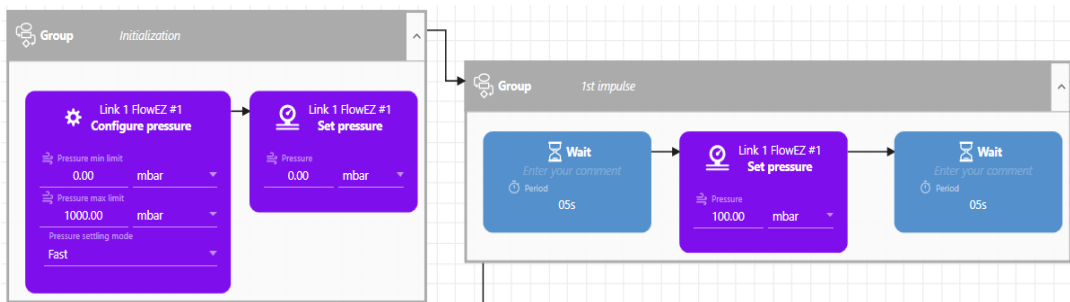
Čo sa týka rozptylu hodnôt, teda šumu, tak ten je spôsobený mechanikou prístroja, elektronikou v senzore, prepojením do počítača, interpretáciou výstupu v počítači a pod. Túto skutočnosť, teda biely šum, je možné potlačiť spracovaním signálu filtrom typu dolná priepusť. Napríklad priemerujúcim filtrom.

Smerodajne odchýlky vyšli 2,234, 3,266 a 4,420 a keď sa na presnosť pozeráme ako na mieru rozptylu hodnôt tak dostanem 1,4 – 2 % (smerodajná odchýlka podelená priemerom). Čo odpovedá udávanej celkovej chybe senzoru.

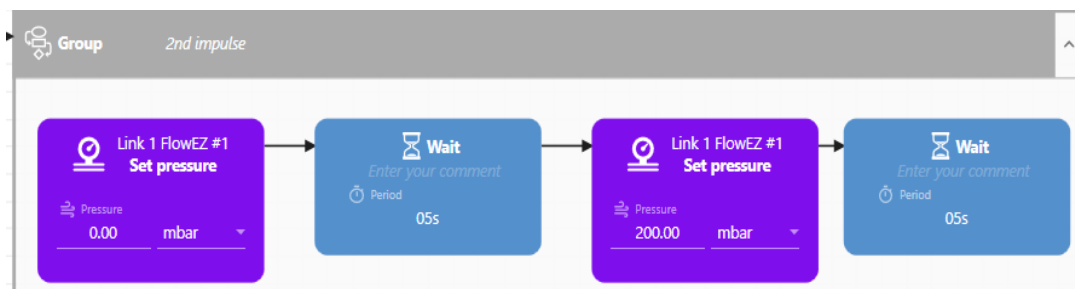
Stredná kvadratická chyba (MSE) vyšla pre 100, 200 a 300 mbar nasledovne: 27,330; 50,380 a 100,060.

## 6.2 Overenie na základe zmeny tlaku v čase

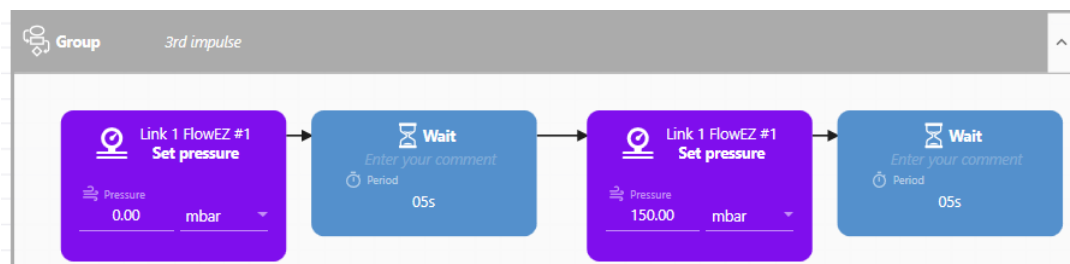
V softwary MAT pre mikrofluidné systémy od spoločnosti FLUIGENT boli nadefinované bloky s tlakovými impulzmi. Išlo o päť tlakových impulzov s amplitúdou 100, 200, 150, 250 a 300 mbar. Prestávky medzi impulzmi aj samotné impulzy mali dĺžku trvania nastavenú na 5 sekúnd. Na obrázkoch nižšie sú zobrazené nastavené bloky v softwary MAT. Frekvencia zápisu (logovania) zo softwaru MAT je 20 vzorkov za sekundu, frekvencia logovania mnou zostrojeného meracieho systému je nastavená na 1000 vzorkov za sekundu, teda 1 kHz. Výstup zo zostrojeného meracieho systému vo formáte .txt bol importovaný do Excelu a zosynchronizovaný s výstupom zo softwaru MAT. Následne boli vytvorené grafy v programe Excel. Os x v grafoch bola zvolená v milisekundovej mierke.



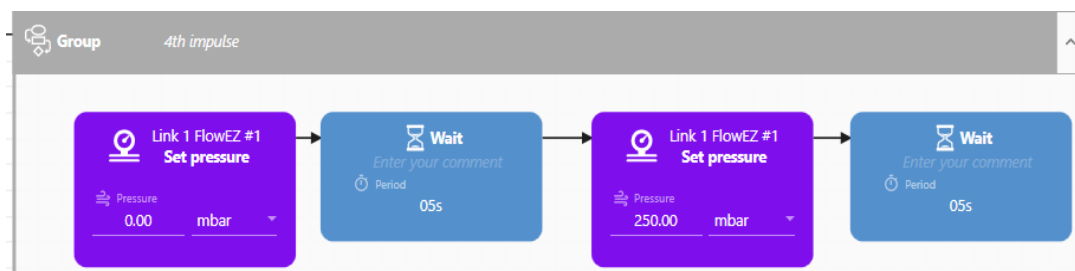
Obrázok 43 Inicializácia a prvý tlakový impulz



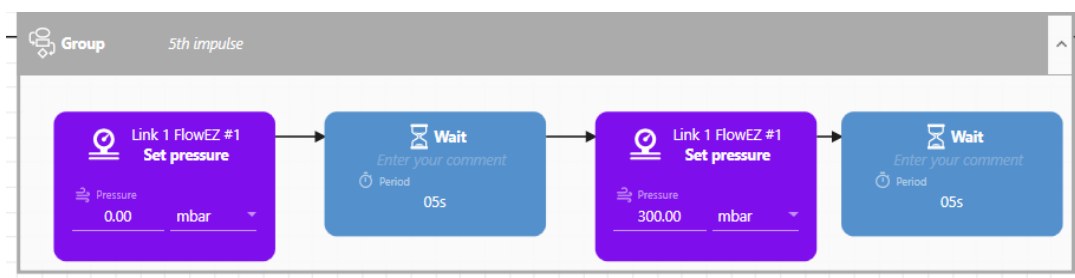
Obrázok 44 Druhý tlakový impulz



Obrázok 45 Tretí tlakový impulz

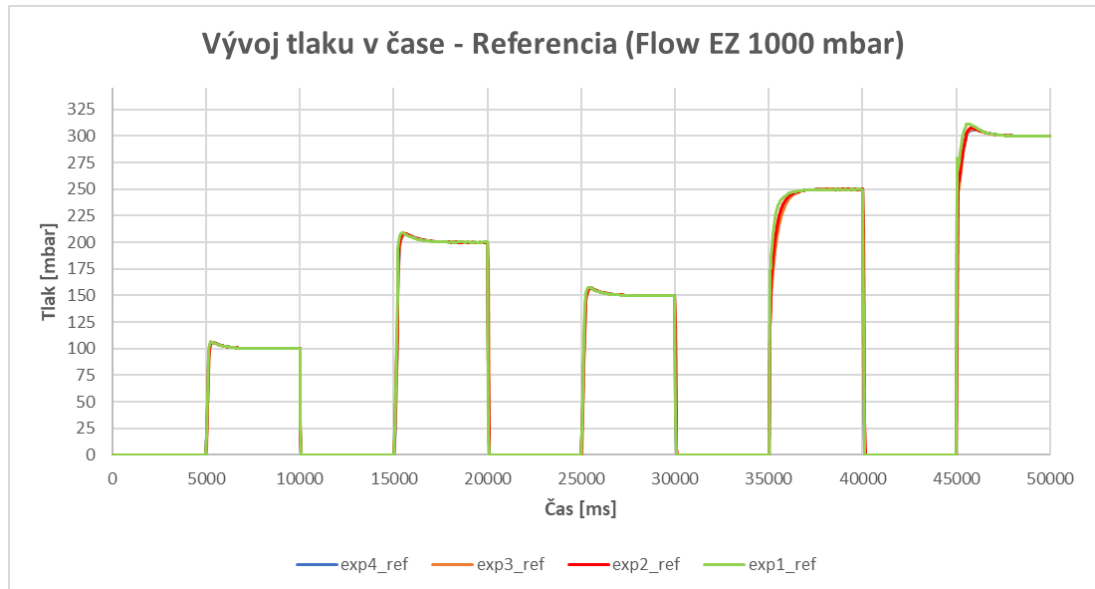


Obrázok 46 Štvrtý tlakový impulz



Obrázok 47 Piaty tlakový impulz

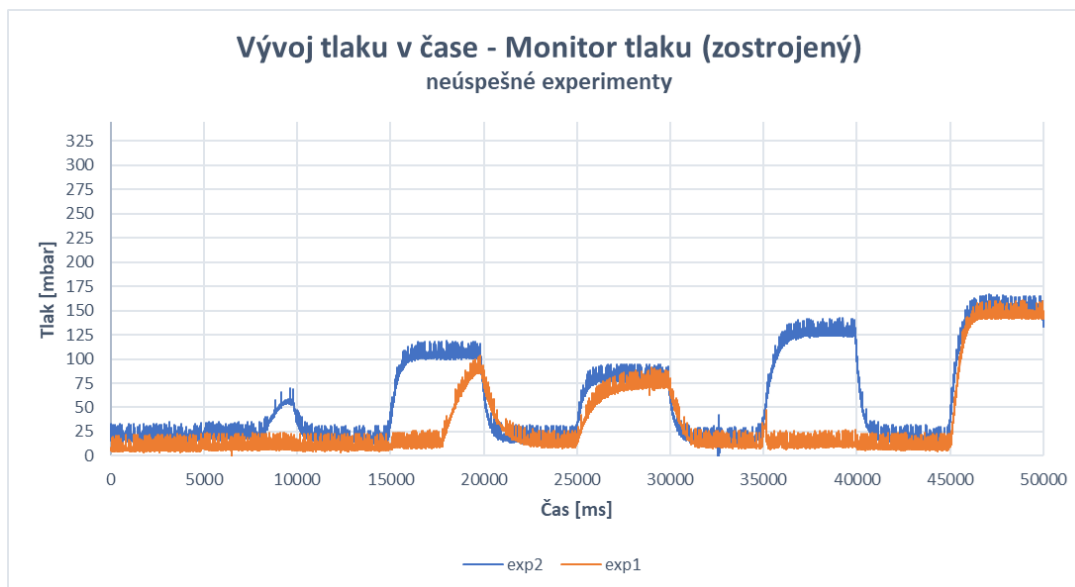
Celkovo sa realizovali štyri merania, nastavené impulzy sa medzi meraniami neupravovali. Na grafe nižšie je možné vidieť priebehy všetkých štyroch výstupov z Flow EZ 1000 mbar, dáta boli exportované zo softwaru MAT.



**Obrázok 48 Graf - Vývoj tlaku v čase (Flow EZ)**

Ako je možné si všimnúť na grafe vid'. Obrázok 48 sú priebehy všetkých štyroch výstupov zhodné.

To však neplatí u výstupov zo zostrojeného meracieho systému. Prvé dva merania nemožno považovať za úspešne z dôvodu toho, že na T-kuse došlo k uniku média z dôvodu netesnosti. Je to zrejme na grafe nižšie, kde sú vynesené priebehy prvého a druhého merania označené ako exp1 a exp2. Dôvodom toho, že tieto netesnosti T-kusu sa prejavili iba na výstupe zostrojeného meracieho systému je to, že referenčný Flow EZ 1000 mbar meria tlak hneď na svojom výstupe, zatiaľ čo zostrojený merací systém ho meria až na konci zostavy.



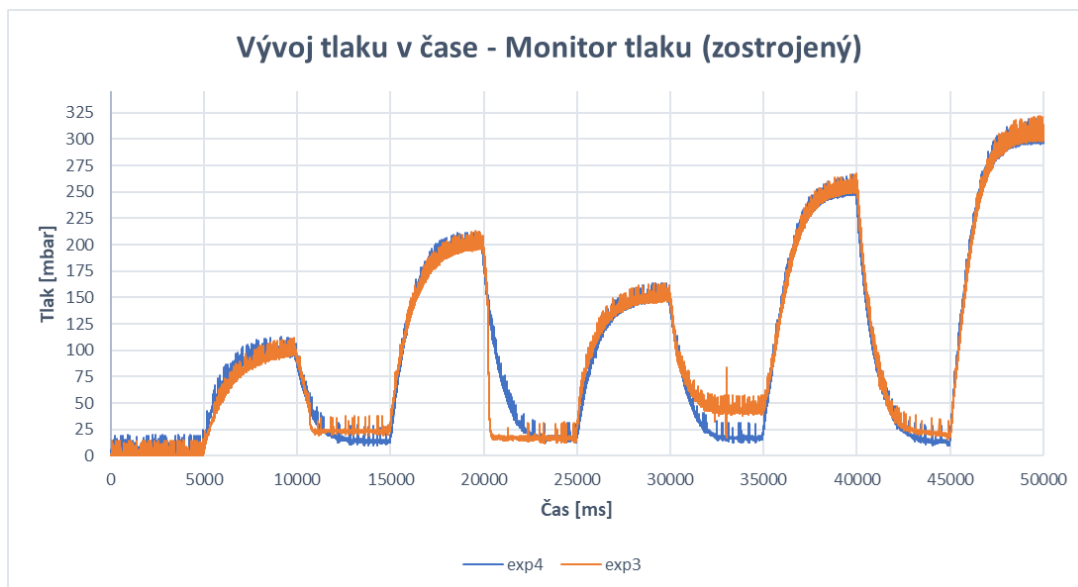
**Obrázok 49 Graf - Vývoj tlaku v čase - Monitor tlaku - neúspešné experimenty**

Na grafe vid'. Obrázok 49 je vidieť, že v prvom meraní (exp1) je možné identifikovať iba tri z piatich impulzov. A taktiež, že viditeľné impulzy nedosahujú nastavených amplitúd tlaku.

Pred meraním číslo dva (exp2) došlo k pretesneniu ale nie dostatočnému, počas merania bola taktiež zaznamenaná netesnosť a únik média. Ako je vidieť na grafe, tak sú zaznamenané všetky impulzy ale nedosahujú požadované nastavené amplitúdy tlaku.

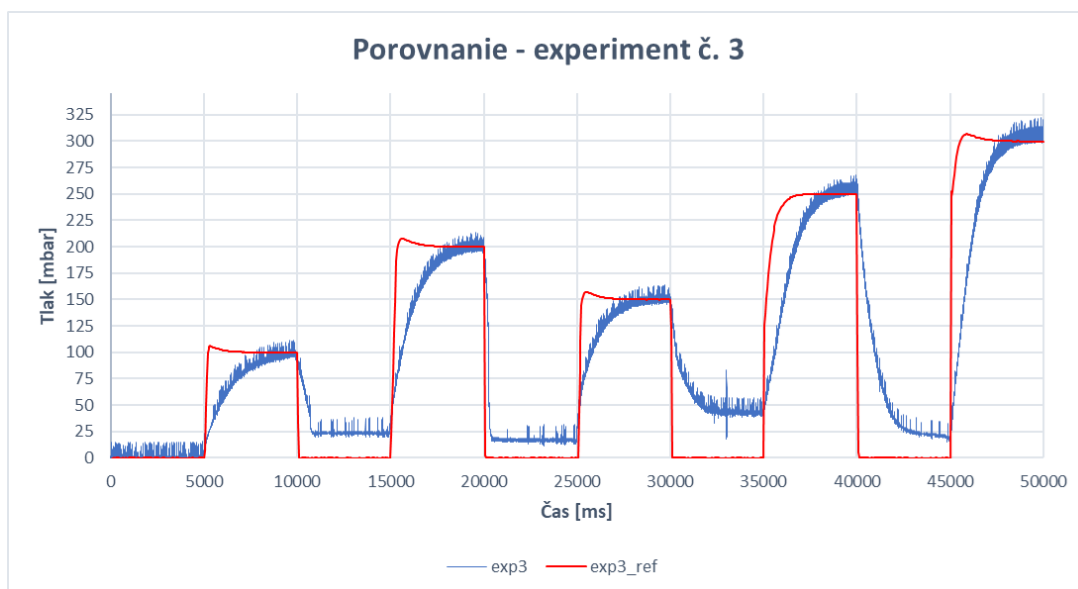
Merania číslo tri a štyri boli už úspešné, pri týchto meraniach nedošlo k žiadnej netesnosti v systéme a úniku média. Taktiež boli dosiahnuté pri oboch týchto meraniach nastavené amplitúdy tlaku pri všetkých impulzoch. Merania sú vyobrazené na grafe nižšie (exp3 a exp4) vid'. Obrázok 50.





**Obrázok 50 Graf - Vývoj tlaku v čase - Monitor tlaku**

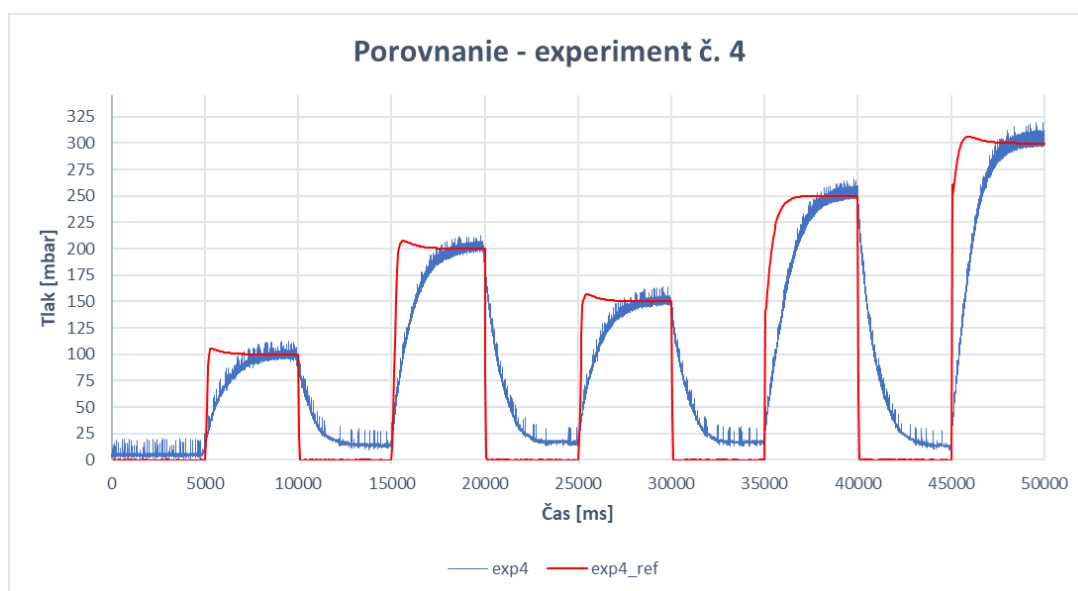
Obidve tieto merania (exp3 a exp4) boli vynesené aj do samostatných grafov s porovnaním s referenčnými krivkami týchto meraní zo softwaru MAT.



**Obrázok 51 Graf - porovnanie merania číslo 3**

Pri porovnaní tretieho merania (exp3) na grafe je možné pozorovať prvých 5 sekúnd záznamu hodnoty tlaku oscilujúce okolo 0 mbar, pri červenej referenčnej krivke je to 0 mbar s takmer žiadnou osciláciou. Pri jednotlivých impulzoch je vidno, že červená

krivka (exp\_ref) vykazuje takmer instantnú zmenu každých 5 sekúnd, zatiaľ čo modrá krivka (exp3) vykazuje graduálnu zmenu. Toto časové oneskorenie je spôsobené tým, že tlakové senzory nie sú umiestnené na jednom mieste. Tlakový senzor zostrojeného meracieho systému je umiestnený až na konci celého systému. Zatiaľ čo tlakový senzor referenčný je zabudovaný v riadiacej jednotke FLOW EZ 1000 mbar, ktorá je ešte pred rezervoárom s médiom. Ďalšiu vec, ktorú si je možné z grafu všimnúť je zvýšená amplitúda modrej krivky (exp3) po skončení prvého impulzu. Je to spôsobené tým, že v systéme ostal nejaký zvyškový tlak, teda nebol tam tlak rovný atmosférickému pri ktorom by senzor zaznamenal nulový tlak. Táto skutočnosť sa opakuje aj po skončení ostatných impulzov.



**Obrázok 52 Graf - porovnanie merania číslo 4**

Meranie číslo štyri bolo druhé úspešne meranie. Pri tomto meraní si je možné na grafe všimnúť, že prvých 5 sekúnd je amplitúda modrej krivky (exp4) v porovnaní s tretím meraním o niečo vyššia. Osciluje v intervale 0,04 až 20,32 mbar s priemernou hodnotou 4,91. Spôsobené to môže byť tým, že medzi tretím a štvrtým meraním sa nerozobral celý systém a teda nejaký zvyškový tlak tam ostal a taktiež, že zostrojený merací systém v určitej miere nadhodnocuje hodnotu tlaku. Rovnako ako pri tretom meraní tak aj tu po skončení jednotlivých impulzov ostáva zvyškový tlak v systéme. A taktiež je tu badať instantnú zmenu červenej krivky (exp4\_ref) zatiaľ čo modrá (exp4)

vykazuje graduálnu zmenu. Túto skutočnosť by šlo potlačiť, keby boli oba senzory umiestnené v tesnej blízkosti, a prípadne by sa doba impulzov a pauzy medzi nimi zvýšila.

## 7. DISKUSIA

Zo získaných výstupov merania zo zostrojeného meracieho systému na meranie tlaku v mikrofluidnom systéme je možné konštatovať, že navrhnutý a zostrojený merací systém je schopný merať tlak v mikrofluidnom systéme s určitou presnosťou určenou výrobcom senzoru.

Zistené nedostatky ako je offset a rozptyl dát, by bolo možné potlačiť. Offset dát je možné odstrániť kalibráciou celého meracieho systému, keďže plne kalibrovaný je iba tlakový senzor SSCDANT005PGAA5. Bolo by žiaduce zobrať do úvahy aj step-up menič, ktorý nemal na výstupe úplne presné napätie 5 V. Bol ale zvolený prístup použitia originálnej transformačnej funkcie z datasheetu senzora a teda následne odôvodnenie tohto offsetu. Čo sa týka šumu, ten by bolo možné potlačiť filtráciou filtrom typu dolná priepusť napríklad priemerujúci filter. Tento šum z istej miery ovplyvňuje taktiež aj step-up menič, ktorý nemá konštanté napätie.

Časové oneskorenie pri pulzoch, ktoré sa prejavilo pri overovaní meracieho systému vid'. Obrázok 51 Obrázok 52 bolo spôsobene tým, že tlakové senzory neboli umiestnené tesne pri sebe. Ideálne riešenie by bolo, aby boli na tom istom mieste v systéme. V inom prípade zostrojený merací systém pripojení priamo k zdroju tlaku reagoval na tlakové impulzy takmer instantne.

Na základe skúsenosti z merania, by som už zvolil zapojenie tlakového senzoru mimo krabičku mikrokontrolera. V mojom prípade, bolo nutne riešiť pripojenie cez rýchlospojky, T-kus a redukcie. A taktiež bolo treba pracne a opatrne napustiť hadičku spájajúcu tlakový senzor a T-kus destilovanou vodou. Použitie zapojenia senzora mimo krabičku by prinieslo určité výhody. Tlakový senzor aj s hadičkami mikrofluidného systému by stačilo osadiť do presnej komôrky vytlačenej na 3D tlačiarňi.

S výberom tlakové senzoru prevláda spokojnosť, tlakový senzor vyššej rady by nepriniesol nijak drasticky lepšiu presnosť keďže rozdiel medzi nimi bol 1% TEB.

Za vyskúšanie by stalo použitie kvalitnejšieho a drahšieho step-up meniča. Pripadne použitie externého napájania cez 5 V adaptér. To by bolo ale za cenu ďalšieho kábla, ktorý by bolo treba k meraciemu systému pripojiť. Aj o tejto možnosti som behom návrhu rozmýšľal.

Čo sa týka softwarovej časti práce, tak realizovaný .exe program pracoval bez najmenších problémov. Za zmienku by stálo to, že logovanie bolo nastavené na 1000 vzorkov za sekundu, podľa požiadaviek. Nevýhodu vidím v tom, že pri dlhých záznamoch je veľkosť jednotlivých záznamov meraní dosť veľká.

## 8. ZÁVĚR

Témou tejto diplomovej práce bol Monitor tlaku pre mikrofluidné systémy.

Prvou časťou sú teoretické východiska práce, ktoré sa zaoberajú podstatou tejto práce a to mikrofluidkou a meraním tlaku v takomto systéme. V tejto časti je popísaná mechanika kvapalín s fyzikálnymi zákonmi, ktoré sa k nej vzťahujú. Spôsoby merania tlaku, rozdelenie jednotlivých tlakových senzorov a špecifikácie tlakových senzorov. Taktiež sa tam nachádza ukázkové riešenie mikrofluidného systému a popis tlakového senzora od spoločnosti ELVEFLOW.

Nasleduje návrh meracieho systému ktorý pokrýva hardwarové riešenie vrátane výberu vhodného tlakového senzora. V návrhu softwarového riešenia je vizualizácia programu pre zobrazovanie, zaznamenávanie a ukladanie dát.

V praktickej časti diplomovej práce sa pristúpilo k realizácii navrhnutého meracieho systému. V hardwarovej realizácii bolo potrebné vyfrézovať dosku plošných spojov a osadiť jednotlivé komponenty meracieho systému. Následne osadiť DPS do konštrukčnej krabičky a vyriešiť pripojenie k mikrofluidnému systému. Softwarová časť obsahovala realizáciu programu pre ESP32 DevKit V1 a taktiež .exe program pre zobrazovanie, zaznamenávanie a ukladanie dát.

V následnej diskusii je sú okomentované jednotlivé výsledky z overenia funkčnosti zostrojeného meracieho systému.

V budúcnosti by bolo možné rozšíriť navrhnutý merací systém o batériu, OLED displej a SD kartu pre využitie aj bez počítača, teda v offline režime.

# Literatúra

- [1] ELVEFLOW: an ELVESYS brand [online]. © 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.elveflow.com>
- [2] TARN, M.D. a N. PAMME. Microfluidics. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering [online]. Elsevier, 2014, 2014 [cit. 2021-5-2]. ISBN 9780124095472. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409547-2.05351-8
- [3] LIU, Kuo-Kang, Ren-Guei WU, Yun-Ju CHUANG, Hwa Seng KHOO, Shih-Hao HUANG a Fan-Gang TSENG. Microfluidic Systems for Biosensing. Sensors [online]. 2010, 10(7), 6623-6661 [cit. 2021-5-2]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s100706623
- [4] Pressure Sensors: The Design Engineer's Guide: Types of pressure sensors: A comprehensive overview. AVNET [online]. ©2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/types/>
- [5] Common Types of Pressure Sensors. Thomasnet [online]. Thomas Publishing Company, 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/pressure-sensors/>
- [6] Thin and thick film: What are thin and thick film resistors? EE POWER [online]. EETech Media [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-materials/thin-and-thick-film/#>
- [7] Piezoresistive pressure sensor. KISTLER [online]. Czech Republic: Kistler Group, ©2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/glossary/term/piezoresistive-pressure-sensor/>
- [8] Pressure Sensor vs Transducer vs Transmitter. TE connectivity [online]. © 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.te.com/global-en/products/sensors/pressure-sensors/pressure-transducers/pressure-sensor-vs-transducer-vs-transmitter.html>
- [9] TEB – Total Error Band. SensorsONE: Measurement Instrumentation Products [online]. © 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.sensorsone.com/total-error-band/>
- [10] Understanding the difference between absolute, gage and differential pressure. In: <https://blog.first-sensor.com/en/select-pressure-sensors/>. First Sensor, 2019.
- [11] NEČAS, Tomáš. Alternativní učebnice pro gymnázia - Mechanika [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/lvbeb/>. Disertační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Jana Musilová.
- [12] KÚDELČÍK, J., HOCKICKO, P. Základy fyziky. Žilina : EDIS, 2011. 272 s., ISBN 978-80-554-0341-0

- [13] DOIT ESP32 DEVKIT V1. Arduino-shop.cz: VELKOOBCHOD, MALOOBCHOD S ARDUINEM [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/docs/produkty/0/719/pinout.pdf>
- [14] TruStability® Board Mount Pressure Sensors [online]. In: . Honeywell International, © 2014 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/187/honeywell-sensing-trustability-ssc-series-standard-740340.pdf>
- [15] Měníč step UP DC/DC 1-5V to 5V 500mA. ISP shop [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: [http://www.ispshop.cz/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=606](http://www.ispshop.cz/index.php?main_page=product_info&products_id=606)
- [16] Krabička plastová Z30A PS černá (KP21). GM electronic [online]. GM electronic, spol., 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/krabicka-plastova-kp21-z-30a>
- [17] ESP32 ADC with Arduino IDE – Measuring voltage example. Microcontrollerslab [online]. © 2013 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://microcontrollerslab.com/adc-esp32-measuring-voltage-example/>
- [18] MPS Microfluidic High Precision Pressure Sensor. Darwin microfluidics [online]. France: Darwin Microfluidics, © 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://darwin-microfluidics.com/products/microfluidic-high-precision-pressure-sensor?variant=36842219521>
- [19] Getting Started with the ESP32 Development Board. In: Random Nerd Tutorials [online]. 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/>