

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav přístrojové a řídicí techniky



Bakalářská práce

Návrh senzorů pro měření a vyhodnocování dat z raketového  
standu

2020

Bartoloměj Sviták

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sviták** Jméno: **Bartoloměj** Osobní číslo: **466646**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh senzorů pro měření a vyhodnocování dat z raketového standu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of sensors for measurement and evaluation of data from rocket stand**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s veličinami měřenými na standu
2. Seznamte se s typy možných senzorů
3. Na základě technických parametrů vyberte nejvhodnější senzory
4. Navrhněte zařízení pro sběr a vyhodnocení dat

Seznam doporučené literatury:

1. NOVÁK, Martin: Technická měření. 1. vydání. České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-8-001-06388-0; 8001063887.
2. FRADEN, Jacob: Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. Fifth edition. Cham: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-19302-1.
3. STORK, David G. a Elad YOM-TOV: Computer manual in MATLAB to accompany Pattern classification. 2nd. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 978-0-471-42977-7; 0471429775.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Lubomír Musálek, odbor elektrotechniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Lubomír Musálek  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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 (autorský zákon).

V Praze dne 23. 8. 2020

.....

podpis

# Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Lubomíru Musálkovi za ochotu, rady, poznámky, vedení práce a trpělivost. Také bych rád poděkoval všem, kteří mě při psaní práce podporovali.

# Anotace

Autor:	Bartoloměj Sviták
Název BP:	Návrh senzorů pro měření a vyhodnocování dat z raketového standu
Rozsah práce:	46 stran, 27 obrázků
Akademický rok:	2019/2020
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí BP:	Ing. Lubomír Musálek
Využití:	Výběr senzorů pro měřicí stand a jeho návrh.
Klíčová slova:	Senzory, tlak, síla, Arduino, senzorický systém, automatizace
Anotace:	Tato práce se zabývá možnostmi snímání tlaku a síly pro využití při testování modelů raket. Hledá vhodnou kombinaci senzorů k měření na standu. Dále nachází řídicí systém pro tento senzorický systém a software pro příjem a základní zpracování dat. Na závěr je vytvořen prototyp a proběhne zkouška funkčnosti.

# Annotation

Author:	Bartoloměj Sviták
Title of bachelor`s thesis:	Design of sensors for measurement and evaluation of data from rocket stand
Extent:	46 pages, 27 pictures
Academic year:	2019/2020
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Instrumentation and Control Engineering
Supervisor:	Ing. Lubomír Musálek
Application:	Selection of sensors for measuring stand and its sketch
Key words:	Sensors, pressure, force, Arduino, Sensing system, automatization
Annotation:	This thesis deals with the possibilities of sensing pressure and force for use in rocket model testing. It looks for a suitable combination of sensors for measuring on a rocket stand. It suggests possible control system for this sensing system and software for receiving and basic data processing. Finally, a prototype is created and a functionality test is performed.

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Seznámení s veličinami měřenými na standu .....	10
2.1	Síla.....	10
2.2	Měření síly .....	11
2.2.1	Tenzometry .....	12
2.2.2	Umístění tenzometrů .....	15
2.3	Tlak.....	15
2.4	Měření tlaku .....	17
2.4.1	Umisťování snímačů tlaku .....	18
3	Typy senzorů k měření síly .....	19
3.1	Akcelerometry .....	19
3.2	Siloměry.....	19
3.3	Piezoelektrické senzory síly .....	20
3.4	Deformační členy .....	21
4	Typy senzorů k měření tlaku .....	22
4.1	Zvonový tlakoměr.....	22
4.2	U-trubicový manometr.....	23
4.3	Bourdonova trubice .....	24
4.4	Membránový tlakoměr.....	25
5	Zařízení pro řízení senzorů a sběr dat .....	26
5.1	Arduino.....	26
5.1.1	Arduino Uno .....	26
5.1.2	Arduino Mega .....	27
5.2	Raspberry Pi .....	27
6	Na základě technických parametrů vyberte nejvhodnější senzory .....	28
6.1	Parametry raketového motoru a testování .....	28
6.2	Výběr senzoru síly .....	29
6.3	Výběr senzoru tlaku .....	30



7	Návrh zařízení pro sběr a vyhodnocování dat.....	31
7.1	Hardware .....	31
7.2	Software.....	32
7.2.1	Arduino IDE .....	32
7.2.2	Základní struktura prostředí Arduino IDE .....	32
7.3	Zpracování měření.....	33
7.3.1	Arduino IDE - Ploter.....	33
7.3.2	Arduino IDE - Serial monitor.....	34
7.3.3	Processing.....	35
7.4	Sestavení zkušebního senzorického systému .....	36
8	Závěr.....	37
9	Seznam použité literatury.....	39
10	Seznam použitých obrázků .....	42
11	Přílohy .....	43
11.1	Program v Arduino IDE .....	43
11.2	Program v Processing .....	45



# 1 Úvod

Pro zdokonalování a optimalizaci motorů modelů raket je při testování nutné měřit některé veličiny. Jsou jimi síla, kterou je raketový motor schopen vytvářet, a tlak v trubici, která přivádí oksličovadlo. Model raketového motoru je při testování umístěn na tzv. standu a právě sensorickým systémem tohoto standu se zabývá tato bakalářská práce. Práce si dává za cíl navrhnout vhodný sensorický systém k měření potřebných veličin (tedy síly a tlaku), způsob sběru dat ze senzorů a následné základní zpracování do formy, se kterou bude možné dále pracovat. Podstatným požadavkem na navrhovaný testovací systém je jeho pohodlné ovládání prostřednictvím počítače, do něhož se také nahrávají data naměřená v průběhu testování. V práci se snažím navrhnout systém tak, aby byl celkový proces testování co nejefektivnější a nejsnazší, proto je součástí návrhu automatické řízení skupiny senzorů skrze mikroprocesor bez potřeby manuálního ovládání každého senzoru zvlášť. Při měření prováděném manuálně je třeba brát v potaz jejich časovou náročnost a nepřesnosti plynoucí z lidského faktoru. Sensorický systém navrhnutý v této práci umožňuje vícečetná testování zároveň a nevyžaduje dohled nad celým procesem měření. To odpovídá trendu v současnosti se objevujícímu v mnoha průmyslových odvětvích.

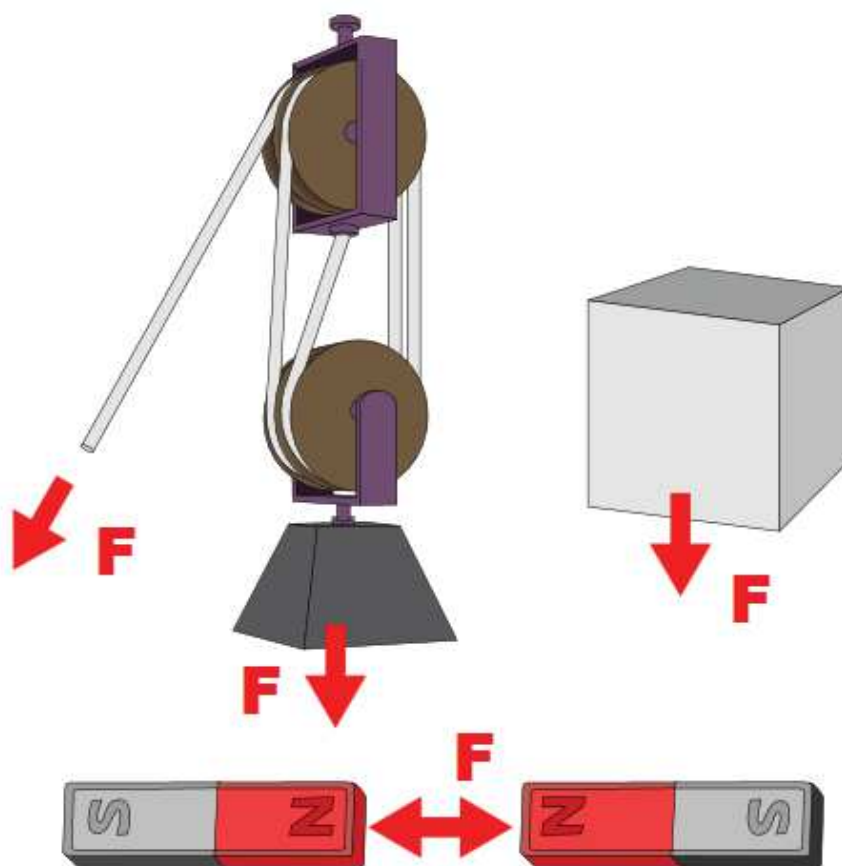
Jak lze zmiňované veličiny měřit? Který způsob je pro tento projekt nejvhodnější a proč? Jaká je z technologického a ekonomického hlediska nejlepší kombinace senzorů? Jaký mikrokontrolér bude schopen tyto data dostatečně rychle sbírat a zpracovávat? Jaké je nejfunkčnější softwarové a hardwarové řešení s ohledem na správné měření a snadné ovládání? V této bakalářské práci nacházím odpovědi právě na tyto otázky.

## 2 Seznámení s veličinami měřenými na standu

### 2.1 Síla

Jednou z veličin měřených na standu je síla. Definice síly vychází z toho, že může vyvolat zrychlení tělesa. Jednotka síly je tedy definována skrze zrychlení, které uděluje tělesu. [1,2]

Síla je schopná měnit pohybový stav tělesa. Pojetí fyzikální síly poprvé zavedl Newton v roce 1687 skrze své tři pohybové zákony.[1,2]



Obrázek 1: Příklady působení síly [18]

Máme-li těleso o hmotnosti jednoho kilogramu na dokonale hladkém povrchu a táhneme ho nebo jej tlačíme, tak ve chvíli, kdy naměříme zrychlení jeden metr za sekundu na druhou, tak na těleso působí síla velikosti právě jednoho newtonu (zkráceně N). [1,2]

## 2.2 Měření síly

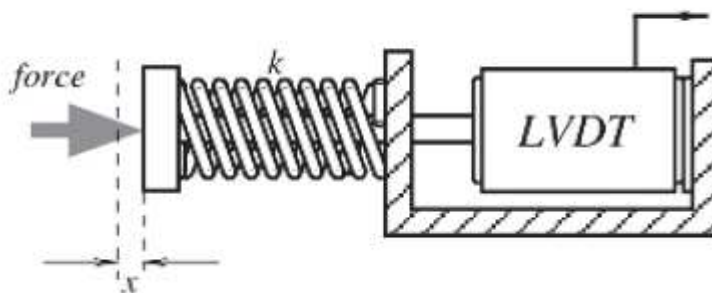
Pokud síla o velikosti  $F$  působí na těleso o hmotnosti  $m$ , těleso bude zrychlovat zrychlením  $a$ . [7]

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

Metod k měření síly existuje mnoho, daly by se rozdělit takto:

1. Vyvážení neznámé síly proti gravitační síle známé hmotnosti
2. Měřením zrychlení tělesa o známé hmotnosti, na které síla působí
3. Vyvážení neznámé síly proti elektromagneticky vyvinuté síle
4. Převedením síly na tlak tekutiny a měřením tohoto tlaku
5. Měřením napětí vytvořeného v pružném členu neznámou silou

Ve většině dnešních měření je využívána pátá metoda, občas se využívá také metoda třetí a čtvrtá. [5]



Obrázek 2: Komplexní senzor síly [5]

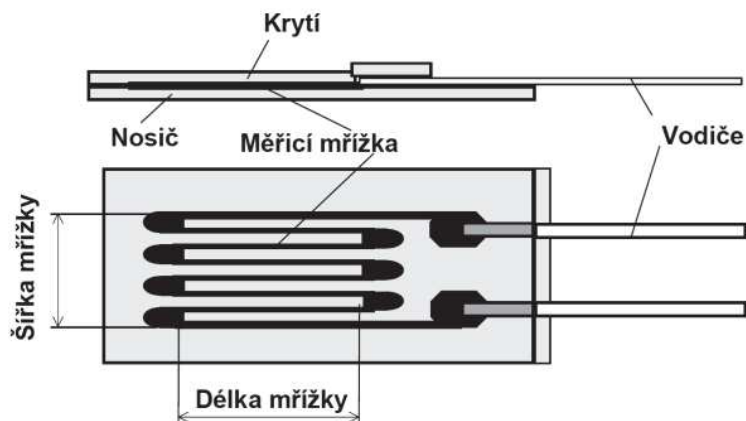
Síla většinou není přímo přeměněna na elektrický signál. Je zde třeba několika mezikroků, tím pádem je mnoho senzorů síly komplexními senzory. Například může být kombinací převodníku síly na posun a sensor polohy, kde převodník je prezentován jednoduchou pružinou, u které známe sílu z polohy a tuhosti

$$F = k \cdot x \quad (2.2)$$

Posun známe díky snímači polohy LVDT (lineární diferenciální transformátor).[5]

### 2.2.1 Tenzometry

Mezi dnes nejpoužívanější snímače síly patří různé senzorické systémy vybavené tenzometry. Ani u tenzometrů neměříme přímo sílu, ale měříme ji skrze deformaci vyvolanou působící silou. Elektrický odpor je totiž u tenzometrů závislý na rozměru tenzometru.



Obrázek 3: Struktura fóliového tenzometru [9]

Elektrický odpor se mění společně s materiálem, průřezem a délkou vodiče. Délka a průřez se při působení síly mění, a tím i odpor tenzometru.[3,5,7]

Pro vyhodnocování změn odporu, které jsou u tenzometrů malé, se využívá metoda zapojování do můstků, která signál “zesílí”.

Tenzometry dělíme na kovové a polovodičové.[3]

### 2.2.1.1 Kovové tenzometry

U kovových tenzometrů je rovnice závislosti elektrického odporu vyjádřena takto

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

( $\rho$  - rezistivita,  $l$  - délka vodiče,  $A$  - průřez)

K výrobě měřících mřížek se využívá tenký drátek nebo fólie. U obou je důležité použít materiál, který má nízký teplotní koeficient elektrického odporu. Tedy, že s teplotou se jeho elektrický odpor mění co nejméně. Pro tenzometry se často používá konstantan (slitina Cu 55% a Ni 45%).

Odpor neměříme přímo, ale měříme jeho změnu. U kovových se nejvíce projeví změny geometrie (průřez, délka).

U kovových tenzometrů je tedy závislost mezi poměrným prodloužením  $E$  a změnou elektrického odporu  $R$  rovna

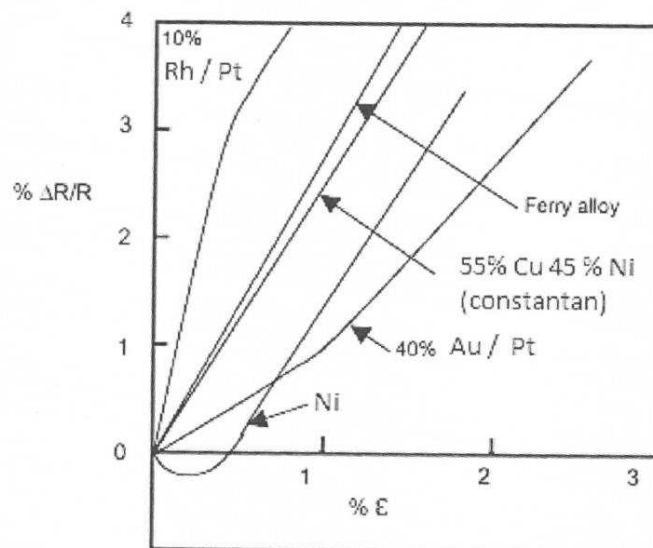
$$\frac{dR}{R} = K \cdot E \quad (2.4)$$

Konstanta  $K$  je deformační citlivost, která se liší u různých materiálů, u konstantanu je to přibližně  $K = 2$

Materiál	Deformační citlivost
Platina (Pt 100 %)	6,1
Platina - Iridium (Pt 95%, Ir 5 %)	5,1
Platina - Wolfram (Pt 92 %, W 8 %)	4,0
Isoelastic (Fe 55.5%, Ni 36% Cr 8%, Mn 0.5%)	3,6
Constantan / Advance / Copel (Ni 45%, Cu 55%)	2,1
Nichrome V (Ni 80%, Cr 20%)	2,1
Karma (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%)	2,0
Armour D (Fe 70%, Cr 20%, Al 10%)	2,0
Monel (Ni 67%, Cu 33%)	1,9
Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%)	0,47
Nikl (Ni 100 %)	-12,1

Obrázek 4: Deformační citlivosti materiálů [3]

Z deformačních citlivostí by se zdála platina jako ideální, ale má poměrně vysoký teplotní součinitel elektrického odporu. Nikl také působí jako vhodný materiál, ale bohužel u něj je změna elektrického odporu na poměrném prodloužení nelineární a to je podstatná nevýhoda.



Obrázek 5: Graf změny elektrického odporu na poměrném prodloužení [3]

Ideálně by měl být tenzometr citlivý na změny rozměru v jednom směru a ke změnám ve směru kolmém netečný. Pro měření napjatostí ve více osách se využívá kombinace více tenzometrů. [3,7,8]

### 2.2.1.2 Polovodičové tenzometry

Polovodičové tenzometry jsou vhodnější pro určité aplikace. Hodí se například k měřením, která jsou omezená prostorem. Naopak nejsou vhodné k měřením, kde se mění teplota, protože mají vysokou závislost na teplotě. Oproti kovovým až 75x.

Jejich deformační citlivost je ale mnohem vyšší než u kovových tenzometrů. Až 25x. Jsou také mnohem dražší než kovové. [3,8]

### 2.2.2 Umístění tenzometrů

Při umisťování tenzometrů je potřeba dávat pozor na mnoho faktorů. Tenzometry se lepí k měřenému tělesu pomocí speciálních lepidel. Je potřeba také zvolit vhodnou délku mřížky na základě požadavků aplikace a materiálu tělesa. Na nehomogenní materiál je například vhodnější delší mřížka, protože ta bude měřit průměr i přes nehomogenity.[3]

## 2.3 Tlak

Druhá z veličin, které na standu měříme je tlak. V kapalinách se z normálových sil bere v úvahu pouze tlak. Tlak v kapalinách definujeme tak, že vezmeme sílu  $F$  působící na plochu  $S$ , a spočítáme jejich podíl. Síla  $F$  je na ploše  $S$  rovnoměrně rozložená a působí kolmo na plochu. Základní jednotkou tlaku je pascal [1,11,12]

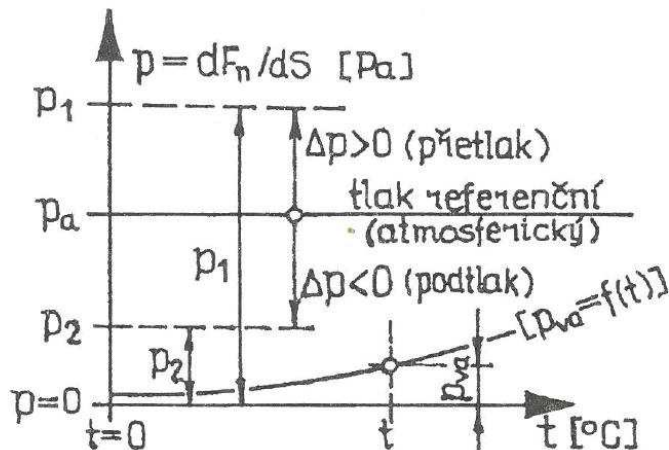
$$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{N}{m^2} \quad (2.5)$$

Občas se používají i jednotky atmosfér (přibližně 0,101MPa) nebo barů (přibližně 0,1 MPa). Tlak je skalární veličinou, nemá stanovený směr působení, přestože síla obsažená v rovnici směr má.

Pascalův zákon: Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalně těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný.

Tento tlak se nazývá hydrostatický a vzniká dvěma způsoby. V prvním případě jde o tíži nebo setrvačné síly, které působí na kapalinu, a v případě druhém se jedná o síly vnější, které na kapalinu působí většinou pomocí části stěny nádoby, ve které je kapalina umístěna.[1,11,12]

Tlak se dá měřit absolutně, vakuu náleží hodnota nulová a od ní stoupáme do kladných čísel. Praktičtější je koncept měření tlaku podle určitého referenčního tlaku. Nejčastěji se užívá tlak atmosférický.



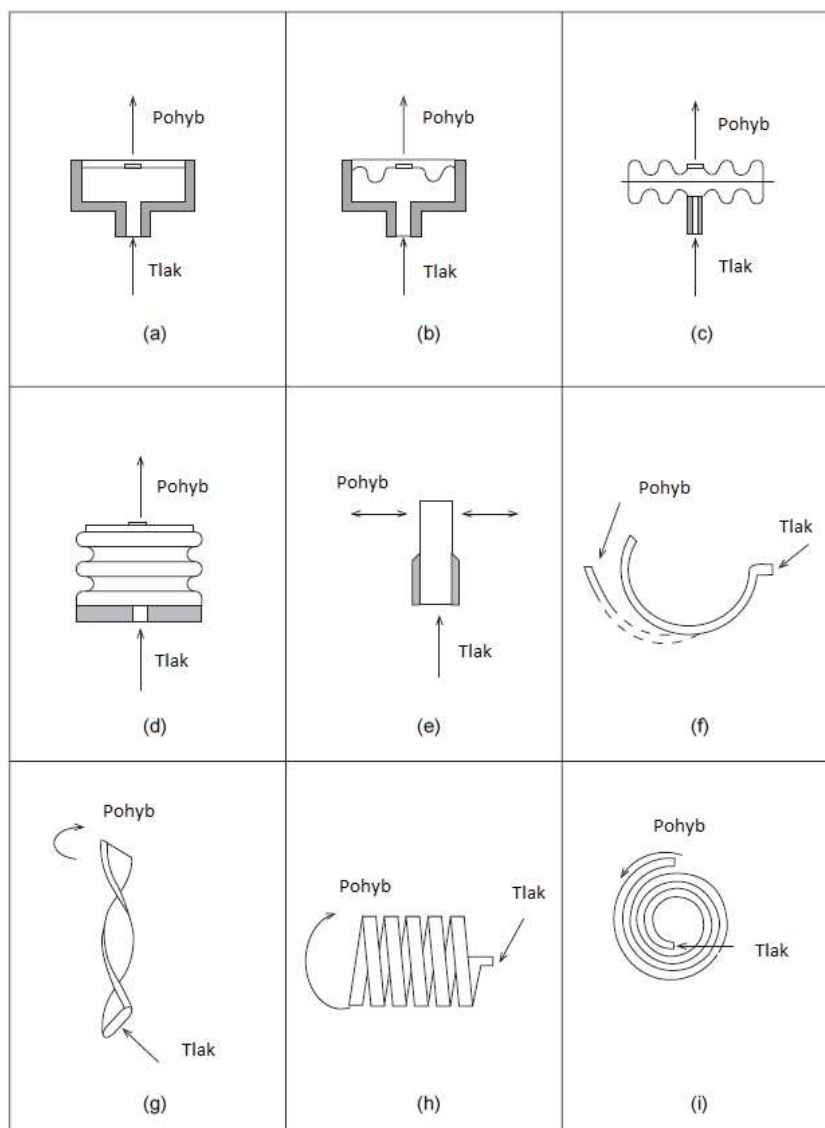
Obrázek 6: Graf znázorňující přetlak a podtlak [11]

Pokud je tlak nad tlakem atmosférickým, nazýváme ho přetlakem a pokud se jedná o tlak nižší, tak podtlakem. Nejnižším možným tlakem u kapalin je tlak nasycených par. Při přibližování k této hodnotě dochází k odpařování kapaliny. [1,11,12]



## 2.4 Měření tlaku

Princip fungování senzoru tlaku je založen na převodu tlaku vyvíjeného na citlivý prvek na elektrický signál. Prakticky ve všech případech tlak deformuje nebo přemísťuje prvek s definovanou plochou povrchu. Měření tlaku tak může být proměněno na měření posunutí nebo síly, která je výsledkem posunutí. Základní požadavky na prvek snímající tlak je potřeba izolovat od sebe dva tlaky tekutin, měřeného a referenčního, a obsahovat pružnou část, která je schopná převést tlakový rozdíl na deformaci snímacího prvku. Dnes se používá mnoho typů snímačů tlaku. Daly by se shrnout jako membrány, kapsle, měchy, trubice. [4]

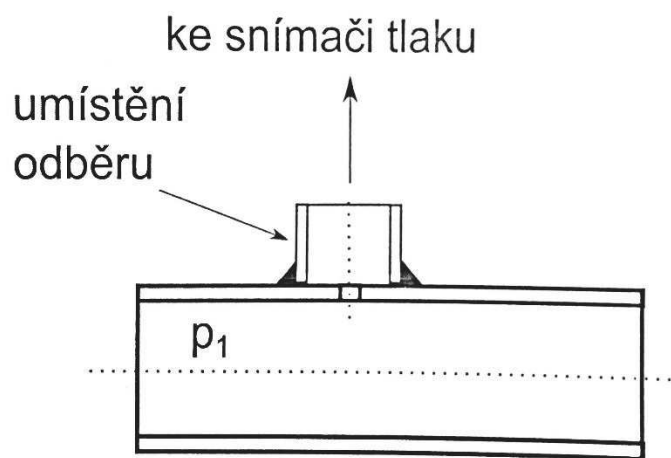


Obrázek 7: Příklady senzorů tlaku [4], upraveno autorem

Ze všech snímačů jsou nejrozšířenější membrány. Bourdonova trubice je po své délce zakřivená a má oválný průřez. Je na jednom konci uzavřena a odvíjí se nebo napřimuje, když v ní působí tlak. Obecně se Bourdonovy trubice hodí k měření vysokých tlaků, zatímco kapsle a měchy jsou pro tlaky nízké. [4,5]

### 2.4.1 Umístování snímačů tlaku

Pokud se jedná o kapaliny čisté, odebíráme tlak tak, jak je uvedeno v obrázku. Potrubí mezi tlakoměrem a odběrným místem je připojeno přímo nebo přes přírubu k trubce potrubí. Propojení je přes trubku o průměru 1mm. Důležité je nechat co největší vzdálenost mezi odběrným místem a všemi prvky, které by mohly ovlivňovat tlak (čerpadlo, ventil, ohyb). Minimálně se doporučuje deset průměrů potrubí. Vhodné je také oddělit tlakoměr od odběrového místa ventilem, v nejvyšším místě přidat odvzdušňovací ventil a v nejnižším přidat ventil k odstranění sedimentů (pokud v dané aplikaci vznikají).[3]



Obrázek 8: Umístění snímače tlaku [3]

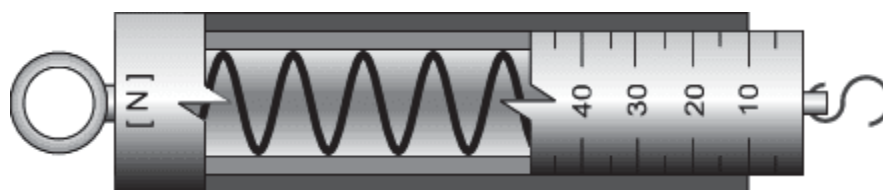
## 3 Typy senzorů k měření síly

### 3.1 Akcelerometry

Jednou z možností, jak měřit sílu, je měření zrychlení, které působí na těleso o známé hmotnosti. Akcelerometr můžeme označit jako zařízení s jedním stupněm volnosti, který v sobě má těleso o známé hmotnosti. Nosný systém s pružinou v rámu, který má tlumící vlastnosti. Tato varianta je ale v praxi velice limitovaná, protože ve velké části případů síly nejsou samostatně působící, nýbrž jsou součástí systému, který působí na těleso, které nemůže zrychlovat. Hodí se však u některých případech přechodných sil.[5,7]

### 3.2 Siloměry

Jedna z nejlevnějších variant k měření hmotnosti, potažmo síly, je pružinový siloměr. Jako referenční síla je použita gravitace. Stupnice je umístěna tak, že těleso neznámé hmotnosti je zavěšeno na pružinu a gravitace na něj může volně působit. Předpokládá se, že pružnost pružiny je lineární, a síly potřebné k napínání jsou vyznačené na stupnici. Když je síla pružiny a gravitace v rovnováze, můžeme odečíst výslednou sílu - hmotnost. Rozsah se může zvětšovat silou pružiny, ale se silou pružiny klesá přesnost stupnice. [13]



Obrázek 9: Schéma pružinového siloměru [19]

### 3.3 Piezoelektrické senzory síly

Piezoelektrického efektu lze využít k poměrně přesnému měření síly. Je ale třeba mít na paměti, že piezoelektrické senzory jsou schopné převést změnu síly na změnu elektrického signálu, avšak u statických sil nebudou mít žádnou elektrickou odezvu. Senzor se skládá z tenkých disků z křemene ( $\text{SiO}_2$ ), které jsou vloženy mezi horní a spodní základní desky. Tyto desky drží pohromadě čep, který zároveň předpíná krystaly. Předpětí zajišťuje dobrou linearitu a měřicí schopnosti. Poté je to zavařené do pouzdra z nerezové oceli, hermeticky utěsněné, aby nedošlo ke kontaminaci.[4]



Obrázek 10: Schéma piezoelektrického senzoru – upraveno autorem [4]

### 3.4 Deformační členy

Deformační členy jsou senzory založené na bázi fóliových tenzometrů. Jsou vhodné i k měření dynamických zátěží nebo sil. Síla způsobující deformaci členu osazeného tenzometry se pomocí změny odporu tenzometrů projeví na vystupujícím napětí, z čehož jsme schopni určit velikost síly. Tenzometry jsou zapojeny v plném můstku, který je schopný zajistit i teplotní kompenzaci. U senzorů založených na tenzometrech je důležitý pružný prvek, který reaguje na aplikovanou sílu, zatížení nebo hmotnost. Nejčastěji používanými členy jsou variace nosníku.

Hodí se zejména proto, že se v nich tvoří vysoké napětí a nabízí dvě stejné protilehlé plochy k umístění tenzometrů.

Deformační členy patří k spolehlivým a přesným snímačům síly. Existují i komplikovanější konstrukce nabízející širokou škálu možností použití. Sloupcové, typu S a další. [3,4,13]

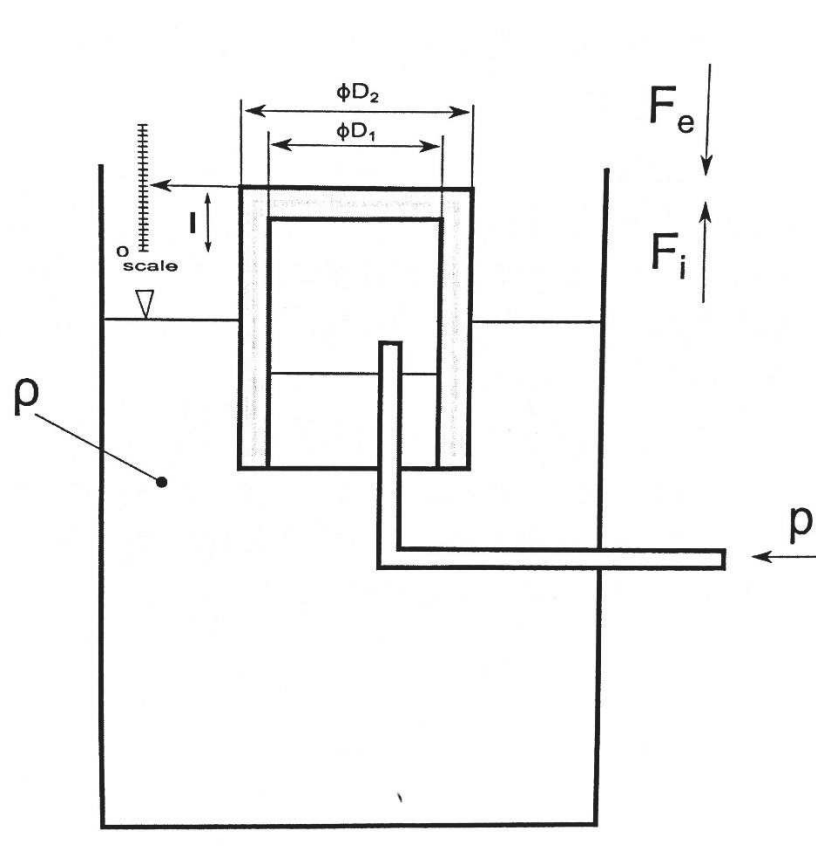


Obrázek 11: Deformační člen typu S [20]

## 4 Typy senzorů k měření tlaku

### 4.1 Zvonový tlakoměr

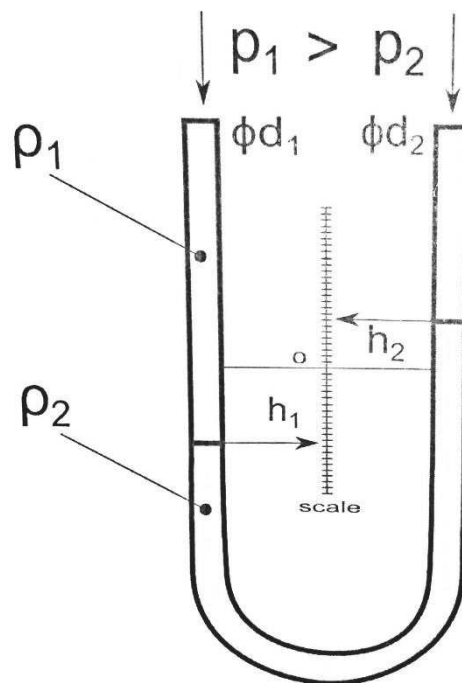
Jedná se o přístroj, který neměří na velkém rozsahu, zato ale velice přesně. Využívá se k přesným měřením nebo kalibraci. Měřený tlak je pod zvonem, který je z části ponořený v nádrži s kapalinou o známé hustotě. Ze statické rovnováhy sil působících na zvon jsme schopni vypočítat tlak přivedeného média pod zvonem. Používá se pro malé rozsahy tlaku, do 1000 Pa, když je nádrž naplněna vodou. Chyba měření se u tohoto manometru pohybuje okolo 0,02%. [3]



Obrázek 12: Zvonový tlakoměr [3]

## 4.2 U-trubicový manometr

Měřicí zařízení je tvořeno trubkou ve tvaru U. V trubce je kapalina o známé hustotě. Jeden z konců trubky je připojen k měřenému tlaku. Nejčastěji se tlak měří relativně k atmosférickému, který je u druhého konce trubky. Dá se využít i k porovnání dvou tlaků. Kapalina, kterou je trubka naplněna je často voda, avšak může to být i rtuť, která svou velkou hustotou dává možnost měřit větší tlaky, ale jde o nebezpečnou látku. Při čtení ze stupnice je potřeba počítat s kapilární elevací a depresí. [3]

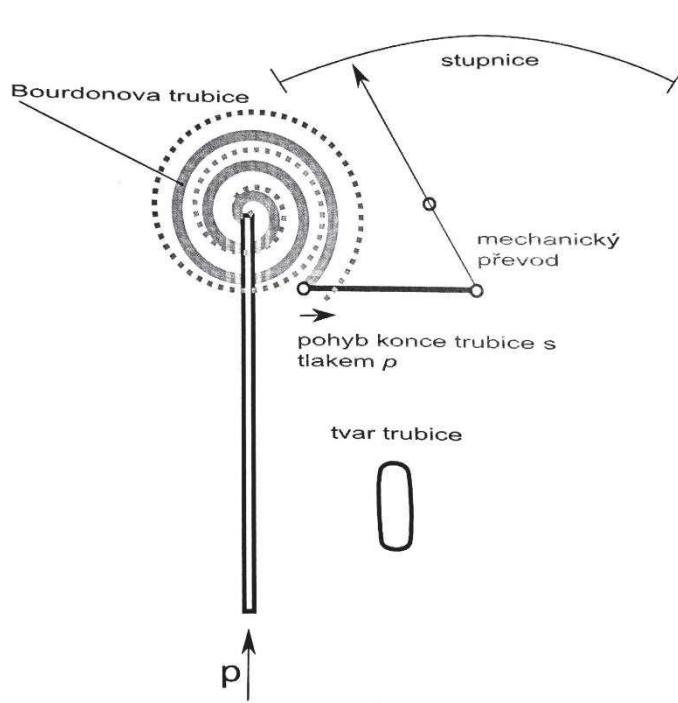


Obrázek 13: U trubicový manometr [3]

## 4.3 Bourdonova trubice

Řadí se mezi deformační tlakoměry, které využívají deformace, jenž je závislá na měřeném tlaku. Jde o velice robustní způsob měření tlaku. Bourdonova trubice je stočená do spirály, která v závislosti na tlaku mění tvar a tento pohyb se poté mechanicky převádí na pohyb ručičky na stupnici.

Tato trubice je citlivá na změny teploty kvůli vlivu teplotní roztažnosti na materiál trubice. Dosahuje menší přesnosti než membránové tlakoměry s kapacitním snímáním. [3]



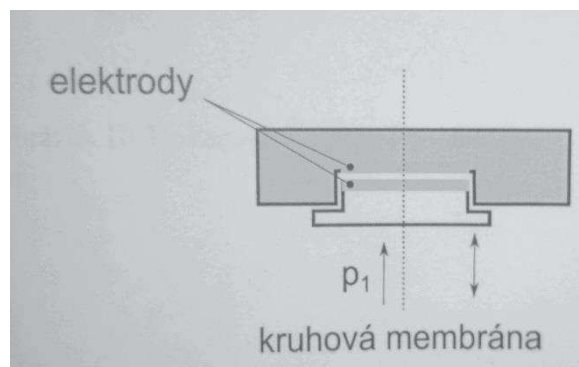
Obrázek 14: Bourdonova trubice - princip fungování [3]



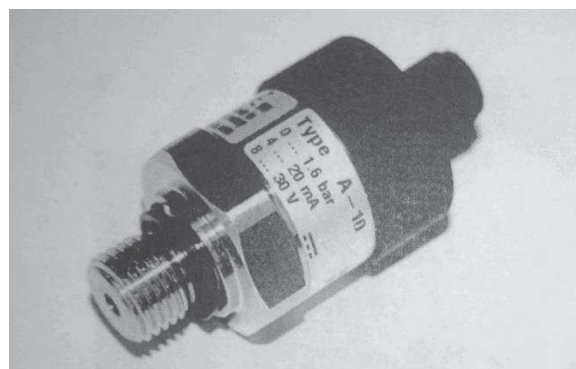
## 4.4 Membránový tlakoměr

Jedná se také o deformační tlakoměr, avšak v tomto případě se deformuje membrána. Působením tlaku se prohýbá a tento průhyb je poté převeden mechanicky ručičkou na stupnici nebo měřený snímačem polohy. V dnešní době je tento způsob v průmyslových aplikacích velice používán. Průhyb je nejčastěji měřen pomocí tenzometrů nebo kapacitně. Membrána je vyrobena buď z plastu, nebo kovu, záleží na rozsahu měřeného tlaku. Integrované tlakoměry mohou mít membránu i z křemíku. U tohoto snímače je deformace membrány vyhodnocována skrze piezorezistory.

Nejpoužívanější je však kapacitní vyhodnocování. Průhyb se přenáší na elektrody kondenzátoru. Při působení tlaku se elektrody v rámci kondenzátoru vůči sobě pohnou a tím se změní kapacita, kterou měříme a z ní jsme schopni určit tlak. [3,4,5]



Obrázek 15: Princip membránového snímače tlaku s kapacitním vyhodnocením [3]



Obrázek 16: Příklad senzoru s kapacitním vyhodnocením [3]

## 5 Zařízení pro řízení senzorů a sběr dat

Abychom byli schopni celý sensorický systém pohodlně ovládat, tak je třeba najít vyhovující mikrokontrolér, který bude kompatibilní se senzory, levný, ale zároveň schopný poskytnout požadované výsledky. Na základě těchto požadavků a doporučení vedoucího práce jsem vybíral pouze mezi zařízeními Arduino a Raspberry Pi.

### 5.1 Arduino

Arduino je mikrokontrolér, který je dnes široce používaná deska, která se hojně využívá k výuce ve školách pro své jednoduché programování, dostupnou cenu a široce dostupné návody a příslušenství. Programy jsou zdarma dostupné a mnoho uživatelů sdílí své projekty, což také pomáhá atraktivitě tohoto mikrokontroléru.

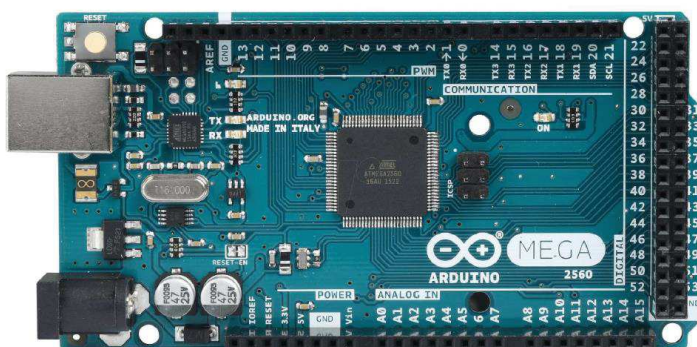
Variant, ve kterých je tato deska dostupná, je mnoho. Liší se v počtu pinů, velikostí, výkonem, frekvencí, procesorem i cenou. Deska je uzpůsobena tak, aby byla schopná komunikovat s počítačem, a některé mají převodníky i pro komunikaci s chytrými telefony. Desky jsou osazeny analogovými a digitálními piny. Piny schopné komunikovat se sběrnicemi SPI a I2C. [14]

#### 5.1.1 Arduino Uno

Uno je základní a nejběžněji používanou variantou. Poslouží dobře při zapojování jednoduchých obvodů a pro komunikaci s připojenými čidly nebo výstupy jako LCD displej. Obsahuje procesor ATmega328 s frekvencí 16MHz.[14]

### 5.1.2 Arduino Mega

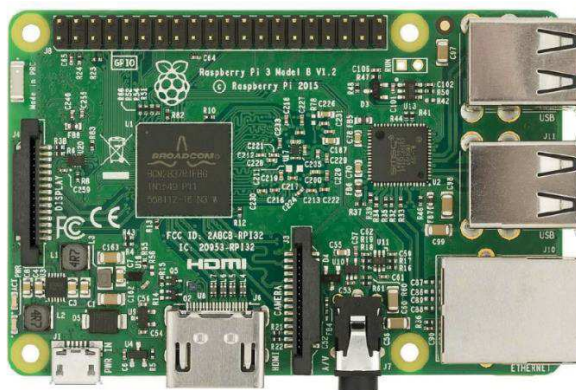
Jedna z nejvýkonnějších desek od společnosti Arduino je Mega. Oproti základní velikosti Uno je prodloužená a má tedy i více pinů a výkonnější čipy. Disponuje 256kB flash pamětí, 8kB RAM a 4kB EEPROM pamětí. Napájí se stejně jako většina Arduino 5V přes USB. [14]



Obrázek 17: Deska Arduino Mega 2560 [14]

## 5.2 Raspberry Pi

Raspberry se řadí mezi mikropočítače. Rozdílem mezi ním a Arduinem či dalšími mikrokontroléry je to, že Raspberry má vlastní operační systém. Dal by se označit za počítač s operačním systémem Linux. Disponuje menším počtem pinů než běžná Arduino, ale je vhodnější k projektům zahrnujícím audio/video vstupy, komunikaci skrze HDMI a komplexní matematické operace. Pro zapojování senzorů, LCD displeje nebo například servomotorů jsou vhodnější desky z řad Arduina. [14,15]

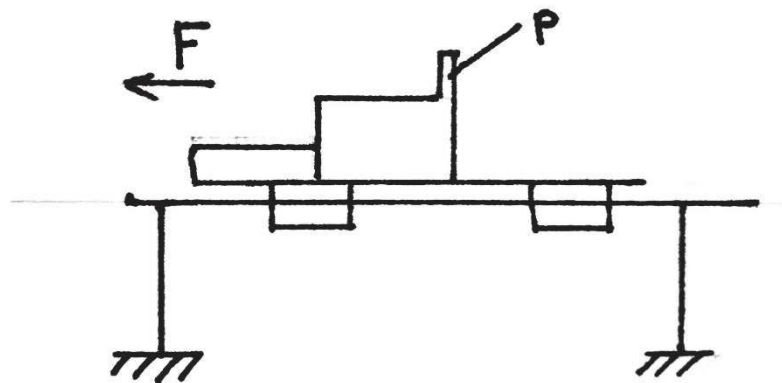


Obrázek 18: Raspberry Pi [21]

## 6 Na základě technických parametrů vyberte nejvhodnější senzory

### 6.1 Parametry raketového motoru a testování

Konstrukce standu je tvořena platformou, která je připevněna ke dvěma tyčím tak, že se po nich může pohybovat horizontálně. Na této platformě jsou díry, díky kterým jsme schopni na ni připevnit testovaný motor. Stand je samozřejmě složitější, ale pro tuto práci si jej můžeme zjednodušit do tohoto modelu. Působící síla by neměla překročit 100 N a tlak by měl dosahovat maximálně 1 MPa.



Obrázek 19: Schéma měřícího standu - foto autor

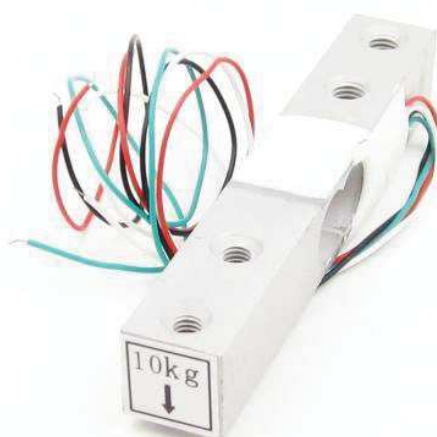
Výsledný senzorický systém by měl být schopen po umístění raketového motoru na stand a jeho spuštění zapnout senzor síly a tlaku, které po celou dobu testování budou snímat sílu a tlak. Po skončení testu by měl mikrokontrolér data zpracovat do výstupu, se kterým se bude moct dále pracovat a podle toho upravovat testovaný motor.

## 6.2 Výběr senzoru síly

Senzor síly by měl splňovat několik předpokladů. Měl by být spolehlivý, přesný, jednoduchý k instalaci a levný. Nabízela se kombinace pružiny se senzorem polohy, kde by se z tuhosti pružiny a polohy spočítala síla, ale to se nakonec ukázalo poměrně složité. Dále přišly v úvahu piezoelektrické snímače síly, které by z technického hlediska vyhovovaly, ale jejich nevýhodou pro tento projekt je jejich vysoká cena.

Nakonec se díky své spolehlivosti, přesnosti, jednoduchosti instalace a nízké ceně ukázal nejvhodnější nosníkový deformační člen osazený tenzometry. Inspirací byl i popis testu raketových motorů jak jej provádí NASA, samozřejmě v jejich případě se jedná o mnoho řádů vyšší síly, ale principiálně jde o podobný test. [16]

Z parametrů testu víme, že maximální síla by neměla překročit 100 N, z toho důvodu by nám měl stačit deformační člen do 10 kg. Deformační člen by se umístil na stand před platformu tak, aby při se do něj mohl motor opírat svou přední vyčnívající částí.



Obrázek 20: Deformační člen [22]

## 6.3 Výběr senzoru tlaku

Při výběru senzoru tlaku je třeba si dát pozor na několik věcí. Důležité je, aby byl senzor kompatibilní se zbytkem systému. Je třeba se ujistit, že maximální tlak, který senzor vydrží, je ideálně 1,5 násobkem maximálního dosahovaného tlaku, jinak je senzor v ohrožení. Také záleží, jaké přesnosti chceme dosahovat. V našem případě potřebujeme měřit s menší chybou než 2%. [4]

Při posouzení všech těchto parametrů z toho nejlépe vychází membránový senzor tlaku s kapacitním snímáním. Jedním takovým je například Senzor SKU SEN0257, který je napájen napětím 5V, měřicí rozsah má až do 1,2 MPa, ale vydržel by nepoškozen až do 2 MPa a měří s maximální chybou 1%. Životnost má 10 milionů cyklů, což je také více než dostatečné.



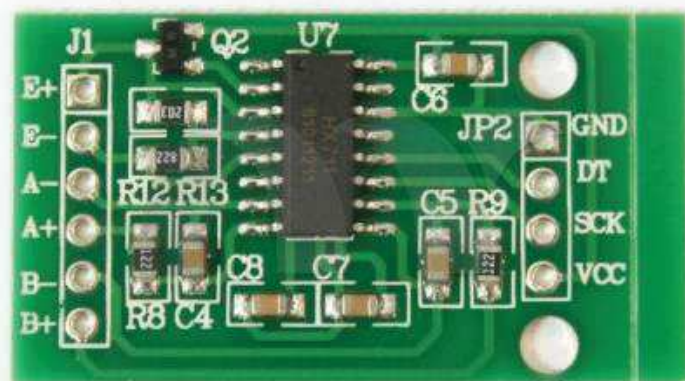
Obrázek 21: Membránový senzor tlaku SKU SEN0257 [23]

## 7 Návrh zařízení pro sběr a vyhodnocování dat

### 7.1 Hardware

Potřebujeme zařízení, které je schopné komunikovat s vybranými senzory, zpracovat data a převést je do výstupu, se kterým se dá jednoduše dále pracovat. Arduino Mega 2560 je více než dostačující. Je schopné poskytnout napájení 5V, což je vhodné pro oba senzory. Má parametry dostačující pro rychlé zpracování dat, je vhodný k jednoduchému řízení celého sensorického systému a tvorba programu je u něj snadná. Je schopný spolehlivě komunikovat s počítačem.

Tlakový senzor je možné přímo připojit k desce Arduina do jednoho z analogových vstupů a napětí je lehce převoditelné na měřený tlak. Mezi deformační člen a desku je třeba ještě zařadit převodník pro zesílení signálu přicházejícího z deformačního členu. Pro toto se výborně hodí A/D převodník HX711. Poté bylo ještě potřeba deformační člen kalibrovat, k tomu posloužil jednoduchý kód a závaží o známé hmotnosti. [17]



Obrázek 22: Převodník HX711 [24]

Pro tuto aplikaci by byla vhodná víceméně kterákoli deska z řady Arduino, i jiných. Jedním z důvodů výběru této desky je i fakt, že byla zrovna k dispozici.

## 7.2 Software

### 7.2.1 Arduino IDE

Další výhodou desek Arduino je, že je možné je programovat skrze prostředí Arduino IDE (Integrated Development Environment), které je velice intuitivní a jednoduché. Je v něm možné provést vše od tvorby kódu, přes kompilaci a ověření až po nahrání na desku. Struktura programu je v programovacím jazyce C. Prostředí také umožňuje sledovat probíhající měření v Serial monitoru a ploteru (tvoří graf).

### 7.2.2 Základní struktura prostředí Arduino IDE

Kód programu je rozdělen na tři části. V první inicializujeme proměnné a zahrnujeme potřebné knihovny. Druhá proběhne jen jednou, takže tam se spouští vše potřebné, provádí se první měření, někdy se nulují proměnné apod. Poslední část se ve smyčce opakuje pořád dokola, takže v té probíhá hlavní část průběhu kódu. Zde probíhá měření, výpočty, vyhodnocení a cokoli dalšího.



Obrázek 23: Prostředí Arduino IDE - foto autor



Velkou výhodou prostředí Arduino IDE je také přítomnost mnoha knihoven umožňujících snadné ovládání senzorů a dalších příslušenství k Arduino. Tato výhoda velice usnadňuje tvorbu programu ke sběru dat. Knihovny jsou volně ke stažení přímo z webu Arduina nebo lze nalézt některé vytvořené samotnými uživateli na internetu.

## 7.3 Zpracování měření

### 7.3.1 Arduino IDE - Ploter

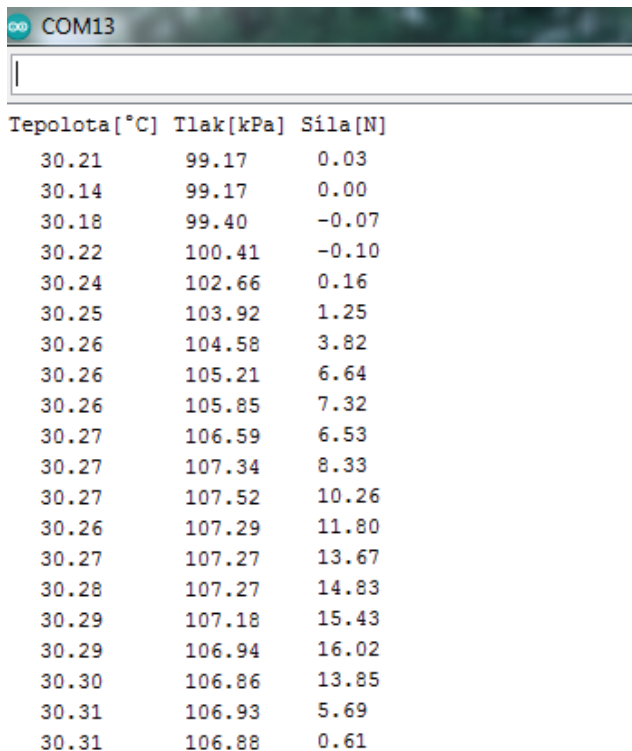
Jednu z možností jak sledovat výstupy z měření přímo v jeho průběhu nabízí přímo prostředí Arduino IDE. Jde o Serial Ploter, který je schopný z měřených veličin přímo tvořit graf. Způsobů, jak z měřených dat tvořit v přímém přenosu graf, je mnoho, ale tato varianta je díky vestavěnému Ploteru nejjednodušší a poměrně dostačující pro sledování v průběhu testu.



Obrázek 24: Arduino Ploter s daty měření - foto autor

### 7.3.2 Arduino IDE - Serial monitor

Další poměrně jednoduchou, ale ne až tak praktickou možností, jak sledovat průběh měření, je Serial monitor integrovaný v prostředí Arduino IDE. Data z něj však nelze nijak rozumně importovat, takže to není nejvhodnější způsob.

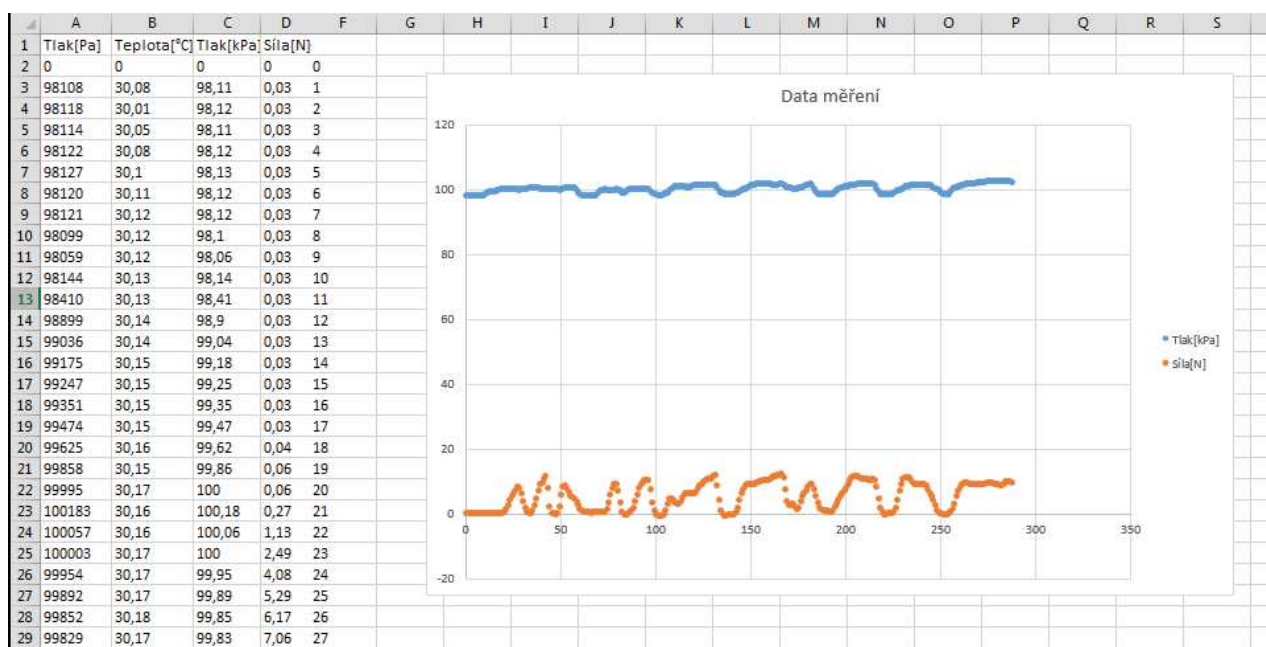


Tepolota [°C]	Tlak [kPa]	Sila [N]
30.21	99.17	0.03
30.14	99.17	0.00
30.18	99.40	-0.07
30.22	100.41	-0.10
30.24	102.66	0.16
30.25	103.92	1.25
30.26	104.58	3.82
30.26	105.21	6.64
30.26	105.85	7.32
30.27	106.59	6.53
30.27	107.34	8.33
30.27	107.52	10.26
30.26	107.29	11.80
30.27	107.27	13.67
30.28	107.27	14.83
30.29	107.18	15.43
30.29	106.94	16.02
30.30	106.86	13.85
30.31	106.93	5.69
30.31	106.88	0.61

Obrázek 25: Sériový monitor Arduina IDE s daty měření - foto autor

### 7.3.3 Processing

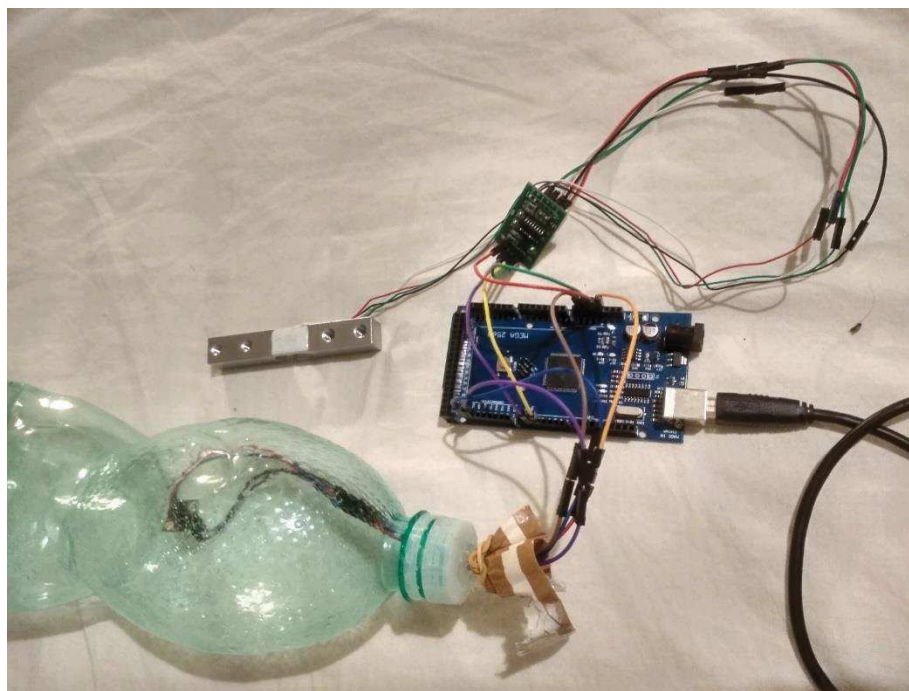
Nejvhodnější variantou zpracování by bylo je dostat to tabulky (například do MS Excelu). K tomu cíli bylo potřeba pomoci dalšího programu. Variant je samozřejmě mnoho, ale poměrně jednoduchou a efektivní variantou se ukázalo napsat krátký program v prostředí Processing. Processing je velice jednoduché prostředí k tvoření prostých programů. Využil jsem jej k napsání programu, který sbírá data ze sériového portu Arduina a zapisuje je do formátu .csv. Z tohoto formátu pak není problém data naimportovat do běžných tabulkových procesorů jako je i MS Excel.



Obrázek 26: Tabulka v prostředí MS Excel s grafy dat z měření - foto autor

## 7.4 Sestavení zkušebního senzorkého systému

Po výběru vhodných senzorů, mikrokontroléru a softwaru jsem přistoupil k výrobě zkušebního modelu senzorkého systému. Vše potřebné se podařilo sehnat, bohužel však místo vybraného senzoru tlaku byl k dostání jiný. I tak to však stačí k vytvoření prototypu. Ten se podařilo sestavit, vytvořit příslušné programy, a poté jsem přistoupil k praktické zkoušce. Použité programy jsou v příloze práce.



Obrázek 27: Testovací sestava senzorů a mikrokontroléru Arduino Mega - foto autor

## 8 Závěr

Předmětem bakalářské práce bylo měření veličin na testovacím raketovém standu – konkrétně měření síly a tlaku na motoru modelu rakety. V teoretické části jsem představil měřené veličiny a některé způsoby jejich měření, vysvětlil, v jakých případech je který ze způsobů měření vhodný a v jakých naopak nevhodný a popsal několik typů zařízení určených k měření těchto veličin. Dále jsem se zabýval možnostmi v oblasti řídicích mikrokontrolérů pro tento sensorický systém a vybral Arduino, které je svými vlastnostmi vyhovující.

Druhá část práce popisuje model testovacího standu a na základě požadovaných technických parametrů, jednoduchosti instalace, spolehlivého provozu a s ohledem na ekonomičnost navrhuje vhodný senzor síly a tlaku. Pro svou snadnou montáž a spolehlivost byl vybrán deformační nosník a membránový tlakový senzor s kapacitním snímáním se ukázal vhodným díky své přesnosti a dobré kompatibilitě s mikrokontrolérem. Výběr mikrokontroléru byl podmíněn faktem, že Arduino Mega byl shodou okolností pro práci k dispozici, nicméně by bezesporu stačila i jeho levnější a jednodušší verze Arduino Uno nebo skladnější Nano. Dalším krokem, na který se práce zaměřuje, je nalezení vyhovujícího softwarového prostředí pro tvorbu kódů k řízení senzorů skrze mikrokontrolér a pro zpracování získaných dat. Po několika neúspěších s jinými softwary jsem se rozhodl vyzkoušet prostředí Arduino IDE, které nakonec dobře posloužilo k řízení senzorů a sběru dat z nich. Ještě však bylo potřeba data ukládat do tabulky, na což Arduino IDE již nestačilo, ale pomohl program vytvořený v Processingu, který dokázal data přepisovat do tabulkové formy. Takto uložená data jsou dobře připravena k další práci s nimi.

Prototyp senzorického systému skládajícího se z Arduino Mega, senzoru tlaku BMP280, deformačního článku a A/D převodníku se s drobnými odlišnostmi (a sice se senzorem tlaku odlišným od původně zamýšleného) povedlo sestavit a vyzkoušet. Projekt modelů raket byl bohužel z důvodu koronavirové pandemie pozastaven, nebo spíš přesunut k jednotlivým aktérům domů, proto zatím nebyla možnost dát vše dohromady, ale věřím, že až se vše vrátí k běžnému stavu, tak se na projekt znovu naváže. Dáme dohromady stand, model raketového motoru a v této práci navržený a sestavený senzorický systém a spustíme testování.

## 9 Seznam použité literatury

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. Fyzika. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021441231.
- [2] DEMO, Pavel. Fyzika. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 9788001057599.
- [3] NOVÁK, Martin. Technická měření. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 9788001063880.
- [4] Sensor technology handbook. Editor Jon S. WILSON. Burlington: Elsevier, c2005. Newnes. ISBN 0750677295.
- [5] FRADEN, Jacobs. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, c2004. ISBN 0-387-00750-4.
- [6] STORK, David G. a Elad YOM-TOV. Computer manual in MATLAB to accompany pattern classification. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2004. ISBN 978-0-471-42977-7.
- [7] MORRIS, ALAN S and LANGARI, REZA, 2016, Measurement and instrumentation. Amsterdam [etc.] : Academic Press.
- [8] HOFFMAN, KARL, 1989, An introduction to measurements using strain gages. Darmstadt : Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [9] ČECH, Jaroslav, Libor JANÍČEK a Jiří PERNIKÁŘ. Strojírenská metrologie. Brno: PC-DIR, 1998. ISBN 80-214-1230-5.
- [10] Top 5 industrial automation trends in 2020: Jeff Burnstein, A3. Manufacturing AUTOMATION [online]. Toronto: Manufacturing Automation, 2020 [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: <https://www.automationmag.com/top-5-industrial-automation-trends-in-2020-jeff-burnstein-a3/>
- [11] ŠOB, František. Hydromechanika. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 9788021435780.
- [12] DEMO, Pavel. Fyzika. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 9788001057599.

- [13] WEBSTER, John G. Mechanical variables measurement: solid, fluid, and thermal. Boca Raton, Fla: CRC Press, c2000. ISBN 0849300479.
- [14] SELECKÝ, Matúš. Arduino: uživatelská příručka. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.
- [15] KRČMÁŘ, Petr. Raspberry Pi: miniaturní ARM počítač za pár stovek - Root.cz. Root.cz [online]. Praha: Root.cz, 2011 [cit. 2020-08-22]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/raspberry-pi-miniaturni-arm-pocitac-za-par-stovek/>
- [16] DUNBAR, Brian. Engine thrust – Liquid Rocket Engines (J-2X, RS-25, general). Blogs.nasa.gov [online]. Washington, DC: NASA Blogs, 2012 [cit. 2020-08-22]. Dostupné z: <https://blogs.nasa.gov/J2X/tag/engine-thrust/>
- [17] AL-MUTLAQ, Sarah a Alex GIANT. Load Cell Amplifier HX711 Breakout Hookup Guide. Learn.sparkfun.com [online]. Niwot [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide/all>
- [18] WIKIMEDIA COMMONS, Penubag. A few images illustrating forces. In: Wikimedia Commons [online]. San Francisco: Wikipedia, 2010 [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Force\\_examples.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Force_examples.svg)
- [19] CHALUPSKÝ, Zdeněk. Siloměr - princip: siloměr. In: Wikipedia [online]. San Francisco: Wikipedia, 2008 [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Silom%C4%9Br#/media/Soubor:Silom%C4%9Br\\_25.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Silom%C4%9Br#/media/Soubor:Silom%C4%9Br_25.png)
- [20] DARACELESTE, A. S-type load cell. In: Wikipedia [online]. San Francisco: Wikipedia, 2018 [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Load\\_cell#/media/File:XTS4\\_load\\_cell.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell#/media/File:XTS4_load_cell.jpg)
- [21] ECLIPSE. Raspberry Pi. In: Arduino shop [online]. Havlíčkův Brod: Arduino shop, 2020 [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: [https://arduino-shop.cz/arduino/1385-raspberry-pi-3-model-b-quad-core-1.2-ghz-64bit-cpu-1gb-ram-wifi-bluetooth-4.1.html?gclid=Cj0KCQjwp4j6BRCRARIsAGq4yMH7APn8eqL9Lhc-LYsOmSCfZiRkGjdYTyIDHaxQjX7rg4wW6ZuurQYaAolGEALw\\_wcB](https://arduino-shop.cz/arduino/1385-raspberry-pi-3-model-b-quad-core-1.2-ghz-64bit-cpu-1gb-ram-wifi-bluetooth-4.1.html?gclid=Cj0KCQjwp4j6BRCRARIsAGq4yMH7APn8eqL9Lhc-LYsOmSCfZiRkGjdYTyIDHaxQjX7rg4wW6ZuurQYaAolGEALw_wcB)



- [22] ECLIPSERA. Váhový senzor 10 kg. In: Arduino shop [online]. Havlíčkův Brod: Arduino shop, 2020 [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: [https://arduino-shop.cz/arduino/2203-vahovy-senzor-10-kg.html?gclid=Cj0KCQjwhIP6BRCMARIsALu9Lf7jA47aJossY0IHFDklczQ4JJ-Em-V9slh0q6EJnh9XrumLBLzQOlAq3lEALw\\_wcB](https://arduino-shop.cz/arduino/2203-vahovy-senzor-10-kg.html?gclid=Cj0KCQjwhIP6BRCMARIsALu9Lf7jA47aJossY0IHFDklczQ4JJ-Em-V9slh0q6EJnh9XrumLBLzQOlAq3lEALw_wcB)
- [23] Gravity Water Pressure Sensor SKU SEN0257. In: DF Robot [online]. Shanghai: DFROBOT, 2020 [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: [https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_\\_Water\\_Pressure\\_Sensor\\_SKU\\_\\_SEN0257](https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Water_Pressure_Sensor_SKU__SEN0257)
- [24] ECLIPSERA. AD Převodník Modul 24-bit 2 kanály HX711. In: Arduino shop [online]. Havlíčkův Brod, 2020 [cit. 2020-08-23]. Dostupné z: [https://arduino-shop.cz/arduino/998-ad-prevodnik-modul-24-bit-2-kanaly-hx711.html?gclid=Cj0KCQjwhIP6BRCMARIsALu9LfmbTD-5GnA6-74i8nZiH0leZRE2eckV-AvhkkjOkdf15KsuOp\\_71AoaAvvcEALw\\_wcB](https://arduino-shop.cz/arduino/998-ad-prevodnik-modul-24-bit-2-kanaly-hx711.html?gclid=Cj0KCQjwhIP6BRCMARIsALu9LfmbTD-5GnA6-74i8nZiH0leZRE2eckV-AvhkkjOkdf15KsuOp_71AoaAvvcEALw_wcB)
- [25] STORK, David G. a Elad YOM-TOV: Computer manual in MATLAB to accompany Pattern classification. 2nd. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 978-0-471-42977-7; 0471429775.

## 10 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Příklady působení síly [18].....	10
Obrázek 2: Komplexní senzor síly [5].....	11
Obrázek 3: Struktura fóliového tenzometru [9].....	12
Obrázek 4: Deformační citlivosti materiálů [3].....	13
Obrázek 5: Graf změny elektrického odporu na poměrném prodloužení [3] ....	14
Obrázek 6: Graf znázorňující přetlak a podtlak [11] .....	16
Obrázek 7: Příklady senzorů tlaku [4], upraveno autorem .....	17
Obrázek 8: Umístění snímače tlaku [3] .....	18
Obrázek 9: Schéma pružinového siloměru [19].....	19
Obrázek 10: Schéma piezoelektrického senzoru – upraveno autorem [4] .....	20
Obrázek 11: Deformační člen typu S [20] .....	21
Obrázek 12: Zvonový tlakoměr [3] .....	22
Obrázek 13: U trubicový manometr [3].....	23
Obrázek 14: Bourdonova trubice - princip fungování [3] .....	24
Obrázek 15: Princip membránového snímače tlaku s kapacitním vyhodnocením [3].....	25
Obrázek 16: Příklad senzoru s kapacitním vyhodnocením [3] .....	25
Obrázek 17: Deska Arduino Mega 2560 [14] .....	27
Obrázek 18: Raspberry Pi [21].....	27
Obrázek 19: Schéma měřicího standu - foto autor.....	28
Obrázek 20: Deformační člen [22].....	29
Obrázek 21: Membránový senzor tlaku SKU SEN0257 [23] .....	30
Obrázek 22: Převodník HX711 [24].....	31
Obrázek 23: Prostředí Arduino IDE - foto autor.....	32
Obrázek 24: Arduino Ploter s daty měření - foto autor .....	33
Obrázek 25: Sériový monitor Arduina IDE s daty měření - foto autor.....	34
Obrázek 26: Tabulka v prostředí MS Excel s grafy dat z měření - foto autor ...	35
Obrázek 27: Testovací sestava senzorů a mikrokontroléru Arduino Mega - foto autor .....	36



# 11 Přílohy

## 11.1 Program v Arduino IDE

```
FINAL_PRACE_final_hezky | Arduino 1.8.13
Soubor Úpravy Projekt Nástroje Nápvěda

FINAL_PRACE_final_hezky
#include <Wire.h>
#include "i2c.h"
#include "i2c_BMP280.h"
#include "HX711.h"

#define calibration_factor -423000 //tuto hodnotu jsme získali z programu Kalibrace
#define DOUT 3
#define CLK 2

HX711 scale;
BMP280 bmp280;

float pascal;
float kPa;
float temperature;
float newtony;
char startMarker = '<';
char endMarker = '>';
char initializeMarker = '^';

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.print("Test BMP280: ");
  if (bmp280.initialize()) Serial.println("Senzor nalezen");
  else
  {
    Serial.println("Senzor nenalezen");
    while (1) {}
  }

  bmp280.setEnabled(0);
  bmp280.triggerMeasurement(); // jednorázové měření
  scale.begin(DOUT, CLK);
  scale.set_scale(calibration_factor);
  scale.tare(); //přepokládáme nezatiženost na začátku, takže nulujeme
  while (!Serial);
  Serial.print(initializeMarker); //spuštění přenosu
}

void loop() {
  serialOutput();
  newtony = scale.get_units()*9.81;
  bmp280.awaitMeasurement();
  bmp280.getTemperature(temperature);
  bmp280.getPressure(pascal);
  kPa = pascal/1000;
  bmp280.triggerMeasurement();
}
```



```
    delay(10);                //aby se nepřetížil Seriový port
}
void serialOutput() {
    Serial.print(startMarker);
    Serial.print(pascal);
    Serial.print(",");
    Serial.print(temperature);
    Serial.print(",");
    Serial.print(kPa);
    Serial.print(",");
    Serial.print(newtony);
    Serial.print(endMarker);
}
```



## 11.2 Program v Processing

```
Data_Logger_Processing_hezky | Processing 3.5.4
File Edit Sketch Debug Tools Help

Data_Logger_Processing_hezky
1 import processing.serial.*;
2 PrintWriter output;
3 Serial ArduinoSerial;
4 int h, min, s, m;
5 int time;
6 int timeOffset;
7 int maxCharacters=0;
8 long loop=0;
9 long fileWrites=0;
10 String row = "";
11 String incomingString;
12 char incomingCharacter;
13 int characterCount = 0;
14 boolean newData = false;
15 boolean receiveInProgress = false;
16 boolean overflow = false;
17 boolean initialize = false;
18 String COM="COM13"; //je potřeba zadat port na kterém je Arduino
19 char startMarker = '<';
20 char endMarker = '>';
21 char initializeMarker = '^';
22 //Document setup
23 String filename = "Data_mereni";
24 String columns = "Tlak[Pa],Teplota[°C],Tlak[kPa],Síla[N]";
25
26 int maxTime = 2*30*1000; //maximální čas sběru
27 int samples = 1000; //maximální počet sběrů
28 int maxChars = 56; //limitování velikosti jednoho data
29 boolean debug = false; //pro debug -> true
30
31 void setup() {
32 min = minute();
33 int sec = second();
34 output = createWriter(filename + str(min)+str(sec)+ ".csv"); // vytvoří soubor ve složce skeče
35 ArduinoSerial = new Serial(this, COM, 115200); //serial se připojí na daný port s baudem 115200
36 output.println(columns);
37 updateTime();
38 timeOffset = (((min*60) + s)*1000) +m;
39 println("nastavení hotovo");
40 }
41
42 void draw() {
43 while (time <= maxTime && loop < samples) { //čte dokud nedosáhne času nebo počtu sběrů
44 updateTime();
45 receiveWithStartEndMarkers(); //přijem dat
46 if (newData == true) { //kontroluje jestli dorazila data
```



```
47     println("Poslední přenos:", row);
48     newData = false; //znovu začne hledat data
49 }
50 time = (((min*60) + s)*1000) +m) - timeOffset;
51 }
52 keyPressed();
53 }
54
55 void receiveWithStartEndMarkers() {
56     characterCount = 0;
57     while (ArduinoSerial.available() > 0 && newData == false) {
58         incomingCharacters = ArduinoSerial.readChar(); //přečte serial a uděla z dat char
59         incomingString = str(incomingCharacters); //uděla z toho string
60         if (debug) {
61             println("Prichozi Serial:", incomingString);
62         }
63         if (incomingString != null) { //ujištění že máme data
64             if (receiveInProgress == true) {
65
66                 if (incomingCharacters != endMarker) { //přidá char k přenosu
67                     row += incomingString;
68                     characterCount++;
69                     if (characterCount > maxCharacters) {
70                         maxCharacters = characterCount;
71                     }
72                     if (characterCount >= maxChars) {
73                         if (debug) {
74                             println("pocetcharu:", characterCount, " prilis velky pocet charu");
75                         }
76                         overflow = true;
77                     }
78                 } else {
79                     if (debug) {
80                         println("endMarker");
81                     }
82                     if (overflow == false) { //zapiše do souboru pokud nebyl prilis velky pocet charu
83                         output.println(row);
84                         fileWtites++; //soucet zapisu
85                     }
86                     receiveInProgress = false; //reset promennych
87                     characterCount = 0;
88                     newData = true;
89                     overflow = false;
90                     loop++;
91                 }
92             }
93         }
94     }
95 }
96
97 void updateRow() {
98     if (incomingCharacters == startMarker && initialize == true) {
99         if (debug) {
100             println("startMarker");
101         }
102         row=""; //reset row
103         receiveInProgress = true;
104     } else if (incomingCharacters == initializeMarker) {
105         println("initializeMarker");
106         row="";
107         initialize = true;
108     } else {
109         if (debug) {
110             println("Prichozi String = nula");
111         }
112     }
113 }
114
115 void keyPressed() {
116     output.flush(); // dopise zbytek dat
117     output.close(); // dokonci soubor
118     println("Konec přenosu");
119     if (debug) {
120         println("Pocet loopu:", loop);
121         println("Pocet zápisu:", fileWtites);
122         println("Doba průběhu:", time, "ms");
123         println("Nejdelsi přenos:", maxCharacters, "characters");
124         println("zmen maxCharacters na", maxCharacters+1, "aby se predeslo pretlaku. Ted jsme na", maxChars);
125     }
126     exit(); //zastavi program
127 }
128
129 void updateTime() {
130     h = hour();
131     min = minute();
132     s = second();
133     m = millis();
134 }
```

```
92 } else if (incomingCharacters == startMarker && initialize == true) {
93     if (debug) {
94         println("startMarker");
95     }
96     row=""; //reset row
97     receiveInProgress = true;
98 } else if (incomingCharacters == initializeMarker) {
99     println("initializeMarker");
100     row="";
101     initialize = true;
102 } else {
103     if (debug) {
104         println("Prichozi String = nula");
105     }
106 }
107 }
108 }
109 }
110 void keyPressed() {
111     output.flush(); // dopise zbytek dat
112     output.close(); // dokonci soubor
113     println("Konec přenosu");
114     if (debug) {
115         println("Pocet loopu:", loop);
116         println("Pocet zápisu:", fileWtites);
117         println("Doba průběhu:", time, "ms");
118         println("Nejdelsi přenos:", maxCharacters, "characters");
119         println("zmen maxCharacters na", maxCharacters+1, "aby se predeslo pretlaku. Ted jsme na", maxChars);
120     }
121     exit(); //zastavi program
122 }
123
124 void updateTime() {
125     h = hour();
126     min = minute();
127     s = second();
128     m = millis();
129 }
130 }
```