

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky

Diplomová práce



**Dotykové grafenové senzory tlaku  
pro robotické a průmyslové aplikace**

Tactile graphene pressure sensors for  
robotic and industrial applications

Bc. Daniel Řehák

Magisterský program: Automatizační a přístrojová technika

Specializace: Automatizace a průmyslová informatika

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Praha 2023

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Bc. Daniel Řehák

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za jeho trpělivost, neocenitelné rady a odbornou pomoc při tvorbě diplomové práce. Ing. Jiří Červenka, Ph.D. a Prabhat Kumar, Ph.D. z Akademie věd České Republiky jsou další lidé, kterým bych chtěl poděkovat za poskytnutí senzorů a cenné připomínky k návrhu experimentů. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a přátelům, bez vás by to nešlo.

Bc. Daniel Řehák

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Řehák** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **482592**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Automatizační a přístrojová technika**  
Specializace: **Automatizace a průmyslová informatika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Dotykové grafenové senzory tlaku pro robotické a průmyslové aplikace**

Název diplomové práce anglicky:

**Tactile graphene pressure sensors for robotic and industrial applications**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Otestování tlakového senzoru vyrobeného z grafenového aerogelu
- 2) Návrh systému pro měření
- 3) Experimentální zjištění vlastností senzoru a a zhodnocení použitelnosti v robotických/průmyslových aplikacích.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ramos, Pedro & Postolache, Octavian & Pereira, Jose. (2013). Tactile sensors for robotic applications. Measurement. 46. 1257. 10.1016/j.measurement.2012.11.015.  
[2] Zhu, Lingfeng & Wang, Yancheng & Mei, Deqing & Jiang, Chengpeng. (2020). Development of Fully Flexible Tactile Pressure Sensor with Bilayer Interlaced Bumps for Robotic Grasping Applications. Micromachines. 11. 770. 10.3390/mi11080770.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Martin Novák, Ph.D. odbor elektrotechniky FS**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

# Anotační list

<b>Název práce:</b>	Dotykové grafenové senzory tlaku pro robotické a průmyslové aplikace
<b>Autor:</b>	Bc. Daniel Řehák
<b>Rok:</b>	2023
<b>Studijní program:</b>	Automatizační a přístrojová technika
<b>Ústav:</b>	Ústav přístrojové a řídicí techniky
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 65 Počet obrázků: 40 Počet tabulek: 7 Počet příloh: 1

## Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá speciálním senzorem vyvinutým na Akademii věd ČR. Čidlo je vytvořeno užitím grafenového aerogelu a vykazuje slibné vlastnosti vhodné pro užití v oblasti robotiky. Na rozdíl od jiných senzorů by tento senzor mohl být využit k měření vysokých rozsahů jak tlakového, tak tahového napětí. Diplomová práce si klade za cíl zhodnotit senzor pro robotické a průmyslové aplikace. V první části je zpracována rešerše senzorů různých druhů a jejich porovnání. Dále je v práci popsán proces zpracování signálu ze senzoru. Následuje návrh série prvotních experimentů, které slouží k nalezení závislosti mezi zatížením senzoru a výstupním signálem senzoru. Tyto získané poznatky jsou poté využity a aplikovány na praktickou robotickou úlohu. V závěru jsou diskutovány výsledky práce a nastíněna další možná využití.

<b>Klíčová slova:</b>	analogově-digitální převodník, grafenový aerogel, taktilní senzor, tlakové zatížení, Wheatstoneův můstek
-----------------------	--

**Title:**Tactile graphene pressure sensors for  
robotic and industrial applications**Author:**

Bc. Daniel Řehák

**Abstract:**

This diploma thesis addresses a specialized sensor developed at the Czech Academy of Sciences. The sensor is fabricated using graphene aerogel and exhibits promising characteristics suitable for implementation in the field of robotics. In contrast to other sensors, this particular sensor could be employed for measuring a wide range of both compressive and tensile forces. The objective of this diploma thesis is to assess the sensor's viability for robotic and industrial applications. The initial segment of the thesis involves a survey of various types of sensors and their comparison. Subsequently, the document outlines the signal processing procedure from the sensor. This is followed by the proposal of a series of preliminary experiments aimed at identifying the relationship between sensor loading and the sensor's output signal. The insights gained from these experiments are then utilized and applied to a practical robotic task. At the end, the thesis discusses the obtained results and outlines potential future applications.

**Keywords:**analog-to-digital converter, graphene  
aerogel, tactile sensor, pressure load,  
Wheatstone bridge

# Seznam použitých zkratk

**ADC** Analog-to-digital converter. xi, 16, 19, 20, 22, 23, 29, 38, 44, 45, 47, 49, 52, 63, 64

**AV ČR** Akademie věd České republiky. x, 9, 11, 15, 25, 30, 31, 33, 52

**CMOS** Complementary Metal-Oxide-Semiconductor. 35

**DPS** Deska Plošného Spoje. 32, 52, 53

**EN** Enable. 22

**GA** grafenový aerogel. x, 3, 5, 7–11, 19, 25, 31, 32, 36, 40, 51, 52, 54, 55, 63

**GO** oxid grafenu – anglicky graphene oxide. 5, 7, 9, 10, 62

**PVDF** Polyvinyliden fluorid. 14

**SCL** Serial Clock. 21

**SDA** Serial Data. 21

**SPI** Serial Peripheral Interface. 52

**SWD** Serial Wire Debug. 21, 23

**TTL** Transistor-Transistor Logic. 35, 43

**UART** Universal asynchronous receiver-transmitter. 23, 36

# Seznam použitých pojmů

**autokláv** označuje přístroj konstruovaný pro chemické reakce probíhající za vysokého tlaku a teploty. 5

**oxidační činidlo** V chemii označuje látku, která oxidauje jinou látku a sama sebe redukuje. 5

**PET** Polyethylentereftalát – termoplast, ze kterého se vyrábí například jednorázové láhve na pití v potravinářském průmyslu. 9

**piezoresistivita** schopnost materiálu vratně měnit svůj elektrický odpor vlivem vnějšího mechanického napětí. 4, 15

**taktilní** hmatový/dotykový. 7

**žihání** druh tepelného zpracování kovů, které se provádí za účelem zlepšení některých vlastností. 10



# Seznam použitých symbolů a označení

Symbol	Jednotka	Význam
$U$	$[V]$	Elektrické napětí
$I$	$[mA]$	Elektrický proud
$R$	$[\Omega]$	Elektrický odpor
$f$	$[Hz]$	Frekvence
$F$	$[N]$	Síla
$p$	$[Pa]$	Tlak
$A$	$[mm^2]$	Plocha
$m$	$[g]$	Hmotnost
$g$	$[m/s^2]$	Tíhové zrychlení
$t$	$[s]$	Čas
$l$	$[cm]$	Délka
$k_1$	$[Pa]$	Konstanta senzoru 1
$k_2$	$[Pa]$	Konstanta senzoru 2

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Popis grafenového aerogelu</b>	<b>3</b>
2.1	Grafen . . . . .	3
2.2	Aerogel . . . . .	4
2.3	Grafenový aerogel . . . . .	4
2.3.1	Získávání GA pomocí hydrotermální redukce . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Senzory z GA</b>	<b>7</b>
3.1	GA senzor s polyakrylonitrilovými nanovláknky . . . . .	7
3.2	GA senzor inspirovaný pavouky . . . . .	8
3.3	GA senzor vytvořený extruzí GA inkoustu . . . . .	9
3.4	Obdržené GA senzory z AV ČR . . . . .	9
3.4.1	Tvorba GA pro senzor . . . . .	10
3.4.2	Konstrukce taktilního senzoru . . . . .	10
3.4.3	Měření provedená na taktilním senzoru . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Jiné taktilní senzory</b>	<b>12</b>
4.1	Taktilní senzory založené na tunelovém jevu . . . . .	12
4.2	FSR senzory . . . . .	12
4.3	Optické taktilní senzory . . . . .	13
4.4	Kapacitní senzory . . . . .	13
4.5	Piezoresistivní taktilní senzory . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Metodika měření a chyby měření</b>	<b>15</b>
5.1	Měřené vlastnosti . . . . .	15
5.2	Výpočty nejistot – obecně . . . . .	15
5.3	Chyba měření hmotnosti . . . . .	16
5.4	Chyba měření elektrického odporu . . . . .	17
5.5	Chyba měření elektrického napětí . . . . .	17
5.6	Chyba měření elektrického proudu . . . . .	17

<b>6</b>	<b>Popis zprovoznění měřicí desky</b>	<b>19</b>
6.1	Popis měření můstkovou metodou . . . . .	19
6.2	Popis měřicí desky . . . . .	20
6.2.1	Komunikace s měřicí deskou . . . . .	20
6.3	Zprovoznění měřicí sestavy . . . . .	21
6.3.1	Ověření funkčnosti můstkového měření . . . . .	22
6.3.2	Nastavení zesílení a vzorkování ADC . . . . .	23
6.4	Akvizice dat z měřicí desky . . . . .	23
<b>7</b>	<b>Měření na senzorech první verze</b>	<b>25</b>
7.1	Popis senzoru . . . . .	25
7.2	Měření el. odporu nezátíženého senzoru . . . . .	25
7.3	Statické měření – můstková metoda . . . . .	26
7.4	Měření odtížení senzoru – můstková metoda . . . . .	28
7.5	Měření cyklického zatěžování – můstková metoda . . . . .	30
7.6	Zhodnocení měření . . . . .	30
<b>8</b>	<b>Měření na senzorech druhé verze</b>	<b>32</b>
8.1	Popis senzoru . . . . .	32
8.2	Měření el. odporu nezátíženého senzoru . . . . .	32
8.3	Statická měření v laboratorních podmínkách . . . . .	33
8.3.1	Změna napětí při konstantním proudu . . . . .	34
8.3.2	Změna proudu při konstantním napětí . . . . .	35
8.4	Statická zkouška – měření na můstku . . . . .	36
8.5	Dynamické vlastnosti senzoru . . . . .	38
8.6	Cyklická zkouška . . . . .	39
<b>9</b>	<b>Praktické aplikace</b>	<b>42</b>
9.1	Robotická aplikace . . . . .	42
9.1.1	Konstrukce . . . . .	42
9.1.2	Elektronické zapojení . . . . .	43
9.1.3	Řídicí program . . . . .	44
9.2	Aplikace měřicí váhy . . . . .	46
9.2.1	Konstrukce . . . . .	46
9.2.2	Elektronické zapojení . . . . .	46
9.2.3	Matematický model 1D váhy . . . . .	46
9.2.4	Řídicí program . . . . .	48
<b>10</b>	<b>Možnosti vylepšení měření</b>	<b>51</b>
10.1	Filtrace dat . . . . .	51
10.2	Návrh nové měřicí desky . . . . .	52

11 Závěr	54
Seznam literatury	56
Seznam obrázků	62
Seznam tabulek	63
Seznam příloh	65
Seznam použitého softwaru	65

# 1 Úvod

Tato práce si klade za cíl prozkoumat vlastnosti senzorů vytvořených z poměrně mladého a perspektivního materiálu - grafenového aerogelu. Vzhledem k postupující míře automatizace a robotizace procesů nejen v průmyslu (díky které se hovoří o 4. průmyslové revoluci, či Průmyslu 4.0) ale i v dalších oblastech lidského konání, jako je například lékařství, vyvstává potřeba nových taktilních senzorů z inovativních materiálů, které by umožňovaly měření od jemných a precizních až po náročné aplikace. Tím mohou být právě výše zmíněné senzory.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. Na první, teoretickou část, a následující, praktickou, část. Teoretická část má tři primární cíle. Zaprvé informovat o obecném principu fungování taktilních senzorů vytvořených z grafenového aerogelu. Zadruhé porovnat obdržené senzory z AV ČR s ostatními senzory vytvořenými ze stejného materiálu, tedy porovnat tyto senzory s ostatními senzory na bázi grafenového aerogelu. Zmíněné porovnání bude v této části provedeno na základě informací prezentovaných v odborných článcích [23] a [38]. Posledním cílem je poskytnout přehled jiných dostupných taktilních senzorů na odlišné bázi než grafenového aerogelu.

Praktická část se zaměřuje na experimentální měření na senzorech a jejich možného využití v praxi. Měření vlastností senzorů jako takových je provedeno pomocí tří různých metod. Nejprve byla změna odporu na senzorech odečítána pomocí digitálního multimetru. Další metodou bylo měření pomocí osciloskopu. V poslední metodě bylo využito měřicí desky s 1/4 můstkem, kterou navrhl a poskytl vedoucí práce.

Následně byly vytvořeny dvě ukázkové aplikace představující zástupce možných užití v praxi. První z praktických aplikací má za cíl nastínit možnosti užití v oblasti robotiky. Konkrétním příkladem bylo uchopování předmětů, nastavení zpětných vazeb ze senzorů a jejich využití pro imitaci jemné motoriky, která je lidem vlastní, avšak dosažení obdobného chování u manipulátorů je zatím stále výzvou. Druhá aplikace se pokouší přiblížit užití v oblasti měření. Byl navržen model váhy

využívající dva senzory k měření hmotnosti. Výhodou použití takovéto váhy může být velký rozsah a jednodušší konstrukce než u běžně používaných vah.

Poslední částí je závěr, který obsahuje rekapitulaci provedených měření, zhodnocení jejich výsledků, diskuzi o výhodách a nedostatecích grafenových sensorů pro různé aplikace, nastínění dalších vylepšení a užití v praxi do budoucna. Příloha obsahuje schémata zapojení, 3D modely a řídicí programy užitě k měření.

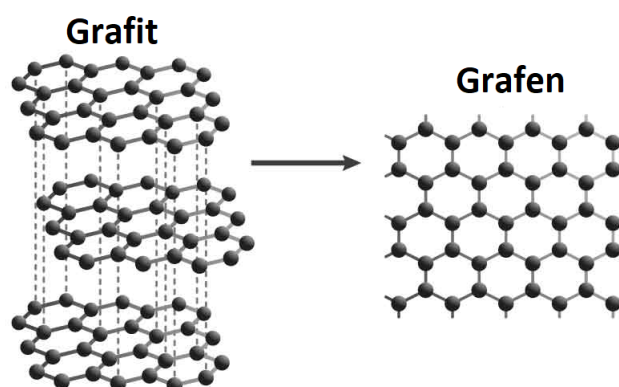
## 2 Popis grafenového aerogelu

Dříve než bude objasněn pojem grafenový aerogel (GA), je vhodné se prvně věnovat samostatně grafenu a aerogelu jako takovým.

### 2.1 Grafen

Grafen představuje zvláštní uskupení atomů uhlíku. Atomy jsou uskupeny do tvaru šestihranu. Jednotlivé atomy jsou mezi sebou navzájem propojeny pomocí kovalentní chemické vazby. Celé toto uskupení je v 2D rovině, přičemž výška tohoto uskupení je pouze velikost jednoho atomu uhlíku. Toto 2D uskupení je od svého okolí izolováno v takové míře, aby bylo možné prohlásit, že existuje samostatně. [11]

Na obr. č. 1 níže je na levé straně zobrazen grafit, což je 3D uskupení grafenu, které si lze pro zjednodušení představit jako spojení hranolů o šestihranné podstavě. V běžném životě lze grafit najít například jako součást tuhy do obyčejné tužky. Je zřejmé, že pokud by bylo možné izolovat samostatnou šestihrannou podstavu, byl by získán grafen. [11],[8]



**Obrázek 1:** Struktura grafitu a grafenu, převzato a upraveno z [41]

Již od svého objevení v roce 2004 byl grafen předmětem mnoha výzkumů. Důvodem je to, že díky své nezvyklé struktuře vykazuje excelentní mechanické a elektrické vlastnosti. Jedná se o nejsilnější materiál na světě s výbornou elektrickou

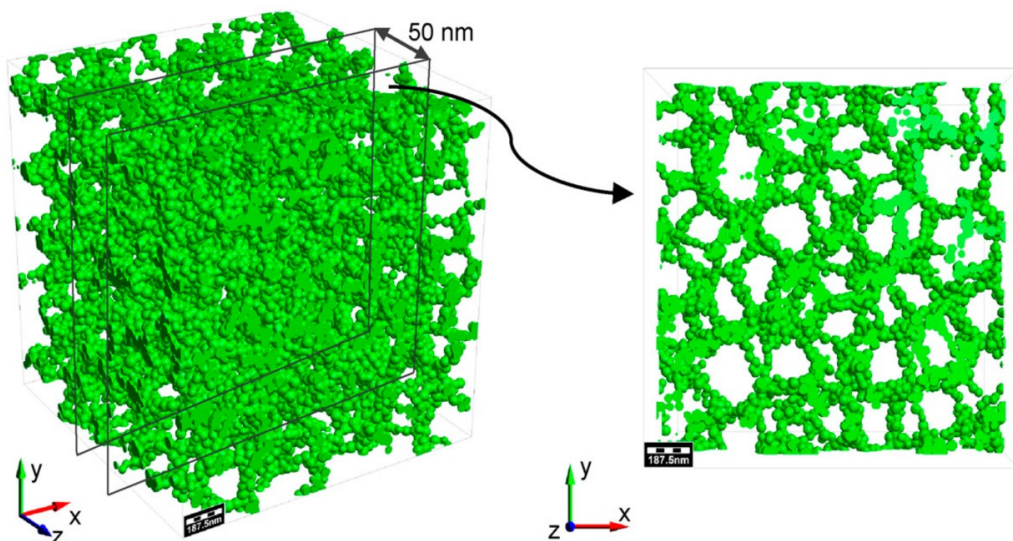
vodivosti. [11] Není proto divu, že za jeho objev byla již v roce 2010 udělena Nobelova cena za fyziku. [34]

## 2.2 Aerogel

Aerogel má mnoho definic. Dle [33] se jedná o gel, jehož kapalná složka byla nahrazena plynem. Gel je síť koloidních částic nebo síť molekul polymeru, ve které je zachycena kapalina. [21] Kapalná část gelu je procentuálně mnohem větší než pevná část. Výroba aerogelu je poměrně složitý proces, kterému se v této práci nebudeme věnovat. Je popsán v mnoha publikacích například v [40].

Aerogel tedy představuje vysokoporézní 3D struktury pyšníci se titulem nejlehčího materiálu pevného skupenství. Toho je docíleno právě díky vysokému obsahu plynu, kterým je často vzduch. [40]

První aerogel byl vytvořen na bázi oxidu křemičitého (tzv. *silica aerogel*) v roce 1931. [22] Struktura takového aerogelu je zobrazena na obr. č. 2.



**Obrázek 2:** Struktura aerogelu na bázi oxidu křemičitého – upraveno a převzato z [25]

Později bylo experimentováno s aerogely na mnoha bázích, přičemž jedna z nich je aerogel na bázi grafenu.

## 2.3 Grafenový aerogel

Jedná se o poměrně mladý materiál, který byl poprvé vytvořen v roce 2009 [43]. Materiál může mít nižší hustotu než vzduch, vysoké mechanické vlastnosti, výbornou vodivost a teplotní odolnost. Důležitou vlastností je piezoresistivita. [17],[12]



Původně se však nedařilo syntetizovat grafenový aerogel s vyšší hodnotou vodivosti. Vodivost nebyla špatná, ale zdaleka nebyla tak dobrá jako vodivost samotného grafenu. Tyto vodivosti se pohybovaly okolo  $5 \cdot 10^{-1}$  S/m. V roce 2010 byly v publikaci [44] poprvé zveřejněny výsledky syntézy GA s hodnotou vodivosti o několik řádů vyšší. Hodnoty této vodivosti se pohybovaly okolo  $1 \cdot 10^2$  S/m.

Stejně jako u aerogelů na bázi jiných materiálů, tak i GA má mnoho různých metod syntézy popsané například v [12]. Pro účely této práce je zbytečné věnovat se zmíněným procesům podrobněji. Přesto v návaznosti na budoucí kapitoly bude užitečné popsat základní myšlenku nejčastěji užívaného procesu získávání GA.

### 2.3.1 Získávání GA pomocí hydrotermální redukce

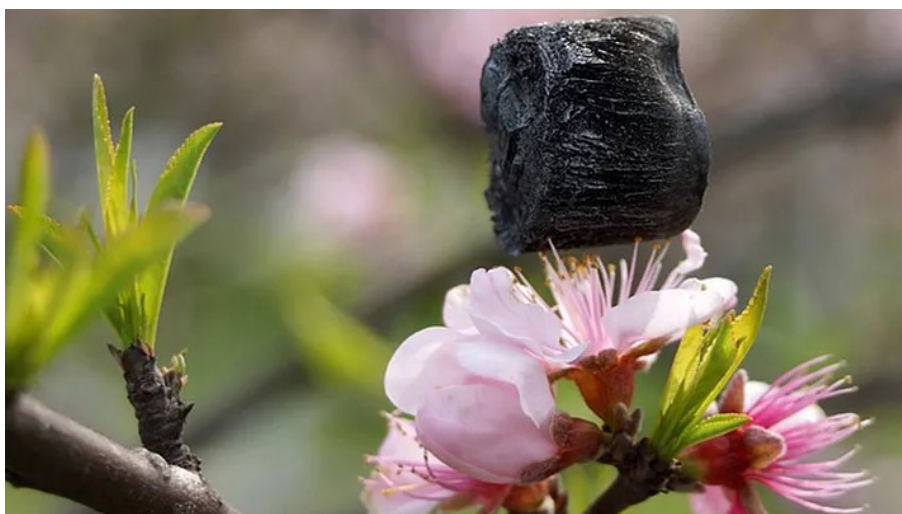
Výchozí surovinou je obvykle grafitový prášek. Silné oxidační činidlo je užito k oxidaci tohoto prášku na oxid grafenu – anglicky graphene oxide (GO). To je většinou skutečně modifikovanou Hummersovou metodou, jak popisují publikace [6], [12] a [20]. Pro tento proces je zapotřebí dosáhnout vysokých teplot a tlaků. K tomu slouží zařízení autokláv. Vodný roztok GO je v tomto přístroji zahříván za vysoké teploty několik hodin. Dle [47] stačí 12 hodin při  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tak je získán grafenový hydrogel. [12], [47]

Hydrogel je dle [21] definován jako gel, jehož kapalnou část tvoří voda. Vodný roztok GO, a z něj vytvořený GA, je zobrazen na obr. č. 3.



**Obrázek 3:** Proces přeměny vodného roztoku GO (nalevo) na grafenový hydrogel (napravo) – upraveno a převzato z [47]

V poslední fázi je potřeba nahradit vodní část v hydrogelu plynem, v našem případě vzduchem. Tak vznikne z grafenového hydrogelu grafenový aerogel. To se většinou provádí buď pomocí sublimačního sušení (anglicky *freeze drying*), anebo pomocí superkritického sušení (anglicky *supercritical drying*). Z důvodu návaznosti budoucích kapitol bude krátce popsán první uvedený proces, kdy je hydrogel rychle zmrazen na velmi nízké teploty. Poté je vytvořeno prostředí s tlakem nižším než trojný bod vodní páry. Díky tomu začne voda z hydrogelu sublimovat – přecházet z pevné fáze do plynné. Poté je postupně zpět přiveden tlak a výsledkem je ultralehký grafenový aerogel. [12], [37] Jeho nízká hustota je demonstrována posazením na okvětní lístek květiny na obr. č. 4.



**Obrázek 4:** Ultralehký grafenový aerogel usazený na květině – převzato z [29]

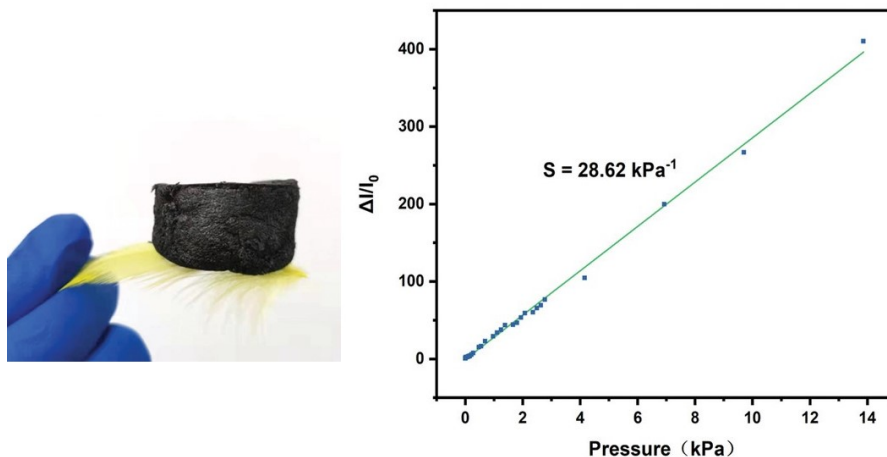
## 3 Senzory z GA

Díky zajímavým vlastnostem GA, zmíněných v kapitole 2.3, byla již od raných fází navrhována uplatnění v senzorech. Důvodem toho je zejména piezorezistivita GA, díky které lze měřit tlakové/tahové napětí pomocí měření změny odporu ([43], [44]). Jedním z vhodných uplatnění je tzv. taktilní senzor, zejména z výše popsaných důvodů. Jsou však navrhována také uplatnění například v elektrochemických senzorech. [48] Z důvodu tématu práce bude pojednáváno pouze o uplatnění GA v taktilních senzorech. První takové senzory na bázi GA byly prezentovány v [45] a [3]. Hlavním principem funkčnosti senzoru je měření změny odporu GA senzoru v závislosti na mechanickém zatížení, a to buď tahovém, nebo tlakovém.

Různí vědci experimentovali s různými formami GA pro tvorbu taktilních senzorů. Ve studii [45] bylo dokázáno, že vlastnosti těchto senzorů jsou ovlivněny dvěma hlavními parametry – koncentrací GO ve vodném roztoku GO a teplotou nastavenou pro sublimační sušení. Také bylo publikováno velké množství studií senzorů na bázi GA s různými příměsí v kombinaci s různými způsoby výroby. Tyto faktory ovlivňovaly strukturu GA, a tedy i vlastnosti senzoru z něj vyrobených. V další části bude uvedeno několik nejvíce citovaných studií na téma taktilních senzorů z GA.

### 3.1 GA senzor s polyakrylonitrilovými nanovlákný

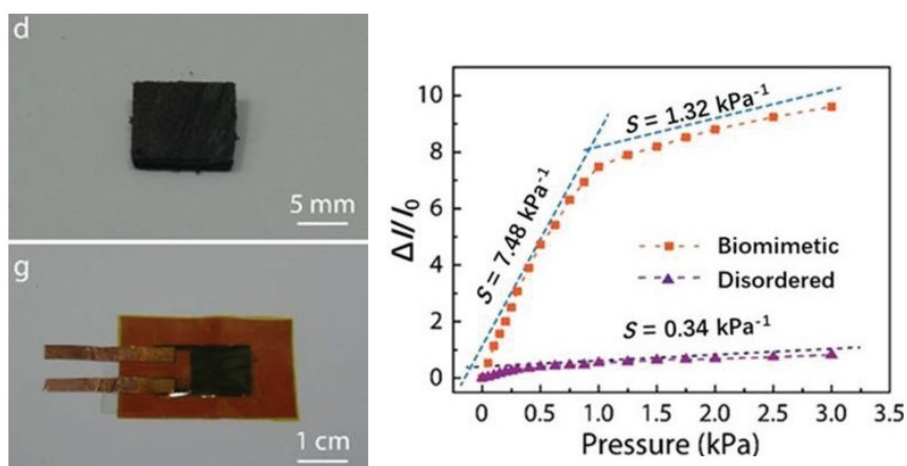
V této studii se snažili vědci zlepšit vlastnosti GA tak, že křehkou strukturu podpořili polyakrylonitrilovými nanovlákný. Byly hlášeny výsledky jako pevnost senzoru v tlaku  $43,54 \text{ kPa}^{-1}$  a konstantní citlivost senzoru na intervalu 0–14 kPa. Senzor má velmi dobrou odezvu cca 37 ms při zatížení 3 Pa v tlaku. Při cyklickém zatěžování 2600 cykly na hodnotu relativní deformace 20 % klesla hodnota výstupu senzoru na přibližně 91,57 % její původní hodnoty. Senzor, spolu s grafem lineární závislosti relativní změny proudu jako funkce tlaku, je zobrazen na obr. č. 5. [7]



Obrázek 5: Nalevo taktilní senzor, napravo citlivost senzoru – upraveno a převzato z [7]

### 3.2 GA senzor inspirovaný pavouky

Zde si výzkumníci vzali inspiraci z přírody, jmenovitě z pavouků, kteří pomocí chloupků na nohách dokáží detekovat kořist zachycenou v pavučinách. Senzor byl vytvořen z tenké vrstvy GA, která byla upevněna k elektrodám, mezi kterými se měřila změna odporu při mechanickém zatížení senzoru. Byly reportovány výsledky jako konstantní citlivost  $7,48 \text{ kPa}^{-1}$  na rozsahu 0–1 kPa a poté nižší citlivost  $1,32 \text{ kPa}^{-1}$  pro rozsahy 1–3 kPa. Časová odezva senzoru 31 ms, zpětné odpružení senzoru 38 ms s opakovatelností 1000 cyklů. Byla hlášena detekce tlakové síly už od 5 Pa. Senzor spolu s grafem lineární závislosti relativní změny proudu jako funkce tlaku je zobrazen na obr. č. 6. [30]



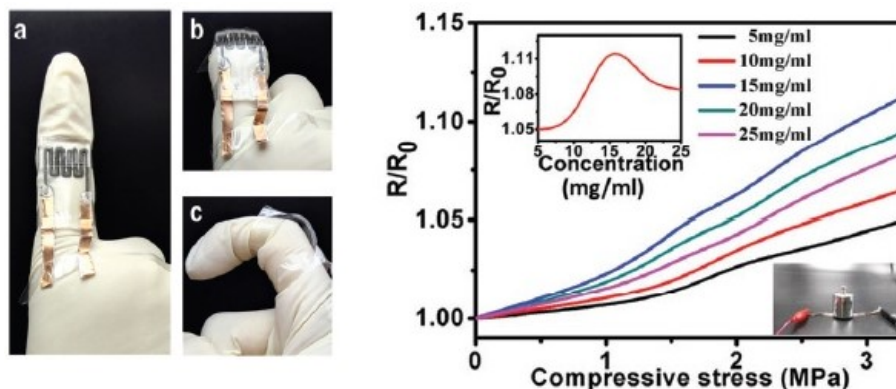
Obrázek 6: Nalevo taktilní senzor, napravo citlivost senzoru – upraveno a převzato z [30]

### 3.3 GA senzor vytvořený extruzí GA inkoustu

V této práci vědci zkonstruovali postup přípravy GA pomocí mikro extruze GO inkoustu zahřátého na 95 °C. V podstatě je GA natisknut na libovolnou tiskovou podložku, v případě této studie se jedná o PET proužek. [4] Na senzorech poté byla prováděna řada měření, přičemž vědci neuvádějí z hlediska senzoru tolik zajímavých hodnot parametrů senzoru jako ve studiích [7] a [30].

Senzory by se mohly využít například pro překlad znakové řeči. Vědci vytvořili rukavici obsahující jeden senzor pro každý prst a z výstupu těchto senzorů s poměrně vysokou přesností určovali, který symbol znakové řeči ruka s rukavicí aktuálně ukazuje. [4]

Senzor, spolu s naměřeným grafem relativní změny odporu v závislosti na tlaku, je zobrazen na obr. č. 7.



**Obrázek 7:** Nalevo taktilní senzor, napravo graf relativní změny odporu v závislosti na tlaku – upraveno a převzato z [4]

### 3.4 Obdržené GA senzory z AV ČR

Jednou z hlavních nevýhod GA je jeho malá hodnota maximálního relativního prodloužení v tahu.

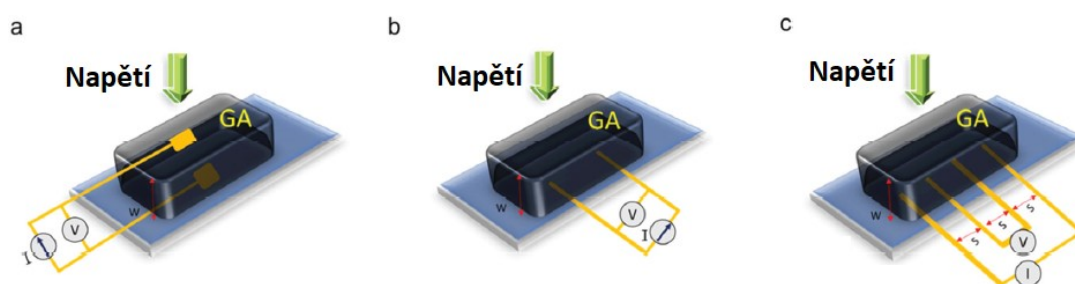
Vědci z AV ČR ve studiích [23], [38] popisují vliv vysokoteplotního žhání na strukturu a mechanické vlastnosti GA. Studie prokazuje pozitivní vliv tohoto procesu na maximální hodnotu relativního prodloužení v tahu. V této části bude nejdříve popsán proces získání GA užitého k výrobě senzorů. Dále bude přiblížena samotná konstrukce senzoru. Poslední fáze bude věnována měření a měřené vlastnosti senzoru reportované týmem z AV ČR.

### 3.4.1 Tvorba GA pro senzor

GA byl získán pomocí metody hydrotermální redukce popsané v kapitole 2.3.1. Vodný roztok GO byl získán rozpuštěním GA v deionizované vodě v poměru  $2 \text{ mg/ml}^{-1}$ . Roztok byl poté 30 minut ultrasonicky míchán, čímž došlo k vytvoření homogenního roztoku. Následně byl roztok umístěn v autoklávu při teplotě  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , kde došlo k vytvoření grafenového hydrogelu. Ten byl poté transformován na GA užitím sublimačního sušení. Proces sušení probíhal ve vakuu  $0,2 \text{ mbar}$  za teploty  $-70^\circ\text{C}$  po dobu 16 hodin. Takto získaný GA byl poté upraven za pomoci žíhání. To probíhalo ve vakuu  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$  při teplotě  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 minut. K tomuto účelu byla použita podomácku vyrobená pec. Zdrojem tepla byl střídavý proud v rozsahu 0-150 A.

### 3.4.2 Konstrukce taktilního senzoru

Takto získaný GA byl poté nakrájen na menší kousky krychlového tvaru o velikosti strany 0,5-2 mm. Takto naporcovaný GA byl uchycen k dvěma měděným kontaktům a spojen s nimi za pomoci vodivého epoxidového lepidla. Bylo navrženo více způsobů uchycení měděných kontaktů. Jednotlivé způsoby jsou zobrazeny na obr. č. 8. Nalevo je zobrazeno uchycení, kdy je GA vložen mezi dva kontakty. Uprostřed je konfigurace, kde jsou dva kontakty položeny na podložce a GA je přidělán k oběma kontaktům z jedné strany. Napravo se nachází uchycení senzoru ke čtyřem kontaktům. [23], [38]



**Obrázek 8:** Různé konfigurace uchycení pinů – upraveno a převzato z [23]

Senzor byl poté umístěn do modrého plastového obalu. Později však byly získány senzory bez tohoto obalu, jelikož se ukázalo, že dynamika deformace těchto obalů nepříznivě ovlivňuje hodnotu výstupního odporu senzoru. Podrobnější popis senzoru, které byly poskytnuty pro účely této práce jsou v kapitolách 7 a 8.

### 3.4.3 Měření provedená na taktilním senzoru

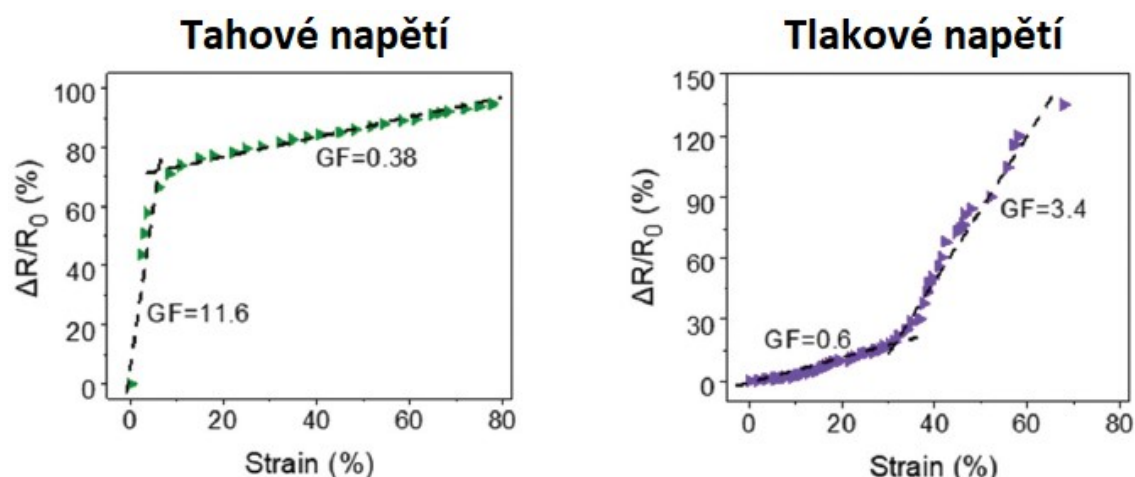
Veškerá měření týmu AV ČR byla prováděna za konstantního napětí 0,01 V, anebo za konstantního proudu 0,1-0,5 A. Byla změřena závislost relativní změny proudu/odporu na aplikovaném napětí (a to jak pro tah, tak pro tlak). Dále byla změřena rychlost odezvy senzoru, a cyklické zatížení senzoru po dobu 5000 opakování. [23], [38]

Studie [23] a [38] reportují pozitivní vliv vysokoteplotního žíhání mechanické vlastnosti GA. Je vyvozován závěr, že žíhání vede ke vzniku vyššího množství silných kovalentních vazeb, které zlepšují pevnost GA v tahu a tlaku. Dále jsou reportovány vysoké rozsahy použitelnosti GA senzorů – 0-0,55 MPa pro tah a 0-1,18 MPa v tlaku. Výstup senzoru byl stabilní i po 5000 opakování cyklu zatížení/odtížení senzoru. Senzor reagoval na změny zatížení během  $5,2 \cdot 10^{-4}$  s. [23], [38]

Senzory mají také vysokou citlivost. Hodnoty deformačních citlivostí (anglicky *gauge factor*) jsou v rozsahu 0,38–11,6 pro tlaková napětí a 0,6–3,4 pro tahová napětí. Deformační citlivost  $GF$  je dle [5] poměr relativní změny odporu ku relativní změně délky. Tuto závislost popisuje vztah č. 3.1. [23], [38]

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (3.1)$$

Pro lepší demonstraci významu citlivosti, jsou na obrázku níže uvedené grafy naměřených hodnot, kde deformační citlivost značí směrnici tečny.



**Obrázek 9:** Naměřené hodnoty deformační citlivosti pro tah a tlak – upraveno a převzato z [23]

## 4 Jiné taktilní senzory

Existuje mnoho druhů taktilních senzorů pracujících na různých fyzikálních principech. Základní dělení senzorů dle CIT je:

1. Taktilní senzory založené na tunelovém jevu
2. Resistivní taktilní senzory
3. Kapacitní taktilní senzory
4. Optické taktilní senzory
5. Taktilní senzory založené na ultrazvuku
6. Taktilní senzory založené na magnetismu
7. Taktilní senzory založené na piezorezistivitě
8. Taktilní senzory založené na jiných principech

Všechny typy mají své výhody a nevýhody, podrobněji je o jednotlivých typech pojednáno v pracích [9] a [15]. V této části se zaměříme na pár vybraných příkladů taktilních senzorů a uvedeme si vlastnosti senzoru a princip, na kterém funguje.

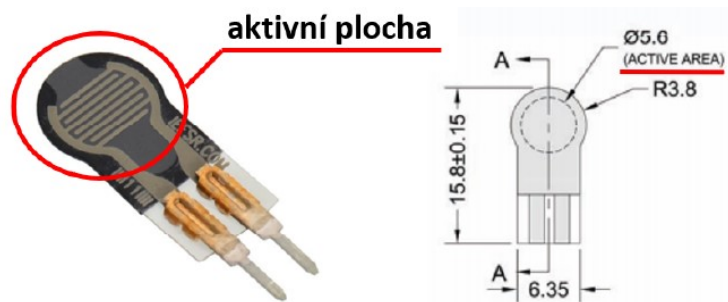
### 4.1 Taktilní senzory založené na tunelovém jevu

Tyto senzory se při tlaku mění z elektrického izolantu na vodič. Dvě styčné plochy senzoru nikdy nepřichází do styku, avšak tlakem se k sobě přiblíží na takovou vzdálenost, že mezi styčnými plochami začne vlivem tunelového jevu procházet proud. Ve studii [26] byl reportován senzor založený na tomto jevu. Ten je schopen vnímat tvary při tlakovém napětí cca 9 kPa. [9]

### 4.2 FSR senzory

Jedná se o typ resistivních taktilních senzorů k detekci tlakového napětí. Toto napětí způsobuje změnu odporu mezi piny senzoru. Lze detekovat, že působí na senzor tlakové napětí. Bohužel je kvůli nelinearitě senzoru obtížné určit, jakou hodnotu toto napětí má. Senzor je ekonomicky velmi dostupný. Příklad, jak senzor může vypadat, je zobrazen na obr. 10. [9]

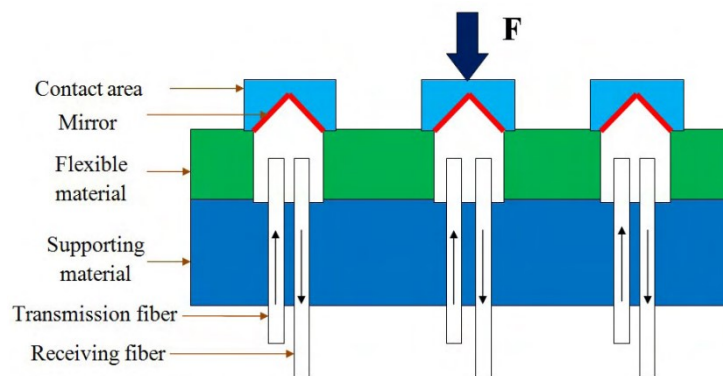




Obrázek 10: Naměřené hodnoty deformační citlivosti pro tah a tlak – převzato z [36]

### 4.3 Optické taktilní senzory

Tyto senzory užívají ve vyhodnocení tlakového napětí materiály o různých indexech lomu. Světlo se na rozhraní těchto materiálů bude lámat, čehož lze využít k vyhodnocení působící tlakové síly. Nejčastěji užívané mechanismy získání výstupů senzoru jsou *light intensity modulation* a technologie *fiber Bragg grating (FBG)*. Popis prvního uvedeného mechanismu je na obr. 11 níže.



Obrázek 11: Princip mechanismu *light intensity modulation* - převzato z [46]

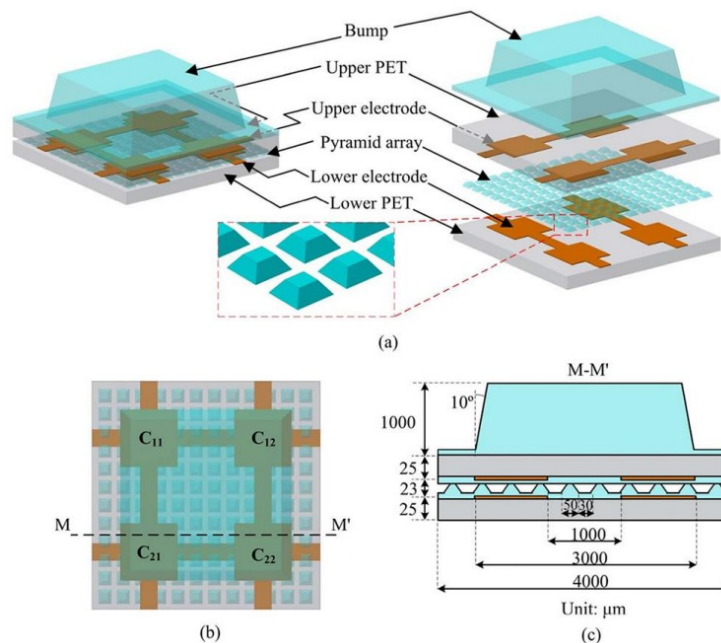
Vrchní plocha je vlivem tahového napětí deformována, což mění směr vnitřní reflektivní vrstvy. Tím se mění intenzita světelného paprsku uvnitř výstupního kanálu. Hodnota této intenzity je poté zaznamenána světlocitlivou buňkou a z toho je odvozena hodnota působící síly na vrchní ploše. [9], [15]

### 4.4 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory jsou jedny z nejčastěji užívaných druhů taktilních senzorů. Kapacita deskového kondenzátoru je definována vztahem 4.1 jako

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (4.1)$$

,kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  $\epsilon_r$  je relativní permitivita dielektrika,  $S$  je plocha desky a  $d$  je vzdálenost desek kondenzátoru. Tlakovou změnou vzdálenosti desek  $d$  se změní kapacita kondenzátoru, čehož se v těchto senzorech využívá. Díky poměrně jednoduché konstrukci lze z těchto senzorů vytvářet pole senzorů pro detekci bodových dotyků napříč plochou. Existuje mnoho návrhů jednotlivých typů konstrukcí, například pyramidová konstrukce obsahující 4 kondenzátory zobrazená na obr. 12. [9], [15]



**Obrázek 12:** Pyramidová konstrukce kapacitního senzoru - převzato z [24]

## 4.5 Piezoresistivní taktilní senzory

Tyto senzory akumulují elektrický náboj v závislosti na tlakovém napětí, kterým je sensor zatěžován. Jedním z hojně užívaných materiálů je polymer Polyvinyliden fluorid (PVDF), který je populární díky dobré flexibilitě a chemické stabilitě. Největší nevýhodou těchto senzorů je jejich teplotní stabilita. Taktilní sensor na bázi PVDF byl prezentován například ve studii [16]. [9]

# 5 Metodika měření a chyby měření

V této části bude popsána metodika a chyby měření. Veškerá měření probíhala při pokojové teplotě, vlhkosti a běžné hodnotě atmosférického tlaku. Měření probíhala vždy v uzavřené místnosti. Nikdy neprobíhala na přímém slunečním záření. Výpočty jsou běžně zaokrouhlovány na 3 platné číslice, pro obzvláště důležité výpočty bude zaokrouhlováno na více platných číslic. K stanovení chyby měření byla užitá teorie nejistot. Zaokrouhlení u nejistot je prováděno vždy nahoru. Následující podkapitoly budou věnovány výpočtu nejistot měřených veličin.

## 5.1 Měřené vlastnosti

Na senzorech první verze byla veškerá měření prováděna pomocí můstkové metody, o které bude pojednáno v nadcházející kapitole 6.1. Byla měřena změna napětí vyvolaná změnou odporu senzoru, kterou vyvolala mechanická deformace (piezoresistivita). Na druhé verzi byla také užitá můstková metoda. Navíc však byla provedena měření změny napětí/proudu při konstantní hodnotě proudu/napětí. U obou verzí senzoru byla změřena hodnota elektrického odporu v nezátíženém stavu. Dále bylo rozhodnuto, že budou prováděna měření pouze při tlakovém zatížení senzorů. Tahové zatížení je vynecháno, protože není spolehlivý způsob, jak poskytnuté senzory tahově namáhat tak, aby nedošlo k nevratnému poškození senzoru. Toto rozhodnutí bylo provedeno po konzultaci s pracovníky AV ČR.

## 5.2 Výpočty nejistot – obecně

V této části jsou vysvětleny výpočty chyb měření pro různé měřené veličiny. K tomu je užitá teorie nejistot. Měřené hodnoty jsou hmotnost, elektrický odpor, elektrické napětí a elektrický proud. Vzorce pro výpočty nejistot jsou převzaty z publikace [31].

Nejistota typu A se počítá užitím následujících vztahů

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5.1)$$

,kde  $n$  je celkový počet opakovaných měření  $x_i$  a  $\bar{x}$  je výběrový průměr vypočtený jako

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (5.2)$$

Nejistota typu B se obecně získá dle vzorce

$$u_B = \frac{\Delta}{k} \quad (5.3)$$

,kde  $\Delta$  je polovina přesnosti (rozlišení) a  $k$  je koeficient popisující použité rozdělení pravděpodobnosti. Pro všechny měřené veličiny bude platit  $k = \sqrt{3}$ , což značí rovnoměrné rozložení pravděpodobnosti typické pro digitální měřidla obsahující ADC.

Kombinovaná nejistota typu C se poté vypočte jako

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (5.4)$$

Ve všech výpočtech nejistot bude užitá rozšířená standardní nejistota, v jejímž intervalu se skutečná hodnota nachází s pravděpodobností přibližně 95,45 %. Spočítá se jako

$$U = 2 \cdot u_c. \quad (5.5)$$

Výsledky budou v práci zapisovány jako výběrový průměr ( $\bar{x}$ )  $\pm$  rozšířená standardní nejistota ( $U$ ).

### 5.3 Chyba měření hmotnosti

Hmotnost je měřena digitální vahou *Siguro SC-J640*. Výrobce v návodu udává přesnost váhy 0,01 g. [39] Nejistotu typu B spočítáme dle vztahu 5.3 jako

$$u_B = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} \doteq 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ g}. \quad (5.6)$$

## 5.4 Chyba měření elektrického odporu

Elektrický odpor je měřen digitálním multimetrem *Pro'sKit MT-1710* s automatickým nastavením měřicích rozsahů. Výrobce v návodu [35] udává pro následující rozsahy přesnosti v tab. č. 5.1.

Rozsah	Rozlišení	Přesnost
400 $\Omega$	0,1 $\Omega$	$\pm(0,8 \% \textit{reading} + 5 \textit{digit})$
4 k $\Omega$	1 $\Omega$	$\pm(0,8 \% \textit{reading} + 4 \textit{digit})$
40 k $\Omega$	10 $\Omega$	$\pm(0,8 \% \textit{reading} + 4 \textit{digit})$
400 k $\Omega$	100 $\Omega$	$\pm(0,8 \% \textit{reading} + 4 \textit{digit})$
4 M $\Omega$	1 k $\Omega$	$\pm(0,8 \% \textit{reading} + 4 \textit{digit})$
40 M $\Omega$	10 k $\Omega$	$\pm(1,2 \% \textit{reading} + 10 \textit{digit})$

**Tabulka 5.1:** Přesnost multimetru při měření el. odporu

Dle této tabulky je možné dopočítat chybu měření a zapsat ji ve formě *měřená hodnota (reading)  $\pm$  chyba měření* spočtená jako součet procentuální části z měřené hodnoty a určitého počtu digitů. Digitem se rozumí nejmenší dílek stupnice, přičemž v horní tabulce je to hodnota rozlišení.

## 5.5 Chyba měření elektrického napětí

Užitý osciloskop pro měření hodnot napětí byl *OWON XDS3104AE*. Jedná se o digitální osciloskop s vertikálním rozlišením až 14 bitů. Výrobce v manuálu udává průměrnou chybu měření  $\pm 3 \% \textit{reading} + 0,05 \textit{div}$ , kde *div* (division) je parametr nastavitelný pomocí vertikální stupnice. Na daném osciloskopu lze tento parametr nastavit na hodnoty 10 mV/div až 100 V/div. Chybu měření napětí je tedy možné zapsat ve formě *měřená hodnota (reading)  $\pm$  0,05  $\cdot$  div*.

## 5.6 Chyba měření elektrického proudu

Pro měření elektrického proudu byl užit stejný multimetr jako pro měření elektrického odporu. Měřicí rozsahy jsou opět nastavovány automaticky. Výrobce v návodu [35] udává pro následující rozsahy přesnosti v tab. č. 5.2.

Rozsah	Rozlišení	Přesnost
400 $\mu\text{A}$	0,1 $\mu\text{A}$	$\pm(1,0 \% \textit{reading} + 10 \textit{digit})$
4000 $\mu\text{A}$	1 $\mu\text{A}$	$\pm(1,0 \% \textit{reading} + 10 \textit{digit})$
40 mA	10 $\mu\text{A}$	$\pm(1,2 \% \textit{reading} + 8 \textit{digit})$
400 mA	100 $\mu\text{A}$	$\pm(1,2 \% \textit{reading} + 8 \textit{digit})$
10 A	10 mA	$\pm(1,0 \% \textit{reading} + 10 \textit{digit})$

**Tabulka 5.2:** Přesnost multimetru při měření el. proudu

Dle této tabulky je možné dopočítat chybu měření a zapsat ji ve formě *měřená hodnota (reading)  $\pm$  chyba měření* spočtená jako součet procentuální části z měřené hodnoty a určitého počtu digitů.

## 6 Popis zprovoznění měřicí desky

V mnoha robotických či průmyslových aplikacích nelze k měření použít velký a drahý osciloskop, případně multimetr. Důvody jsou ekonomické či pouze velikostní. Je potřeba mít možnost vyhodnocovat vstup ze senzoru menším a levnějším způsobem. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto užít pro část měření a aplikační úlohy můstkovou metodu. Ta spočívá v měření napětí v můstkovém zapojení, užitím malé součástky A/D převodníku (ADC). V následující kapitole bude uvedeno, jak přesně zmíněné můstkové zapojení vypadá.

Tato kapitola si klade za cíl popsat princip měření pomocí můstkového zapojení, představit užitou měřicí desku, popsat proces zprovoznění této měřicí desky a v neposlední řadě proces získávání měřených dat z této desky.

### 6.1 Popis měření můstkovou metodou

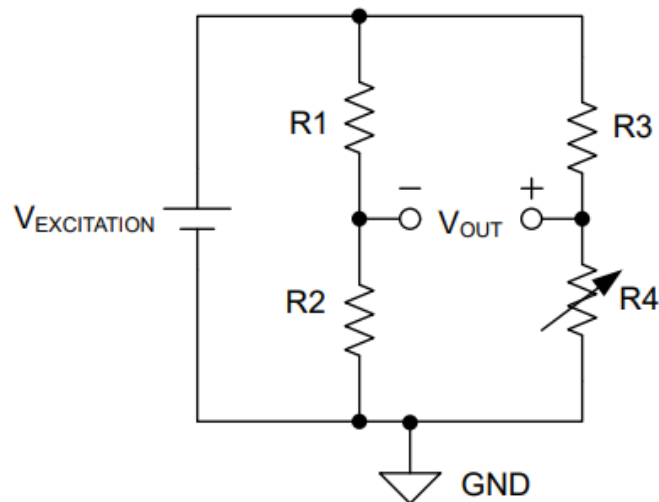
Cílem této kapitoly je stručné seznámení se s principem měření pomocí můstkového zapojení, někdy též nazývaného jako Wheatstoneův můstek. Jedná se o nulovou měřicí metodu, kdy měříme rozvážení měřeného můstku. Tento můstek tvoří čtyři rezistory, z nichž tři tyto rezistory jsou známé (známe hodnotu jejich elektrického odporu) a čtvrtý rezistor má proměnnou neznámou hodnotu elektrického odporu. Ten může představovat například tenzometr nebo, jako v našem případě, GA senzor. Zapojení můstku je představeno na obr. č. 13.

Pokud je můstek vyvážený, pak je měřené napětí rovné nule. Zároveň v tomto okamžiku platí rovnice rovnováhy můstku (rovnice č. 6.1).

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (6.1)$$

V okamžiku, kdy dojde k vychýlení, budeme měřit nenulové napětí rovno hodnotě

$$V_{out} = V_{EXCITATION} \left[ \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]. \quad (6.2)$$



**Obrázek 13:** Zapojení Wheatstoneova můstku, převzato z [18]

Rezistory zapojené do můstku (na schématu měřicí desky se jedná o rezistory R11, R12 a R13) měly původně hodnotu elektrického odporu 1 k $\Omega$ . Toto bylo vzhledem k měřeným změnám odporu nepraktické, proto byly rezistory nahrazeny rezistory s hodnotou 51,1  $\Omega$  a přesností  $\pm 0,1$  %.

## 6.2 Popis měřicí desky

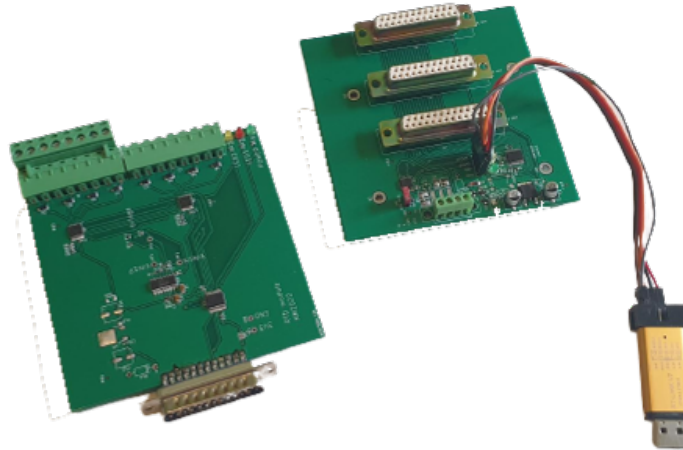
Pro měření byla použita měřicí deska, kterou navrhl a poskytl vedoucí práce. Hlavní části desky jsou Wheatstoneův můstek (princip fungování byl popsán v kapitole 6.1), jehož výstup je připojený k 24bitovému Analog-to-digital converter (ADC) NAU7802. Konfigurace ADC proběhla pomocí sběrnice  $I^2C$ . Na desce je také 8bitový rozšiřovač vstupů/výstupů MCP23008. Tento rozšiřovač byl také ovládán pomocí sběrnice  $I^2C$ . Čtyři výstupy z rozšiřovače jsou připojeny na dva multiplexory *TMUX1108*, pomocí kterých lze přepínat vstupní analogový signál, který je poté měřen pomocí můstkové metody. Schéma zapojení hlavní desky je na příloženém CD. Měřicí deska je zobrazena na levé části obr. 14. K měřicí desce se připojovalo různými způsoby.

### 6.2.1 Komunikace s měřicí deskou

Pro měření na senzorech první verze (kapitola 7) se s měřicí deskou komunikovalo jejím připojením k hlavní desce, kterou taktéž navrhl a poskytl vedoucí práce. Tato deska obsahuje mikrokontrolér STM řady *STM32F070F6Px*, který představoval *master* zařízení sběrnice  $I^2C$ . Multiplexor i ADC na měřicí desce

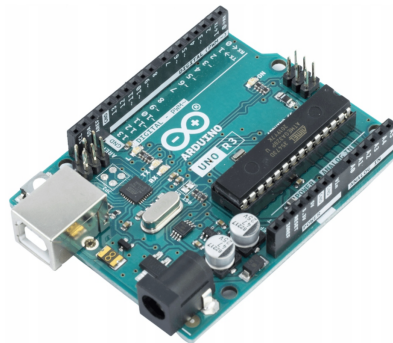


představovaly *slave* zařízení. STM mikrokontrolér byl programován pomocí Serial Wire Debug (SWD) rozhraní. Hlavní program byl psán v jazyce *ANSI C* a nahráván z PC do mikrokontroléru pomocí programátoru *ST-Link V2*. Schéma zapojení měřicí desky je na příloženém CD. Hlavní deska je zobrazena napravo na obr. č. 14.



**Obrázek 14:** Měřicí deska nalevo, hlavní deska s připojeným programátorem napravo

Pro měření na senzorech druhé verze (kapitola 8) byla hlavní deska nahrazena vývojovou deskou Arduino Uno, která též může figurovat jako master zařízení na sběrnici  $I^2C$ . Tato vývojová deska je zobrazena na obr. č. 15.



**Obrázek 15:** Užitá vývojová deska Arduino Uno, převzato z [42]

### 6.3 Zprovoznění měřicí sestavy

V návrhu desky byly nalezeny dvě chyby způsobující nefunkčnost desky. První chybou byla špatná orientace pinů konektoru, kterým se připojovala měřicí deska k hlavní desce. To způsobilo zkrat datového pinu Serial Data (SDA) sběrnice  $I^2C$  spolu s hodinovým pinem Serial Clock (SCL) sběrnice  $I^2C$ . Oprava byla provedena

přepájením konektoru. Podrobnější popis chyby je zdokumentován v PDF souboru schématu zapojení, který je součástí příloženého CD.

Dále bylo objeveno, že dva multiplexory přítomné na měřicí desce jsou ovládány shodnými signály. Pokud by tedy byl aktivován vstup číslo 1 na prvním multiplexoru, bude aktivován i vstup číslo 1 na druhém multiplexoru. Tento problém byl odstraněn tak, že Enable (EN) pin druhého multiplexoru byl přesměrován na GP3 pin rozšiřovače vstupů/výstupů. Podrobnější popis chyby je také zdokumentován v PDF souboru schématu zapojení, který je součástí příloženého CD.

Dále bylo potřeba napsat kód k ovládání rozšiřovače vstupů/výstupů a ADC. To bylo provedeno dle instrukcí v datasheetech jednotlivých komponent. [32], [28], [19] Kód pro ovládání ADC byl vytvořen na základě knihovny v jazyce *C++* dostupné na [1].

Po zprovoznění měřicí desky do stavu, kdy bylo možné vyčítat měřená data z ADC bylo potřeba ověřit správnost těchto dat a tedy funkčnost můstkového měření.

### 6.3.1 Ověření funkčnosti můstkového měření

Ověření funkčnosti můstkového měření bylo provedeno měřením na odporové dekádě, kde na vstup můstku byly nastaveny postupně hodnoty 800, 900, 1000, 1100 a 1200  $\Omega$ . Toto měření bylo provedeno postupně pro každý kanál měřicí desky. Kanálů je celkem osm a přepíná se mezi nimi pomocí dvou multiplexorů, jak bylo popsáno v kapitole 6.2. Ovládání obou dvou multiplexorů nezávisle na sobě bylo umožněno úpravou spoje zmíněná v kapitole 6.3. Prakticky bylo přepnutí kanálů realizováno vždy úpravou řídicího kódu a jeho nahráním do mikrokontroléru.

V době měření byly na měřicí desce zapojeny do můstku rezistory s elektrickým odporem 1 k $\Omega$ . Jelikož se jednalo pouze o měření k ověření funkčnosti, bylo každé měření provedeno pouze jedním odečtem. Výsledné hodnoty vyčtené z 24bitového ADC jsou zpracovány v tabulce 6.1 níže.

Při připojených 1000  $\Omega$  by za ideálních podmínek byla splněna rovnice rovnováhy můstku 6.1, měřené napětí by bylo nulové a hodnota z ADC by byla rovněž nulová. Je vidět, že průměrná hodnota z ADC při této hodnotě je při zaokrouhlení na celá čísla -28291. Toto se může zdát jako velká nepřesnost, ale vezmeme-li v úvahu všech  $2^{24} = 16777216$  možných kombinací, tak počítáme s relativní chybou  $28291 : 16777216 \doteq 0,168 \%$ , což je pro potřeby diplomové práce dostačující přesnost. Z výše uvedeného je patrné, že i nepřesnosti na různých kanálech jsou pro nás zanedbatelné, jelikož jsou oproti měřicímu rozsahu menší než 0,1 %. Celkově se můstek chová lineárně, což je zobrazeno na obr. č. 16. Na daném obrázku je též vyobrazené zprůměrování hodnot a lineární aproximace funkce pomocí

	800 $\Omega$	900 $\Omega$	1000 $\Omega$	1100 $\Omega$	1200 $\Omega$
<b>Kanál 1</b>	908854	417182	-26423	-429479	-793074
<b>Kanál 2</b>	909435	417719	-26376	-428436	-794025
<b>Kanál 3</b>	910082	418234	-25363	-428098	-794640
<b>Kanál 4</b>	910448	418864	-25447	-426142	-794608
<b>Kanál 5</b>	901256	410212	-33418	-436354	-802600
<b>Kanál 6</b>	907421	414043	-27839	-429886	-793957
<b>Kanál 7</b>	899937	409072	-33685	-434350	-806656
<b>Kanál 8</b>	908384	413119	-27776	-429117	-797142

**Tabulka 6.1:** Naměřené hodnoty z ADC pomocí odporové dekády

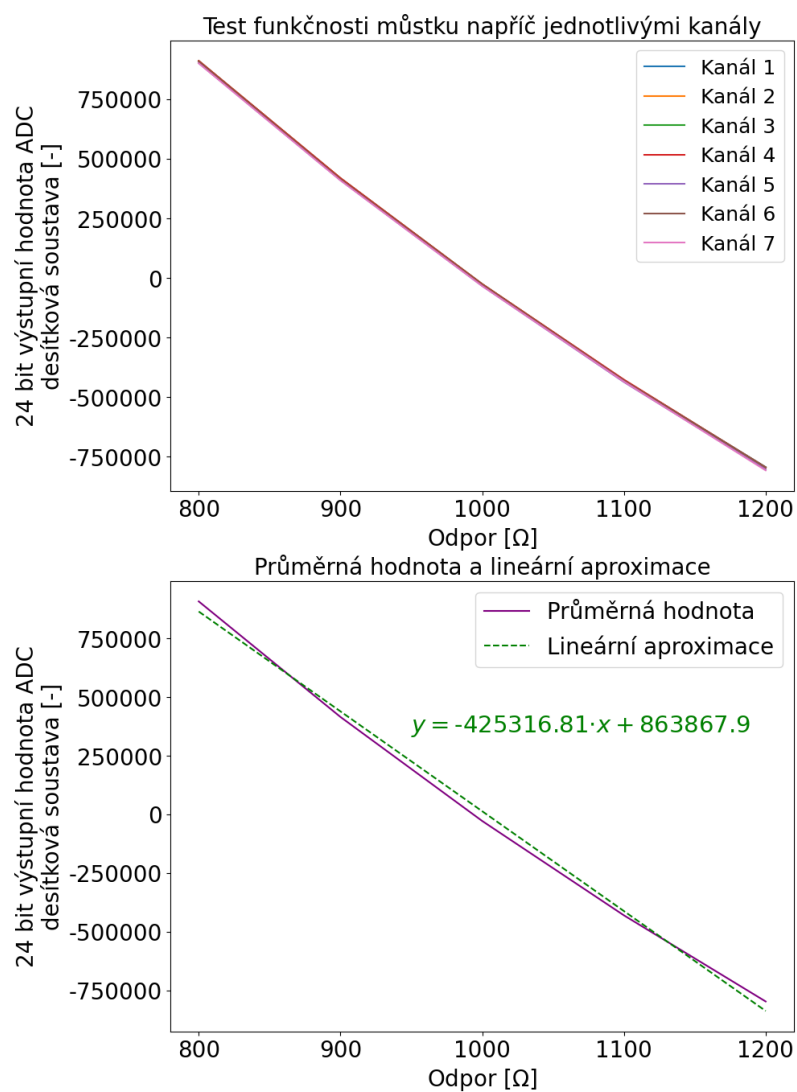
metody nejmenších čtverců. Toho bylo dosaženo pomocí pomocného skriptu psaného v jazyce *Python*.

### 6.3.2 Nastavení zesílení a vzorkování ADC

Skrze vnitřní registry lze nastavit vnitřní zesílení měřeného signálu ADC. Stejně tak lze nastavit vzorkovací frekvenci signálu. Bylo rozhodnuto nezesilovat signál a zesílení ponechat na hodnotě 1. Změny elektrického odporu u senzorů první i druhé verze byly tak velké, že při nastavení vyššího zesílení než 1 bylo zesílené měřené napětí tak markantní, že jsme se pohybovali na horní/dolní hranici rozsahu ADC. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 10 Hz.

## 6.4 Akvizice dat z měřicí desky

Měřené hodnoty z digitální váhy nebo multimetru byly odečteny z displeje. V případě měření pomocí měřicí desky v kombinaci s hlavním deskou byla data vyčítána pomocí rozhraní SWD. K vyčítání dat byl užit program *STMStudio*. Data byla uložena do textového souboru, ze kterého následně byla ke zpracování vyčítána pomocí skriptu vytvořeného v programovacím jazyce *Python*. Při užití desky *Arduino Uno* byla data vyčítána pomocí rozhraní Universal asynchronous receiver-transmitter (UART) a poté ukládána do textového souboru.



**Obrázek 16:** Testování měřícího můstku a lineární aproximace

# 7 Měření na senzorech první verze

Kapitola se věnuje návrhu experimentů a měření na senzorech první verze.

## 7.1 Popis senzoru

Měření probíhalo ve dvou částech. V první části probíhalo měření na dvou senzorech staršího typu. Tyto senzory byly charakteristické modrým neprůhledným obalem a budou v práci dále označovány jako první verze senzorů. Obsahují menší kvádr GA, k jehož podstavě jsou z každého konce přilepeny měděné kontakty. Tyto kontakty se navzájem nedotýkají, ale oba dva jsou v kontaktu s podstavou kvádrů z GA. Celá tato sestava je obalena v ochranné modré pásce, viz obr. č. 25 vlevo. O měření na senzorech první verze bude pojednáno v této kapitole.

V druhé části měření byly pracovníky AV ČR poskytnuty dva senzory novějšího druhu. Ty řeší problémy spojené s první verzí senzorů. V práci budou tyto senzory nadále označovány jako druhá verze senzorů. O měření na senzorech druhé verze pojednává samostatná kapitola 8.

## 7.2 Měření el. odporu nezatíženého senzoru

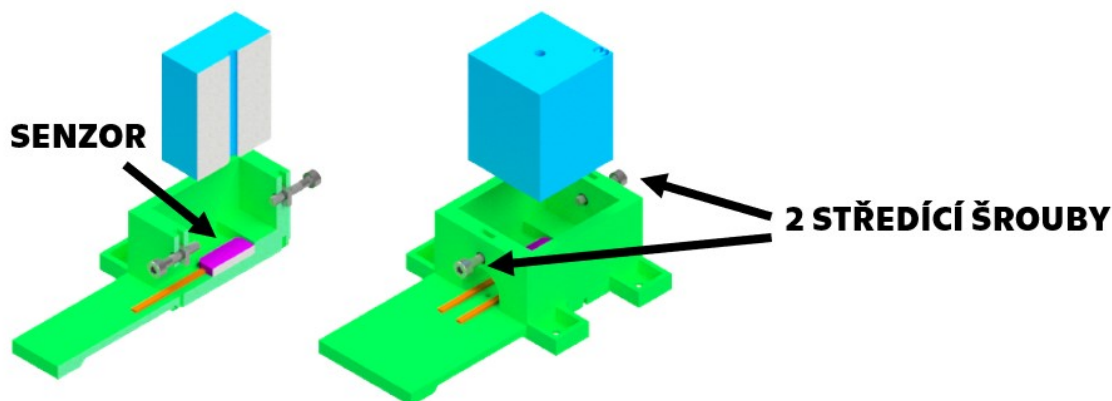
Klidový elektrický odpor senzorů byl změřen v nezatíženém stavu. Naměřené hodnoty jsou v tab. č. 7.1.

Senzor č.	El. odpor v nezatíženém stavu $\Omega$
1	$100,4 \pm 1,31\Omega$
2	$215,5 \pm 2,23\Omega$

**Tabulka 7.1:** Naměřené hodnoty el. odporu v nezatíženém stavu

### 7.3 Statické měření – můstková metoda

Cílem měření bylo získat funkční závislost mezi ustáleným výstupem senzoru a ustáleným zatížením o známé hodnotě. K měření byl navržen testovací stojan, který je vyobrazen na obr. č. 17.



Obrázek 17: Testovací stojan užitý k měření

Stojan se skládá z hlavní části do které se vkládají jednotlivé moduly obsahující otvory odlišných průřezů. Pomocí dvou středících šroubů je vystředěna osa otvoru přesně nad senzor, který je nalepen pomocí oboustranné lepicí pásky k hlavní části. Do otvorů poté byly vkládány kuličky z kuličkových ložisek. Ta byla jakožto závaží zvolena ze dvou důvodů. Jednak jsou na ně kladeny vysoké toleranční nároky, tudíž rozdíl hmotností kuliček stejných průměrů bude velmi nízký a dále díky tvaru koule hrozí menší riziko vzpříčení zátěže v dutině modulu, které by mohlo negativně ovlivnit měření. Naměřené hmotnosti těchto kuliček jsou uvedeny v tab. č. 7.2. Jedná se aritmetický průměr z celkem čtyř měření. Přičemž každé měření bylo měření hmotnosti deseti kuliček stejného průměru. Chyba měření byla spočítána tak, jak bylo popsáno v kapitole 5. Naměřená hodnota udává hmotnost jedné kuličky o daném průměru.

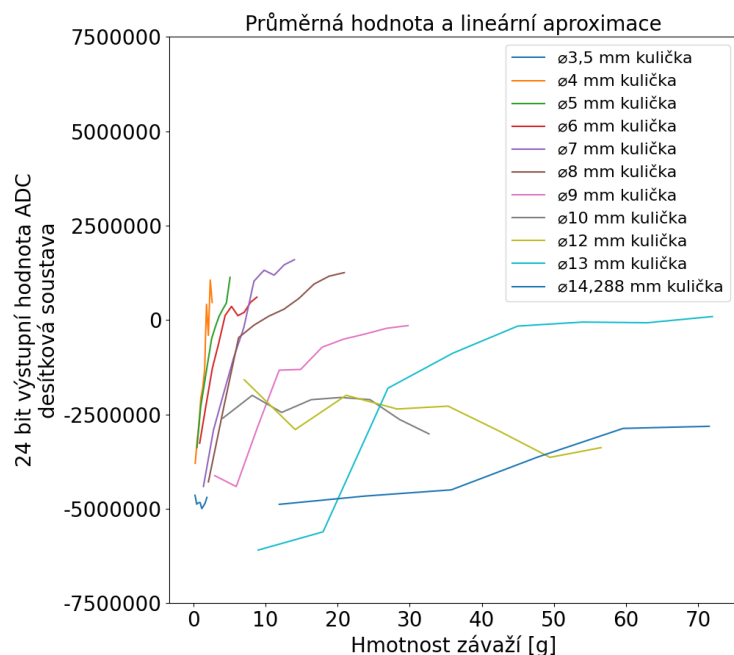
Naměřené hodnoty jsou zpracovány na obr. č. 18. V legendě je zobrazen průměr ložiskové kuličky. Každý bod představuje zátěž 1 až 10 kuliček, přičemž toto zatížení bylo zprůměrováno ze čtyř měření.

Měření bylo ukončeno dříve, jelikož byly zpozorovány nesrovnalosti naznačující hysterezi. Z obrázku výše je patrné, že senzor při zatížení stejnou hmotností vracel velmi odlišné výstupní hodnoty napětí. Bylo pojato podezření, že tento jev je způsoben odtižením senzoru od vysokého zatížení kuličkami, a poté rychlým znovu zatížením senzoru menším zatížením. Laická představa je, že senzor se nestihne po odtižení vrátit na nulovou relativní deformaci. Tedy je zatížen novým zatížením,

<b>Průměr kuličky</b>	<b>Měřená hmotnost</b>
<b>3,5 mm</b>	$(0,175 \pm 0,006) g$
<b>4 mm</b>	$(0,263 \pm 0,006) g$
<b>5 mm</b>	$(0,512 \pm 0,008) g$
<b>6 mm</b>	$(0,884 \pm 0,004) g$
<b>7 mm</b>	$(1,400 \pm 0,005) g$
<b>8 mm</b>	$(2,090 \pm 0,006) g$
<b>9 mm</b>	$(2,980 \pm 0,006) g$
<b>10 mm</b>	$(4,080 \pm 0,005) g$
<b>12 mm</b>	$(7,060 \pm 0,004) g$
<b>13 mm</b>	$(8,980 \pm 0,005) g$
<b>14,288 mm</b>	$(11,910 \pm 0,005) g$
<b>15,875 mm</b>	$(16,320 \pm 0,006) g$
<b>18 mm</b>	$(23,830 \pm 0,012) g$
<b>20 mm</b>	$(32,670 \pm 0,003) g$
<b>24 mm</b>	$(56,500 \pm 0,011) g$

**Tabulka 7.2:** Naměřené hmotnosti kuliček, které byly užity k zatěžování

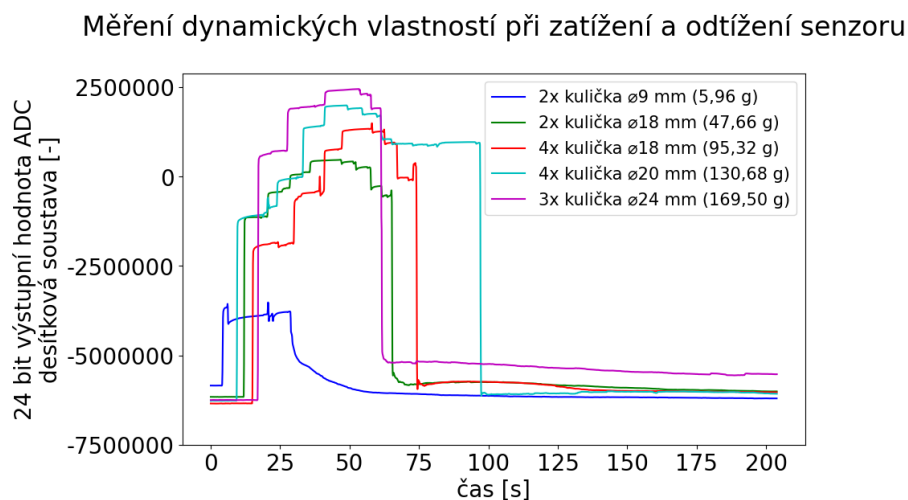
stále v deformovaném stavu z předchozího zatížení, což způsobuje odlišnou výstupní hodnotu. Čas mezi odtížením a znovu zatížením senzoru byl přibližně pět sekund. K prozkoumání tohoto jevu bylo navrženo měření odtížení senzoru.



Obrázek 18: Výsledky statického měření

## 7.4 Měření odtížení senzoru – můstková metoda

Podstata tohoto měření byla zatížit senzor, odebrat zátěž a sledovat, za jak dlouho se výstupní hodnota senzoru vrátí na původní hodnotu před prvotním zatížením. Bylo zjišťováno, zda délka odpružení senzoru bude konstantní, anebo závislá na velikosti zatížení. Senzor byl zatěžován s užitím stejného testovacího stavu jako u minulého experimentu. Senzor byl zatěžován celkem na pět různých hodnot zatížení. Výsledky měření jsou shrnuty na obr. č. 19.



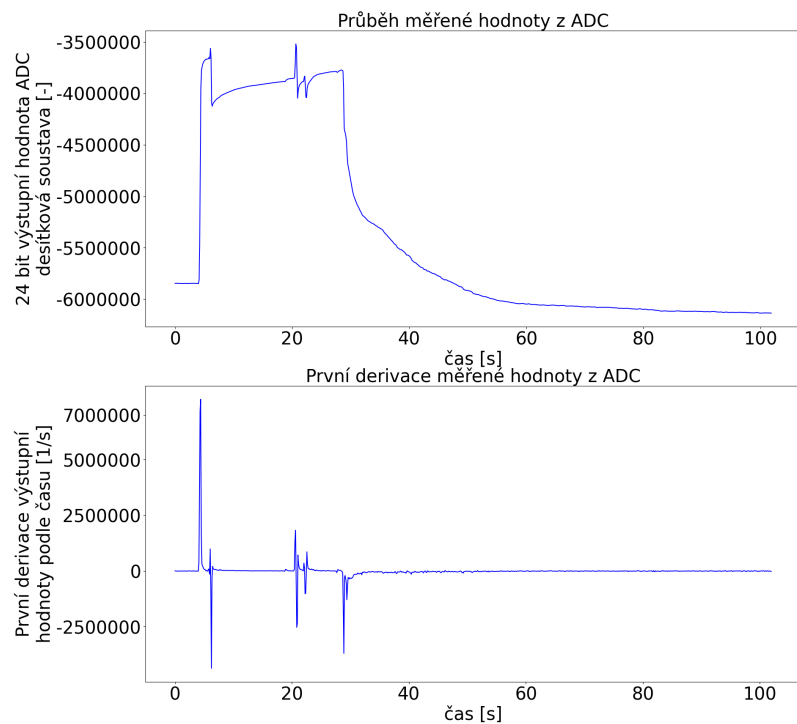
Obrázek 19: Výsledky měření odtížení senzoru



V legendě je zobrazeno množství a hmotnost kuliček využitých k zatížení senzoru. Z obrázku jsou patrné body, kdy byly přidávány/odebírány jednotlivé kuličky. Tyto body jsou ještě více viditelné v momentě, kdy spočítáme derivaci jednotlivých měření dle nejjednodušší formy

$$y'[k] = \frac{y[k+1] - y[k]}{t[k+1] - t[k]} \quad (7.1)$$

, kde  $y[k]$  značí výstupní hodnotu ADC v  $k$ -tém bodě měření a  $t[k]$  značí čas v  $k$ -tém bodě měření, přičemž platí, že  $t[k] = k \cdot \Delta T$ , kde  $\Delta T$  je perioda vzorkování. Vypočtená hodnota derivace pro příklad zatížení 5.95 gramů je na obr. č. 20.

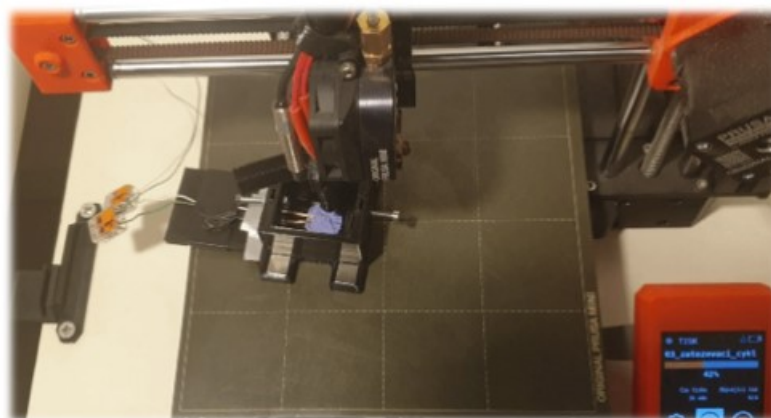


**Obrázek 20:** První derivace měření odtížení senzoru – zobrazeno pouze do času cca 100 s

Z měření je patrné, že se v některých případech choval senzor nečekaně. Například pro hodnoty 47,67 a 95,33 g je pozorovatelná po odtížení hystereze, která se po cca dvou minutách ustálí. Ale u vyšší hodnoty 130,71 g se po odtížení vrátí hodnota na původní hodnotu bez známek jakékoliv hystereze. Toto chování je potřeba verifikovat měřením s více opakováními ideálně na více senzorech.

## 7.5 Měření cyklického zatěžování – můstková metoda

Posledním experimentem bylo cyklické zatěžování. Senzor byl zatěžován za pomoci 3D tiskárny, která byla naprogramována tak, aby jezdila v cyklech nahoru a dolů nad senzorem, a vyvíjela tak na senzor zatížení pomocí násady připevněné k 3D tiskárně dle obr. č. 21.



**Obrázek 21:** Sestava pro měření cyklického namáhání

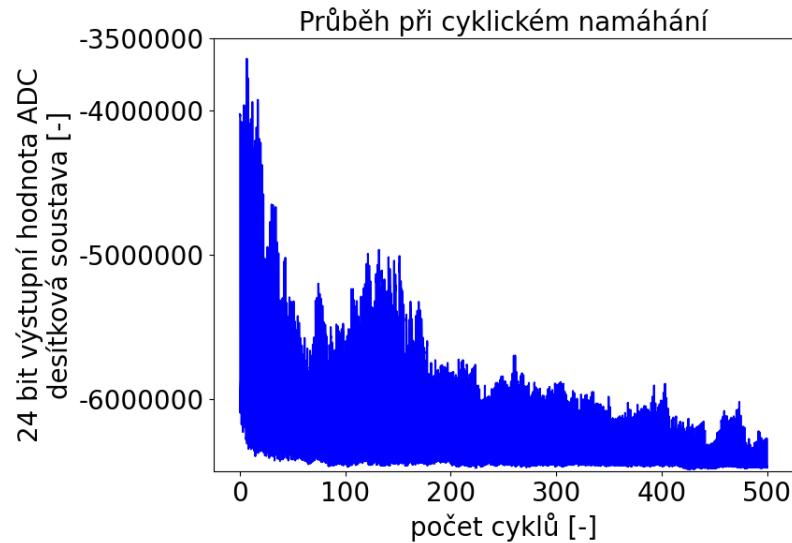
Užitá 3D tiskárna k zatěžování byla Prusa MINI. Senzor byl umístěn v hlavní části testovacího stavu (viz zelená část na obr. č. 17). Tento díl byl zafixován na podložce 3D tiskárny pomocí čtyř neodymových magnetů.

Bylo plánováno provést měření pro 1000 cyklů, avšak byla pozorována klesající tendence výstupní hodnoty, což je zobrazeno na obr. č. 22. Z tohoto důvodu bylo měření přerušeno již po cca 500 cyklech.

Toto chování neodpovídá výsledkům prezentovaných v odborném článku. Je předpokládáno, že mohlo dojít k závadě na senzoru vlivem předchozích měření. Další teorií je to, že vlivem působící reakční síly zpět na rameno tiskárny došlo ke změně zatěžovacího cyklu. Tomu by nasvědčoval i fakt, že později 3D tiskárna netiskla správně a musela být znovu zkalibrována.

## 7.6 Zhodnocení měření

Celkově se výsledky měření velmi liší od výsledků prezentovaných v odborném článku AV ČR. Vzniklo množství doplňujících otázek a je tedy žádoucí realizovat vícero nových měření. Bohužel jeden senzor byl v průběhu měření zničen teplem (při pájení na měděné piny). Druhý senzor změnil svůj odpor z hodnot v řádu stovek  $\Omega$



**Obrázek 22:** Výsledky měření cyklického namáhání

do hodnot desítek  $k\Omega$ . Tyto výsledky byly konzultovány s pracovníky AV ČR. Autoři analyzovali senzory a bylo zjištěno, že vnitřní GA byl nenávratně poškozen. Toto se projevilo tím, že GA se rozdrobil v prášek. Stav senzoru po rozstřížení modrého obalu je zobrazen na obr. č. 23. Bohužel nelze zpětně určit, v jakém momentě měření k rozpadu GA došlo, a tudíž žádné z provedených měření na senzorech není důvěryhodné. K poškození senzoru došlo s největší pravděpodobností aplikací smykového napětí, jelikož senzor má velmi nízkou pevnost ve smyku. V této době již byly vytvořeny senzory druhé verze. Tyto senzory řeší problémy senzorů první verze. Například je vidět stav GA uvnitř senzoru, je poskytnuta pevná podstava k uchycení senzoru a je minimalizován vliv deformace obalu senzoru. O měření na těchto senzorech pojednává následující kapitola.



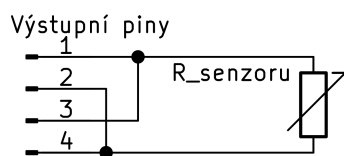
**Obrázek 23:** Rozpad GA uvnitř první verze senzoru

## 8 Měření na senzorech druhé verze

Měření na senzorech druhé verze bralo v potaz nově získané poznatky z kapitoly 7. Nová verze senzoru je popsána v následující části 8.1. Byla předělána měřicí aparatura pro statickou zkoušku. Také byl kompletně změněn princip měření cyklického zatěžování. Dále byl užit osciloskop a multimetr k preciznímu měření elektrického napětí/proudu. Rovněž bylo provedeno měření na měřicí desce pomocí můstkového měření. Podrobněji jsou tyto změny popsány v následujících samostatných kapitolách.

### 8.1 Popis senzoru

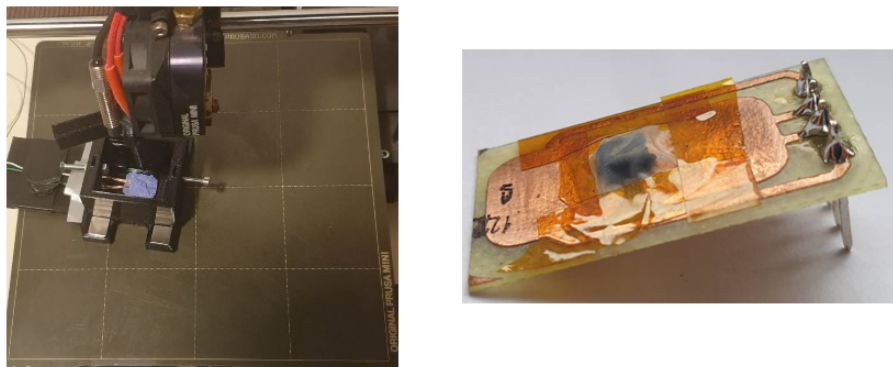
Konstrukce druhé verze senzoru je taková, že k DPS obsahující dva měděné kontakty, je přilepen kvádr z GA. Tento kvádr je z vrchní části chráněn latexovým obalem, který je přichycen lepicí páskou. Měděné kontakty jsou vyvedeny pomocí cesty na DPS na čtyři výstupní piny dle schématu na obr. č. 24. Druhá verze senzoru je zobrazena napravo na obr. č. 25.



**Obrázek 24:** Vyvedení kontaktů ze senzoru na čtyři konektory u druhé verze senzoru

### 8.2 Měření el. odporu nezatíženého senzoru

Klidový elektrický odpor senzorů byl změřen v nezatíženém stavu. Naměřené hodnoty jsou v tab. č. 8.1.



**Obrázek 25:** Verze senzorů – nalevo první verze, napravo druhá verze

Senzor č.	El. odpor v nezátíženém stavu $\Omega$
1	$181,3 \pm 1,96\Omega$
2	$10,5 \pm 0,584\Omega$

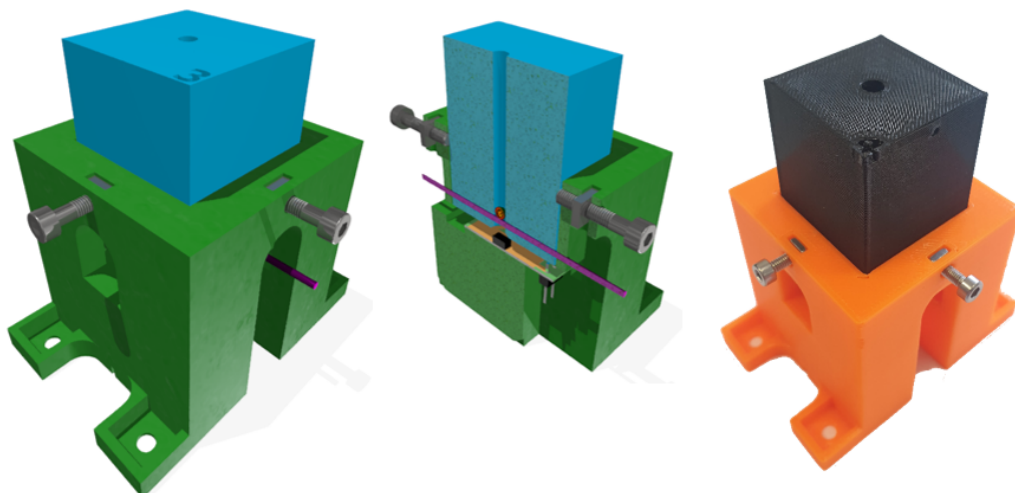
**Tabulka 8.1:** Naměřené hodnoty el. odporu v nezátíženém stavu

### 8.3 Statická měření v laboratorních podmínkách

Došlo k drobným úpravám měřicí aparatury. Hlavní změnou bylo přidání otvoru do zásuvných modulů. Tuto díru v zásuvném modulu lze zablokovat závlačkou. To řeší nevýhodu u testovacího stojanu na obr. č. 17, kde kulička na senzor padala volným pádem z výšky zásuvného modulu. To způsobovalo vyšší prvotní zatížení senzoru a mohlo to vést k pozdějšímu poškození senzoru. Další změnou je úprava dosedací plochy senzoru, protože senzor druhé generace má novou konstrukci, viz obr. č. 25 z předchozí kapitoly. Dále byly přidány dva další středící šrouby, aby bylo umožněno středění modulu v další ose. Obrázek nové měřicí sestavy je zobrazen na obr. č. 26.

Jako zatížení byly opět zvoleny kuličky z ložisek stejně jako v kapitole 7. Po konzultaci s pracovníky AV ČR byl senzor zatěžován vždy pouze jednou kuličkou. Více kuliček naskládaných na sobě by jinak mohlo ovlivňovat měření, jelikož může docházet k rozložení gravitační síly viz obr. č. 27. Gravitační síla se může rozložit do dvou obecných směrů, přičemž vždy musí platit vektorový součet  $\vec{F}_G = \vec{F}_v + \vec{F}_t$ . Na senzor poté působí pouze vertikální složka gravitační síly, která je nižší. V obrázku je pravý úhel nakreslen pouze ilustračně, ve skutečnosti může být úhel mezi  $\vec{F}_v$  a  $\vec{F}_t$  jiný.

Statická zkouška probíhala ve více částech. Nejprve byla provedena za užití měřicí desky na obvodu můstku. Můstkové měření nebude jako jediné rozebráno



**Obrázek 26:** Nová měřicí sestava

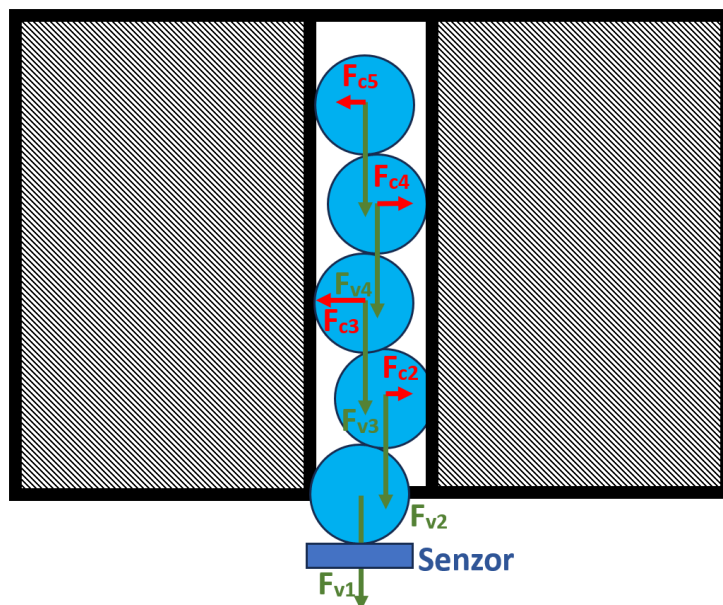
v této kapitole. Bude o něm pojednáno v následující kapitole 8.4. Poté byla měřena změna elektrického napětí/proudu při konstantním proudu/napětí. Měření napětí proběhlo pomocí osciloskopu a proud byl měřen multimetrem. Tato kapitola je zaměřená na prezentování výsledků zmíněných dvou měření.

### 8.3.1 Změna napětí při konstantním proudu

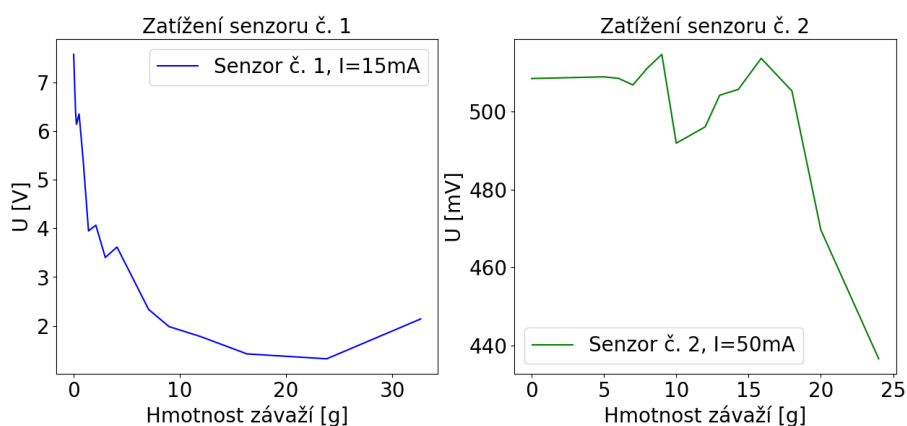
Měření bylo provedeno na obou dvou senzorech č. 1 a 2 (viz tab. č. 8.1. Vzhledem k odlišným hodnotám el. odporu senzorů byly zvoleny různé hodnoty konstantního proudu. Pro senzor č. 1 byl nastaven  $I_1 = const = 15mA$  a pro senzor č. 2 byl nastaven  $I_2 = const = 50mA$ . Výsledky naměřených hodnot zprůměrováním 4 odečtených hodnot z osciloskopu, přičemž každá hodnota byla odečtena pomocí funkce přítomné na osciloskopu *mean function*. Tato funkce spočítala průměrnou hodnotu z 10000 vzorků uložených v paměti osciloskopu. Veškeré odečty byly prováděny po ustálení hodnoty napětí (po skončení přechodového děje). Výsledky měření jsou zobrazeny v obr. č. 28. Ze vzorce  $P = UI = RI^2$  lze dopočítat ztrátu na každém senzoru viz tab. č. 8.2. Ztráty se pohybují řádově v  $10^{-3}$  mW.

Senzor č.	Ztráta na senzoru
1	40,8 mW
2	26,3 mW

**Tabulka 8.2:** Naměřené hodnoty el. odporu



Obrázek 27: Možný vznik chyby měření při užití více kuliček

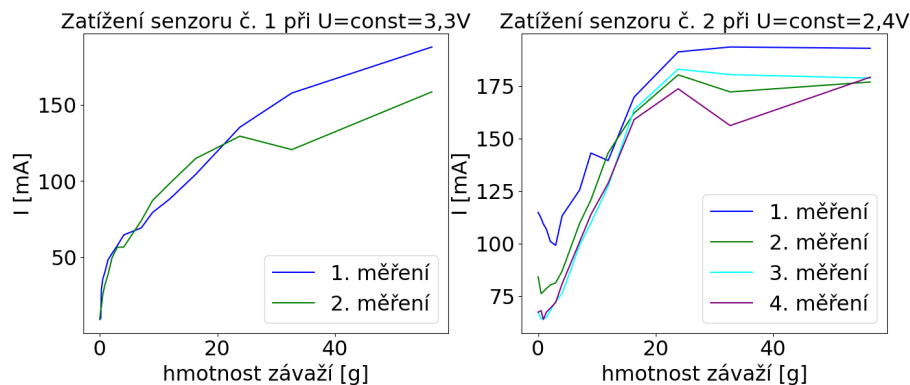


Obrázek 28: Výsledky měření na senzoru č. 1 a 2 při konstantní hodnotě proudu

### 8.3.2 Změna proudu při konstantním napětí

Měření bylo provedeno na obou dvou senzorech č. 1 a 2, viz tab. č. 8.1. Vzhledem k odlišným hodnotám elektrického odporu senzorů byly zvoleny různé hodnoty konstantního napětí. Pro senzor č. 1 byl nastaven  $U_1 = const = 3,3V$  a pro senzor č. 2 byl nastaven  $U_2 = const = 2,4V$ . Toto odpovídá užívaným hladinám napětí pro Transistor-Transistor Logic (TTL) (3,3 V) nebo pro Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) logiku (2,4 V). Při pokusu nastavení napětí 3,3 V na senzor č. 2 protékal senzorem vyšší proud a senzor byl teplý na dotek. Z důvodu malého počtu senzorů a obavy ze zničení senzoru bylo napětí na senzoru č. 2 sníženo. Na laboratorním zdroji bylo nastaveno konstantní napětí a pomocí digitálního

multimetru zapojeného v sérii se senzorem byly odečítány hodnoty protékajícího proudu. Měření probíhalo pro oba dva senzory v několika opakováních, přičemž v každém opakování je hodnota průměrem 4 odečtených hodnot z multimetru. Jelikož pro různá opakování se výsledky měření výrazně lišily, budou vykreslena jednotlivá opakování zvlášť. Výsledky měření jsou zobrazeny v obr. č. 29. U senzoru č. 1 došlo při druhém měření při položení finální zátěže k nevratnému poškození senzoru. Ochranná vrstva latexu se protrhla a GA ztratil strukturu, začal se drobit podobně jako u senzoru první verze na obr. č. 23. Zničení senzoru je viditelné na obr. č. 29 v okamžiku, kdy začal klesat proud okolo zatížení vyvolaného závažím 30-35 g. Důvod tohoto nečekaného rozpadu při poměrně nízkém zatížení přisuzuji tomu, že právě tento senzor před tímto měřením absolvoval zkoušku cyklickým zatěžováním malou silou popsanou v kapitole 8.6. Po zničení senzoru jeho odpor v nezatíženém stavu vzrostl do řádů desítek  $k\Omega$  a na senzoru č. 1 již nebyla prováděna žádná měření.



**Obrázek 29:** Výsledky měření na senzoru č. 1 a 2 při konstantní hodnotě napětí

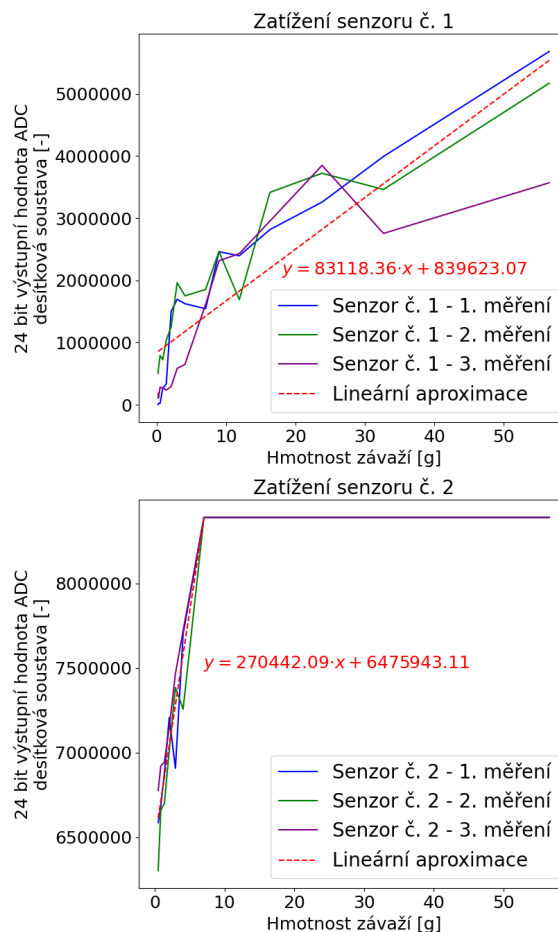
## 8.4 Statická zkouška – měření na můstku

Měření probíhalo na stejné měřicí sestavě popsané v minulé kapitole s tím rozdílem, že měříme napětí na můstku pomocí ADC převodníku umístěného na měřicí desce. Výstupem měření je tedy 24bitová hodnota typu *signed integer*. Cílem měření je najít závislost, díky které bychom byli schopni převést měřenou hodnotu na hmotnost závaží. Z toho je už poté triviální převést hodnotu na závaží na velikost síly působící na senzor a z toho spočítat velikost tlaku.

Měření probíhalo tak, že se z měřicí desky neustále vyčítala měřená hodnota pomocí připojeného master zařízení Arduina (obr. č. 15). Tato hodnota se vyčítala pomocí UART rozhraní jak již bylo popsáno v kapitole 6.4. Uložení dat probíhalo pomocí napsaného Python skriptu *com listener.py*, který tyto data zaznamenával



a vyčítal do spuštěné příkazové řádky spolu s časovou značkou přijmutí dat. Po ukončení skriptu pomocí klávesové zkratky CTRL+C byla veškerá data uložena do textového souboru. Při měření byl spuštěn tento skript a obrazovka s otevřenou příkazovou řádkou, kde se objevovala přijímaná data byla nahrávána SW pro nahrávání PC obrazovky. K tomuto nahrávání byla zároveň připojená audio stopa mikrofону, kde bylo během měření komentováno, v který moment se které závaží pokládá na senzor. Po měření bylo pomocí tohoto video záznamu dohledáno konkrétní místo položení jednotlivých závaží v uloženém textovém souboru. Toto měření bylo opakováno celkem třikrát pro každý senzor. Každý bod v grafu je průměr 10 měřených hodnot po ukončení přechodového jevu. Všechna 3 měření pro senzor č. 1 a č. 2 jsou zobrazena na obr. č. 30.



**Obrázek 30:** Výsledky měření na senzoru č. 1 a 2 při měření na můstku

Je patrné, že měřené hodnoty ze senzoru č. 1, je možné proložit přímkou na celém intervalu hodnot. To bylo provedeno pomocí metody nejmenších čtverců. Tato přímka a její rovnice je zobrazena v obrázku výše. Závislost senzoru č. 2 je taková, že senzor má velmi vysokou citlivost na rozsahu nízkých hodnot zatížení na

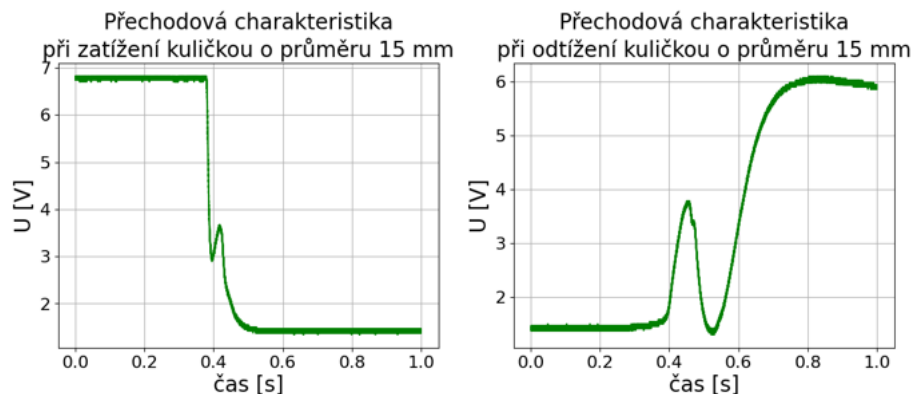
intervalu  $\langle 0; 7 \rangle$  g. Při překročení tohoto zatížení se dostáváme na maximální hodnotu ADC a měření zatížení se stává nemožné. Na tomto intervalu byly měřené hodnoty proloženy přímkou pomocí metody nejmenších čtverců, rovnice této přímky je opět na obrázku výše. Díky tomuto proložení je možné aproximací přiřadit k měřené hodnotě ADC hodnotu hmotnosti, která zatěžuje senzor.

## 8.5 Dynamické vlastnosti senzoru

V této kapitole bude pojednáno o přechodových dějích, které se odehrávají při zatížení senzoru. Měření probíhala na osciloskopu použitím funkce *single trigger*. Tato funkce vytvořila jeden datový záznam měření při splnění trigger podmínky. Tato podmínka byla nastavena jako překročení minimální hranice napětí při zatížení senzoru z vyšších hodnot do nižších (sestupná hrana). Při zatížení došlo ke zmenšení elektrického odporu senzoru, tudíž k poklesu napětí. Při odtížení senzoru došlo k nárůstu elektrického odporu a vzrůstu napětí. Pro odtížení senzoru byla trigger podmínka překročení napěťové hranice z nižších hodnot do vyšších hodnot (vzestupná hrana). Napěťová hranice (trigger level) se nastavovala ručně dle aktuální hodnoty napětí v ustáleném stavu. Veškerá data byla měřena v rámci kapitoly 8.3.1, když se závaží ve formě kuliček na senzor přidávala/odebírala, tak byly měřeny z osciloskopu na USB disk ukládány data, která budou prezentována v této kapitole. Je důležité zmínit, že kuličky dopadaly na senzor z výšky cca 5 mm. Při odtížení senzoru byly kuličky odebírány pomocí magnetu. Kdyby byly kuličky odebírány jiným způsobem – například pomocí pinzety – mohlo by toto ovlivnit naměřené dynamické vlastnosti.

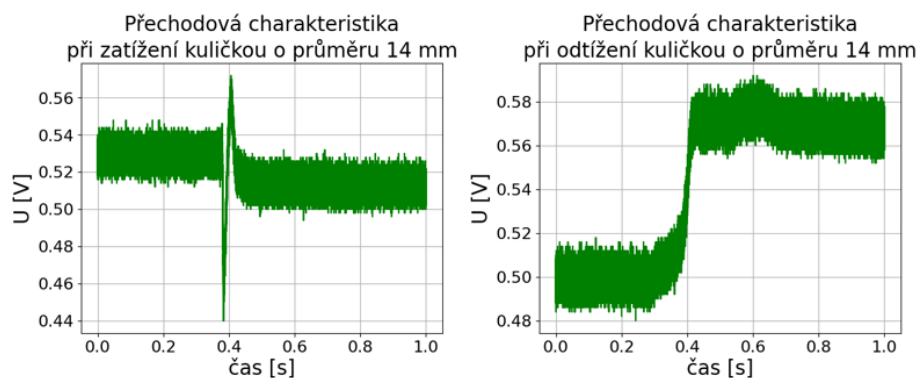
Senzor č. 1 na první pohled vypadá jako systém nejméně 2. řádu. U systému není pozorované žádné dopravní zpoždění. U senzoru však byly opakovaně pozorovány kmitavé vlastnosti spolu s 2 kmity na opačnou stranu, podobně jako je tomu u systémů obsahující 2 kladné nuly. [14] Typické přechodové křivky senzoru jsou na obr. č. 31.

U senzoru č. 2 bylo pozorováno trochu odlišné chování. Až do hodnoty zatížení vyvolávaného kuličkou o průměru 12 mm byla změna napětí téměř nezachytitelná. Toto chování reflektuje to, že u senzoru č. 2 na obr. č. 28 je pro nízké hodnoty zatížení pozorována nulová změna napětí. Po odebrání kuličky mělo napětí obdobný kmitavý průběh následovaný ustálením na stejné hodnotě, jako když byl senzor zatížen. Toto chování se změnilo při zatížení silou vyvolanou kuličkou o průměru 14 mm. Z obr. č. 32 níže je patrné, že při zatížení se opět ustálená hodnota napětí trochu změnila. Po odebrání závaží napětí vzrostlo. Pro vyšší hodnoty zatížení již senzor



Obrázek 31: Dynamika změny napětí senzoru č. 1 při  $I=\text{const}=50\text{mA}$

č. 2 vykazoval přechodové křivky podobné těm u senzoru č. 1 zobrazených na obr. č. 31. Opakovanými experimenty bylo toto chování pro nižší zatížení replikovatelné. Toto chování autor přičítá nedostatečné citlivosti osciloskopu na změnu napětí, která se v minimální formě odehrává i pro závaží menší hmotnosti.



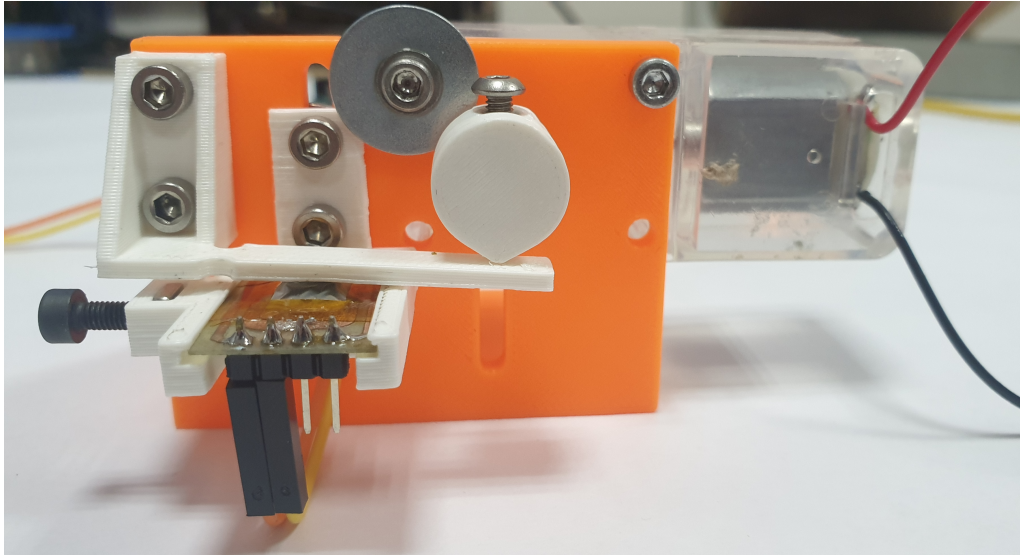
Obrázek 32: Dynamika změny napětí senzoru č. 2 při  $I=\text{const}=15\text{mA}$

## 8.6 Cyklická zkouška

Pro zjištění vlastností senzorů v dlouhodobém horizontu ve smyslu opakovaného zatěžování, bylo navrženo pokusné měření simulující cyklické zatěžování. Byl tedy navržen mechanismus, který v přibližně 1800 opakováních vyvine konstantní zatížení senzoru. Navržených 1800 cyklů bylo zvoleno s ohledem na omezený počet dostupných senzorů a prevenci znemožnění dalších pokusů zapříčiněných zničením senzoru v průběhu této zkoušky. Pro kvalitnější a přesnější odhad změny chování senzoru je vhodné zvolit řádově větší počet cyklů.

Přístroj pro cyklické zatěžování (viz obr. č. 33) je založen na principu vačkového mechanismu, kdy excentrická vačka vychyluje rameno, které cyklicky deformuje

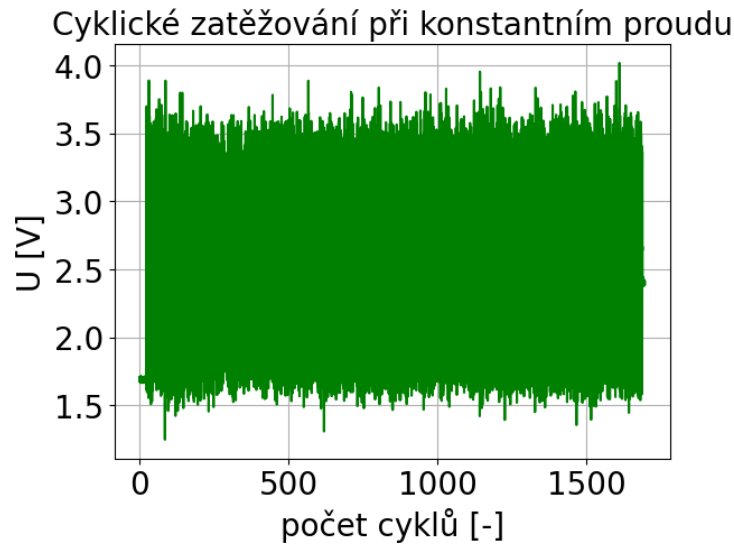
senzor umístěný pod ním. Pohyb vačky zajišťuje stejnosměrný motor s integrovanou dvou stupňovou převodovkou s přibližnou frekvencí otáčení  $1,65 \text{ ot/s}$ . Měření trvalo dohromady 17 minut.



**Obrázek 33:** Mechanismus pro cyklické zatěžování

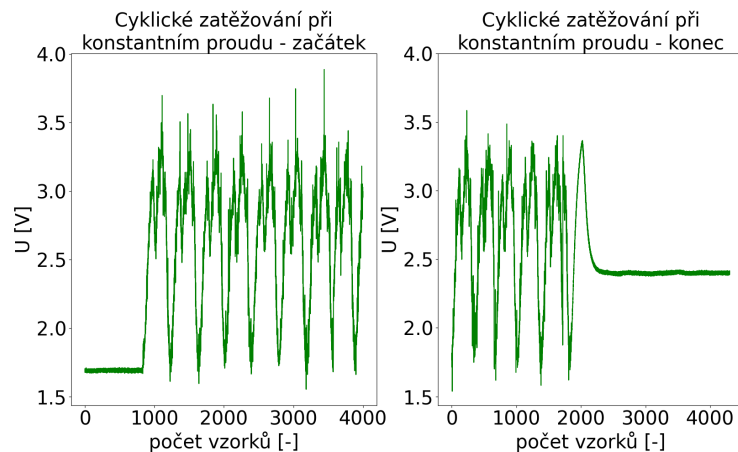
Výchozí napolohování senzoru vůči ramenu je provedeno v neexcentrické poloze vačky přibližně na dotyk, aby nevznikla mezera mezi senzorem a ramenem, a tedy byl senzor vždy zatížen. Cílem této zkoušky není zachycení přesných hodnot deformací v rámci všech cyklů, nýbrž zjistit, zda se budou hodnoty odporů před a po zkoušce lišit, ideálně zachytit trend změny (pokud se vyskytne) v průběhu celého experimentu. Není tedy nutné znát a definovat přesnou počáteční deformaci či zatížení. Vačka má maximální konstrukční excentricitu od základního válce  $2 \text{ mm}$  (bez započtení nepřesnosti při 3D tisku). Ze dvou senzorů druhé verze bylo zvoleno užít senzor č. 1 kvůli vyšší hodnotě elektrického odporu. Senzor byl při měření připojen na zdroj konstantního proudu  $I = 14 \text{ mA}$ . Změna napětí na senzoru se měřila pomocí osciloskopu. Data byla v reálném čase posílána a ukládána do PC pomocí USB připojení v binárním formátu. Ten byl poté dekódován pomocí k tomu vytvořeného Python skriptu. Celý zatěžovací cyklus je znázorněn na obr. č. 34.

Z obrázku je vidět, že amplituda napětí zůstala během celého měření konstantní. Nebyla pozorována změna jako při cyklickém měření na první verzi senzoru. Toto potvrzuje, že při cyklickém měření na první verzi senzoru došlo k nevratnému poškození GA uvnitř senzoru. Z obrázku výše je možné si všimnout různých napěťových hladin v klidovém (nezatíženém) stavu na počátku a na konci měření. Na začátku je to okamžik, než byl motor spuštěn. Na konci je to moment, kdy byl



**Obrázek 34:** Průběh napětí při cyklickém zatěžování

motor vypnut, ale osciloskop dále odesílal data do PC. Vykreslený zatěžovací cyklus na počátku a na konci je zobrazen na obr. č. 35.



**Obrázek 35:** Průběh napětí při cyklickém zatěžování – na začátku a na konci

Na tomto obrázku je již velmi patrný rozdíl měřeného napětí na počátku a na konci. Tyto hodnoty byly průměrováním stanoveny jako  $U_{start} = (1,69 \pm 0,08) V$  a  $U_{konec} = (2,40 \pm 0,10) V$ . Nejistoty byly spočítány pomocí vztahu uvedeného v kapitole 5.5 s tím, že užitá velikost dílku při akvizici dat byla 500 mV/div. Napěťový rozdíl je tedy  $(0,71 \pm 0,10) V$ . Oproti napětí před zahájením cyklické zkoušky toto představuje nárůst o 42 %. Lze tedy říct, že při cyklické zkoušce senzor vykazuje shodnou amplitudu, avšak dochází ke změně elektrického odporu senzoru v nezatíženém stavu, což vede ke změně napětí při konstantním elektrickém proudu.

## 9 Praktické aplikace

V následujících dvou kapitolách budou představeny a popsány dvě ukázkové aplikace, které nastiňují možná využití v praxi. Nejdříve je popsána situace, kterou napodobuje jednotlivá aplikace. Následně je popsáno provedení její konstrukce a vysvětlení principu fungování a nakonec krátké zhodnocení.

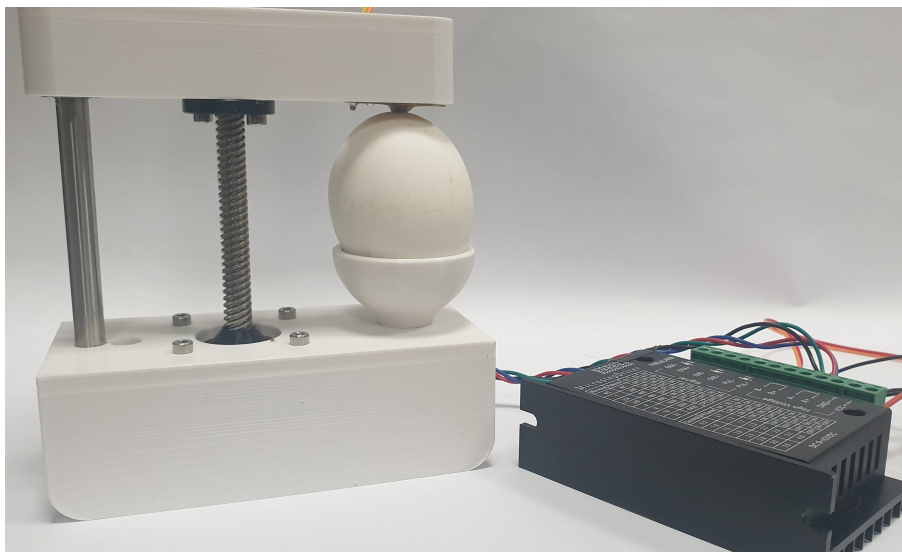
### 9.1 Robotická aplikace

Pro robotickou aplikaci byla zvolena modelová situace, kdy má manipulátor za úkol uchopit předmět neznámých rozměrů a není tedy předem možné nastavit šířku úchopu.

Musí se tedy spolehnout na koncový spínač, který při kontaktu s předmětem vyšle signál, jež upozorní řídicí systém, že došlo k fyzickému kontaktu. V praxi se běžně využívají i bezkontaktní čidla a senzory, pro tuto práci jsou však relevantní pouze kontaktní varianty.

#### 9.1.1 Konstrukce

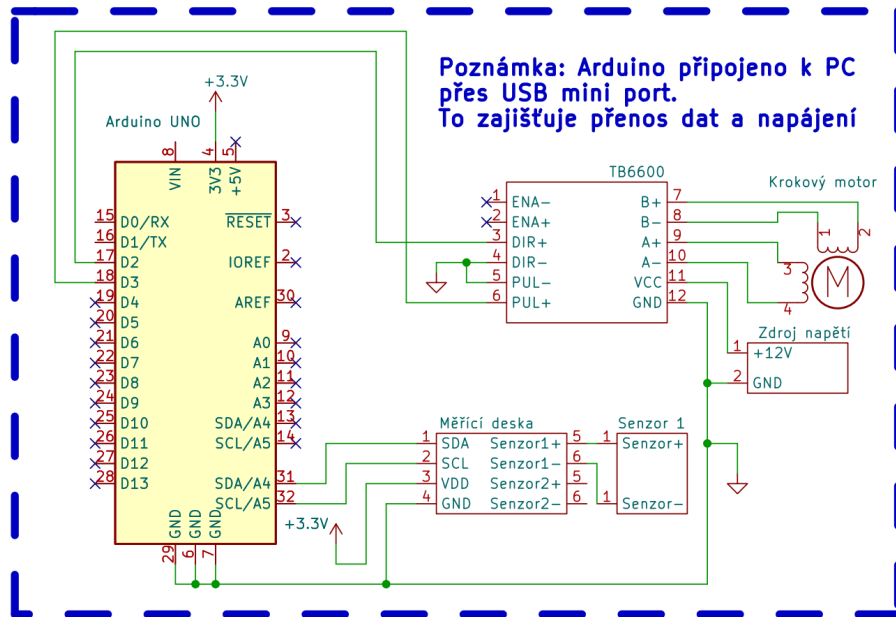
Bylo navrženo zařízení, viz obr. č. 36, které má za cíl simulovat situaci manipulátoru popsanou výše. Zařízení se skládá ze dvou vytištěných částí - statické základny a pohyblivého unašeče senzoru. Pohyb je zajištěn pomocí kinematické vazby mezi pohybovým šroubem uchyceným v krokovém motoru v základně a maticí připevněnou v unašeči. Posuv a souosost je řešena pomocí hladké tyče uložené v lineárním kuličkovém ložisku. Jako uchopovaný předmět bylo zvoleno vejce, aby bylo možno pozorovat dostatečný přítlak uchopení a zároveň tento přítlak vejce nepoškodil. Při modelování byl užit převzatý model krokového motoru z [13] a stažený model lineárního ložiska z [10].



**Obrázek 36:** Konstrukce uchopovacího zařízení

### 9.1.2 Elektronické zapojení

Byl použit krokový motor vymontovaný ze Z osy 3D tiskárny *Prusa MK2S*. Jedná se o motor velikosti *NEMA 17* s rozsahem kroku  $1,8^\circ$  který pracuje na napětí 12 V. Jako ovladač zařízení byl zvolen modul *TB6600*. Tento ovladač pracuje s napěťovou úrovní TTL, což je logická 1 pro úroveň 5 V. Ovladač je napájen napětím v rozsahu 9-40 V (stejnoseměrné napětí) a dokáže motoru dlouhodobě až 3,5 A. To je mnohem více, než na naší aplikaci potřebujeme. Ovladač však měl autor práce k dispozici a tak byl použit ten. To, že je užita 5 V logika je také důvodem, proč byla jako řídicí deska zvolena Arduino UNO deska. V počátku práce bylo plánováno pracovat s deskou ESP32, která pracuje s 3,3 V logikou. Test bohužel ukázal, že pro tuto aplikaci deska ESP32 není s to driver ovládat a musel by se navíc použít měnič napěťových úrovní. Proto bylo nakonec zvoleno Arduino UNO. Ovladač obsahuje 6 přepínačů, pomocí kterých lze měnit celkový počet kroků na jednu otáčku motoru a také nastavení velikosti proudu, který ovladač bude dodávat motoru. Byly nastaveny hodnoty 200 kroků na otáčku a jmenovitý proud byl nastaven na hodnotu 1,5 A. Ovladač (a tedy i motor) je napájen z 12 V zdroje stejnosměrného napětí, který byl převzat z tiskárny *Prusa MK2S*. Tento zdroj je schopen dodávat při výstupním napětí 12 V proud až 20 A. Opět se jedná o zbytečně silný zdroj pro tuto aplikaci, ale zdroj se naskytl k užití a pro ukázkovou aplikaci je postačující. Měřicí deska s můstkovým zapojením byla napájena z 3,3 V pinu přítomného na desce Arduino. Proces akvizice dat z desky byl popsán v části 6.4. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. č. 37.



Obrázek 37: Schéma zapojení robotické aplikace

### 9.1.3 Řídicí program

Simulační cyklus začíná s unašečem v obecné poloze nad vejcem. Následně je unašeč uveden do pohybu pomocí krokového motoru směrem k vejci. V takovém momentě, kdy řídicí program zaznamená diferenci vyčítaných hodnot z ADC tak velkou, aby bylo zaručené, že nemůže jít o šum, se motor zastaví a vejce je uchopeno. Po importu knihoven k ovládání ADC ([1]) a rozšiřovače vstupů a výstupů ([2]) jsou vytvořeny instance objektů viz kód č. 9.1 a je provedeno jejich nastavení viz kód č. 9.2

```

1 Adafruit_NAU7802 nau;
2 Adafruit_MCP23008 mcp;
3
4 // Vytvoreni objektu stepper
5 AccelStepper stepper(1, STEP_PIN, DIR_PIN);

```

Kód 9.1: Inicializace objektů

```

1 nau.begin();
2 nau.setLD0(NAU7802_3V3);
3 nau.setGain(NAU7802_GAIN_1);
4 nau.setRate(NAU7802_RATE_10SPS);
5
6 // Pockej 10 testovacich vzorku pred kalibraci
7 for (uint8_t i=0; i<10; i++) {
8     while (! nau.available()) delay(1);

```



```

9     nau.read();
10  }
11
12  // Kalibrace vnitřního offsetu
13  while (! nau.calibrate(NAU7802_CALMOD_INTERNAL)) {
14  }
15
16  while (! nau.calibrate(NAU7802_CALMOD_OFFSET)) {
17    Serial.println("Neúspěšná kalibrace.");
18    delay(1000);
19  }
20
21  // Nastavení MCP23008 objektu
22  // - všechny piny nastav jako výstup
23  mcp.begin(MCP23008_ADDRESS);
24  for (uint8_t pin = 0; pin < 8; pin++) {
25    mcp.pinMode(pin, OUTPUT);
26  }
27
28  // Nastavení rychlosti a zrychlení motoru
29  stepper.setMaxSpeed(1000);
30  stepper.setAcceleration(500);

```

**Kód 9.2:** Nastavení objektů ADC, MCP23008 a krokového motoru

V hlavní loop smyčce jsou poté vždy vyčteny 2 měřené hodnoty z *nau* objektu pomocí metody *.read()*. Z těchto metod je poté spočítána diference a pokud platí, že diference je větší než specifikovaná hodnota *threshold* dojde k zastavení motoru. Zároveň musí být parametr *motorStopped* nastaven na hodnotu *False*. Toto nastavení na hodnotu *False* je defaultní a jakmile se tato hodnota změní na *True*, už nikdy v běhu programu ji nejde vrátit do hodnoty *False*. Tento princip se často nazývá anglicky *flag* a používá se, když chceme, aby nějaký blok kódu proběhl pouze jedenkrát za celý běh programu. V našem případě to je ono zastavení motoru. Tato část kódu je zobrazena v kódu č. 9.3.

```

1  if (diff > threshold && !motorStopped) {
2    stepper.stop();
3    stepper.disableOutputs(); // preruší výstupy
4    // změni parametr, znací zastavený motor
5    motorStopped = true;
6    Serial.println("Motor stopped due to threshold exceeded.");
7  } else if (!motorStopped) {
8    stepper.enableOutputs(); // Enable motor outputs
9    stepper.runSpeed(); // Move the motor

```

**Kód 9.3:** Blok zastavení motoru při splnění daných podmínek

## 9.2 Aplikace měřicí váhy

Jako druhá demonstrační aplikace byla zvolena váha, jelikož potřeba zjišťovat hmotnost různých předmětů je rozšířena do opravdu mnoha, nejen průmyslových, oblastí. Cílem bylo zjistit, zda-li je možné využít senzory z grafenového aerogelu k sestrojení nízkoprofilové váhy podobné těm kuchyňským. Bohužel kvůli nevratnému poškození senzoru druhé verze č. 1 nebylo možné tuto úlohu fyzicky realizovat a proto zůstává pouze jako návrh možného využití.

### 9.2.1 Konstrukce

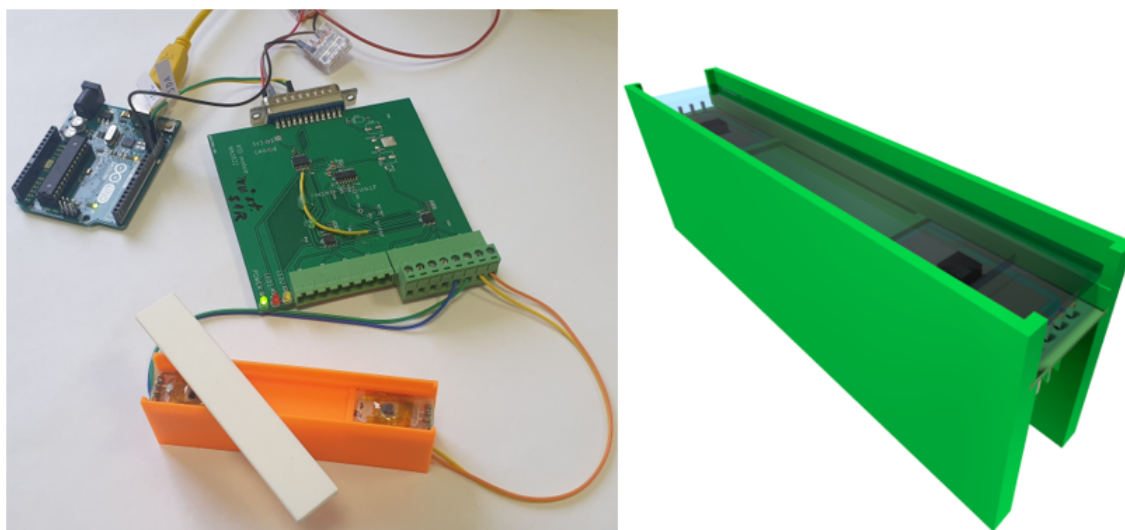
Váha je konstrukčně jednoduchá a kromě dvojice senzorů se skládá pouze z dvou dalších částí vytištěných na 3D tiskárně *Prusa MINI* (viz obr. č. 38 napravo). Ve spodní části (dále jen "tělo váhy") jsou v drážkách uloženy dva senzory s roztečí  $L = 67 \text{ mm}$ . Druhá část určená k pokládání předmětů, jejichž hmotnost chceme stanovit, je uložena v extrudované drážce těla váhy, která zabraňuje přílišné deformaci senzorů a tedy jejich zničení. Jelikož se jedná o demonstrativní ukázkou, není zde možnost nastavení maximálního stlačení senzorů. Při pokročilejší, reálné aplikaci by bylo možné problém řešit například přidáním stavěcích šroubů s jemným závitem v úrovni každého senzoru pro přesné nastavení maximálního zatížení každého senzoru (což by umožnilo i korekci u různě vysokých senzorů).

### 9.2.2 Elektronické zapojení

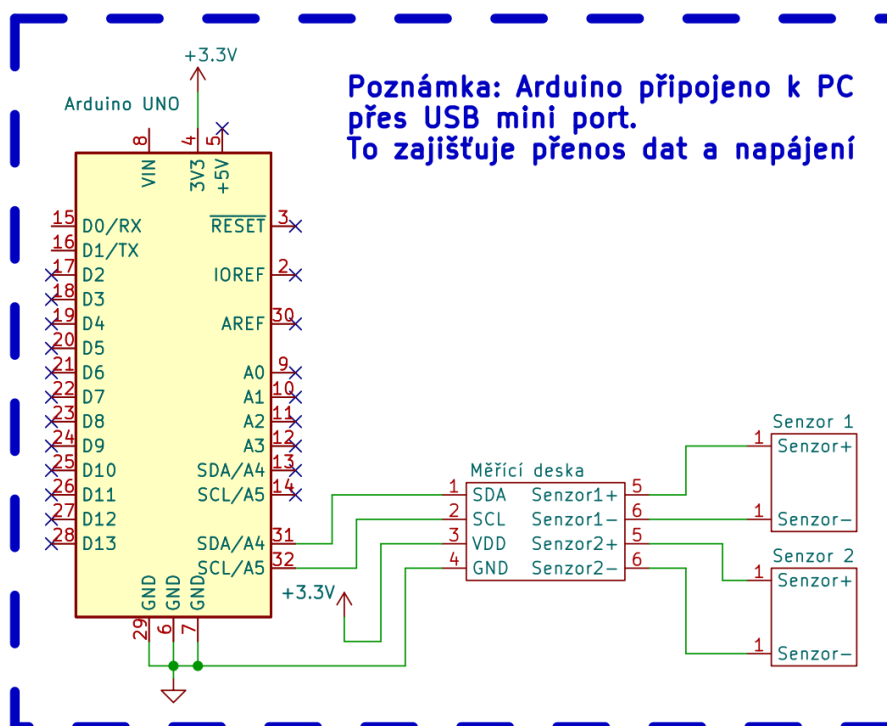
Řídicí deska Arduino UNO je připojena k PC pomocí USB konektoru, který zaručuje napájení. Měřicí deska obsahující můstkové zapojení je opět napájena z 3,3 V pinu na řídicí desce. Komunikace probíhá skrze rozhraní  $I^2C$ . Dva senzory sensor č. 1 a sensor č. 2 jsou zapojeny do vstupů jednotlivých kanálů na měřicí desce. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. č. 39.

### 9.2.3 Matematický model 1D váhy

Vytvoření 1D stupnice pomocí dvou tlakových senzorů je praktickou a účinnou metodou měření váhy, které má za úkol zachovávat konzistentní data bez ohledu na polohu závaží na spojnici mezi senzory. V ideálním případě by touto spojnicí



Obrázek 38: Nalevo reálná aplikace váhy, napravo render



Obrázek 39: Schéma zapojení váhové aplikace

byla přímka s nulovou šířkou. To však prakticky není realizovatelné, šířka bude vždy nenulová. Vliv této nenulové šířky bude ve výpočtech zanedbán. Je uvažováno, že se závaží bude pohybovat pouze po přímce spojující dva senzory. Úkolem této kapitoly je popsat matematické závislosti, které budou poté zaneseny do řídicího SW. Pojmenujme měřenou hodnotu ze senzoru 1 jako  $P_1$  a měřenou hodnotu ze senzoru 2 jako  $P_2$ . Tyto hodnoty představují 24 bitovou hodnotu z ADC převodníku.

Nyní je předpokládáno, že váha je umístěna ve vzdálenosti  $d$  od senzoru 1 a ve vzdálenosti  $L - d$  od senzoru 2, kde  $L$  je celková vzdálenost mezi oběma senzory. Celková hmotnost umístěná na této 1D váze je značena jako  $m$ . Klíčovým předpokladem tohoto modelu je přímá úměra mezi měřenými výstupy  $P_1$  resp.  $P_2$

Síla vyvozená měřeným závažím o hmotnosti  $m$  se rozdělí na 2 síly působící na senzor 1 a senzor 2, přičemž součet těchto sil se rovná síle vyvozené hmotností  $m$ . Lze si představit, že tyto dílčí síly působící na senzor 1 a senzor 2 jsou vyvozovány 2 závažími o hmotnosti  $m_1$  a  $m_2$ , přičemž opět bude platit  $m_1 + m_2 = m$ . Klíčovým předpokladem této metody je přímá úměra mezi měřenou hodnotou senzoru a hmotností závaží, které vyvozuje sílu působící na senzor. Můžeme napsat následující vztahy:

$$P_1 = k_1 m_1, \quad (9.1)$$

$$P_2 = k_2 m_2, \quad (9.2)$$

$$(9.3)$$

kde hodnoty  $k_1$ ,  $k_2$  jsou konstanty úměrnosti senzoru 1, 2. Tyto konstanty by bylo možné vyčíst z rovnic lineární aproximace na obr. č. 30. Je důležité zmínit, že model váhy poté bude fungovat pouze na intervalu platnosti těchto lineárních závislostí. Pro 2 senzory druhé verze by tento rozsah byl nízký, pouze  $\langle 0; 7 \rangle$  g kvůli nízkému rozsahu měření senzoru č. 2 viz obr. č. 30. Hmotnost umístěná na váze poté může být spočítána pomocí vztahu č. 9.4.

$$m = m_1 + m_2 = \frac{P_1}{k_1} + \frac{P_2}{k_2} \quad (9.4)$$

Přes to všechno by však měřená hodnota nejspíše měla nějaké výchyly, při změně vzdálenosti závaží  $d$ . To by bylo způsobené chybou v linearizaci výstupního signálu senzoru. Dále je ještě potřeba zmínit, že měřicí podložka umístěná na senzorech má nějakou hmotnost. Ještě před umístěním měřeného závaží  $m$  tedy na senzory působí počáteční váha podložky  $m_0$ . Proto na začátku je potřeba váhu zkalibrovat – během několika cyklů vypočítat průměrnou hodnotu  $m_0$ . Tato počáteční hmotnost poté bude odečtena od každé měřené hmotnosti, aby byla měřena pouze hmotnost  $m$  bez ohledu na vliv hmotnosti podložky.

## 9.2.4 Řídicí program

Řídicí program v podstatě provádí matematické operace popsané v předchozí kapitole. K tomu navíc odesílá přes sériovou linku. Celý kód může být nalezen

na přiloženém CD, zde budou zmíněny pouze klíčové části. Nejprve je proveden import potřebných knihoven. Dále jsou deklarovány proměnné a inicializovány objekty *nau* reprezentující ADC a *mcp* reprezentující rozšiřovač vstupů a výstupů MCP23008. Poté je provedeno základní nastavení objektů *nau* a *mcp* stejně jako v části 9.1.3. Měřená hodnota ze senzoru č. 1 a č. 2 je poté vyčítána pomocí definované funkce *setPinsFromHex()*, která přijme pointer proměnné *value1* a pointer proměnné *value2*. Do *value1* a *value2* poté uloží postupně měřené hodnoty ze senzoru č. 1 a senzoru č. 2. K přepínání vstupů je užita funkce *setPinsFromHex()*, která přijme dvouciferné číslo v hexadecimálním formátu. Podle zadaného čísla je poté aktivován příslušný vstup na příslušném konektoru pomocí přepínání vstupních pinů multiplexorů. Tyto vstupní piny jsou řízeny právě pomocí funkce *setPinsFromHex()*, která nastavuje řídicí signály z rozšiřovače MCP23008. Jaké číslo do funkce zadat pro volbu příslušného vstupu je popsáno v hlavičce funkce.

```

1 void nacti_hodnoty(int32_t &value1, int32_t &value2) {
2     // Nastav vstup KONEKTOR U1-S1 - Vstup ze senzoru1
3     setPinsFromHex(0x09);
4     // Počekj ne  NAU7802 dokon  A/D p evod
5     while (!nau.available()) {
6         delay(1);
7     }
8     // Nacti první merenou hodnotu ze senzoru 1
9     nau.read(); // Hodnota bude zahozena
10
11    // Počekj ne  NAU7802 dokon  A/D p evod
12    while (!nau.available()) {
13        delay(1);
14    }
15
16    // Nacti druhou merenou hodnotu ze senzoru 1
17    value1 = nau.read();
18
19    // Nastav vstup KONEKTOR U1-S2 - Vstup ze senzoru2
20    setPinsFromHex(0x19);
21    // Počekj ne  NAU7802 dokon  A/D p evod
22    while (!nau.available()) {
23        delay(1);
24    }
25    // Nacti první merenou hodnotu ze senzoru 2
26    nau.read(); // Hodnota bude zahozena
27
28    // Počekj ne  NAU7802 dokon  A/D p evod
29    while (!nau.available()) {

```

```

30     delay(1);
31 }
32
33 // Nacti druhou merenou hodnotu ze senzoru 2
34 value2 = nau.read();
35 }

```

**Kód 9.4:** Funkce `nacti_hodnoty()`

Po úvodní kalibraci, kde pomocí funkce v kódu č. 9.4 a užitím rovnice č. 9.4 získáme hodnotu  $m_0$ . Ta je výsledkem několika zprůměrovaných hodnot. V hlavním smyčce programu poté pokaždé získáme měřenou hodnotu pomocí následující části kódu č. 9.5.

```

1 // získání hodnot value1 a value2 užitím funkce nacti_hodnoty()
2 int32_t value1, value2;
3 nacti_hodnoty(value1, value2);
4
5 // spočítej merenou hmotnost a odečti od ni m0
6 float hmotnost = static_cast<float>(value1)/k1 +
7 static_cast<float>(value2)/k2 - m0;

```

**Kód 9.5:** Hlavní smyčka programu – získání měřené hmotnosti

Tato data jsou poté s časovou značkou odeslána pomocí sériové linky, kde jsou zachytávána pomocí stejného Python skriptu, který byl užit v části 8.4. Tuto část zajišťuje část kódu č. 9.6

```

1 // Ziskej casovou znacku v [ms]
2 unsigned long currentMillis = millis();
3 // Vypis merena data, presnost 2 desetiny mista
4 Serial.print(currentMillis);
5 Serial.print(",");
6 Serial.println(hmotnost,2);

```

**Kód 9.6:** Hlavní smyčka programu – odeslání měřených dat

# 10 Možnosti vylepšení měření

Kapitola pojednává o možnostech vylepšení měření z GA senzoru.

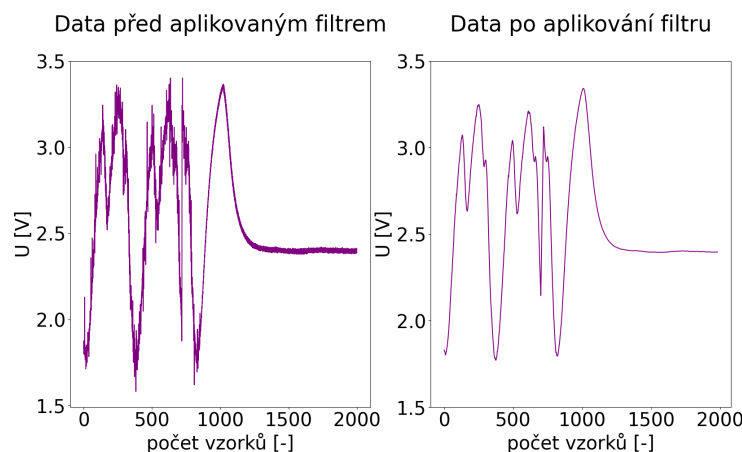
## 10.1 Filtrace dat

Filtrování dat může pomoci zlepšit měření. Existuje mnoho různých filtrů od jednodušších až po pokročilé. Například průměrovací filtr je jedním z nejjednodušších typů filtrů používaných pro úpravu dat. Jeho hlavním cílem je snížení vysokofrekvenčního šumu a hladké vyhlazení signálu tím, že počítá aritmetický průměr z několika po sobě jdoucích hodnot v rámci. Z kolika hodnot aritmetický průměr budeme počítat určuje tzv. velikost okna. Velikost okna pro průměrování určuje, jak moc bude filtr vyhlazovat signál. Větší okno vyhladí signál více, ale může také způsobit zpoždění ve změnách signálu. Tímto způsobem může filtrovaný signál lépe zobrazit trendy a nízkofrekvenční změny. Větší hodnota průměrovacího okna znamená vyšší vyhlazení signálu. Nevýhodou vyššího okna je vznik zpoždění ve změnách signálu. Příklad kódu takového filtru je níže v kódu č. 10.1. Nalezením vhodného filtru a jeho parametrů by bylo možné vylepšit měření.

```
1 def moving_average_filter(data: list, window_size: int):
2     filtered_data = []
3     for i in range(len(data) - window_size + 1):
4         window = data[i : i + window_size]
5         average = sum(window) / window_size
6         filtered_data.append(average)
7     return filtered_data
8
9 data_to_filter = [1, 2, 3, 4, 5, 7]
10 filtered_data = moving_average_filter(data_to_filter, 2)
11 # -> returns [1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 6.0]
```

Kód 10.1: Návrh funkce průměrovacího filtru

Aplikace tohoto filtru na vyhlazení dat je na obr. č. 40. Velikost okna byla zvolena 20 vzorků.



**Obrázek 40:** Aplikace průměrovacího filtru na měřená data z obr. č. 35 nalevo

## 10.2 Návrh nové měřicí desky

Navrhnutím lepší měřicí desky by mohl být zlepšen rozsah ADC a tím i měřených dat. Nemuselo by pak docházet k tomu, že se při měření dostaneme mimo rozsah ADC jako se tomu stalo při měření na obr. č. 30 nahoře. Ideálně by bylo navržení hodnot elektrického odporu u rezistorů zapojených do měřicího můstku (dle obr. č. 13) takové, aby jejich hodnota byla co nejbližší hodnotě elektrického odporu GA senzoru. Dále by bylo možné použít ADC o vyšším bitovém rozlišení, avšak v takovém případě by musela být deska navrhnutá tak, aby byl šum, který do analogového měření vnáší digitální část DPS, co nejmenší. Tohoto by šlo docílit vytvořením potenciálového valu, který by odděloval digitální a analogovou část. To je dobře popsáno v publikaci [49]. Veškeré analogové obvody by měly vytvářet co nejmenší uzavřené smyčky, aby docházelo k co nejmenšímu rušení.

Dále by měření zlepšilo, kdyby k přepínání mezi vstupy na můstek nebyl použit multiplexor, který do měření vnáší určitou chybu. Namísto toho by bylo vhodné užít více ADC součástek anebo součástky, které jsou více kanálové. Součástí diplomové práce je návrh elektronického zapojení takové lepší desky, který k měření využívá 4 ADC typu *MAX11270*. Tato součástka je 24 bitový delta sigma ADC převodník (stejný jako užitý *NAU7802*), které však nabízí možnosti nastavit rychlejší vzorkovací frekvenci, jelikož komunikuje přes rychlejší sběrnici Serial Peripheral Interface (SPI). [27]

V AV ČR byly úspěšné experimenty uchycení GA senzoru přímo na desku DPS, což je i očividné z konstrukce senzoru druhé verze. Na měřicí desce by tedy rovnou mohla být vytvořena měděná plocha pro instalaci GA senzoru, čímž by se zkrátila vzdálenost smyček analogových obvodů. Navrhnuté zapojení by bylo možné použít



k vytvoření návrhu DPS takové, že v každém rohu desky by byl umístěn jeden senzor. Deska by poté dokázala snímat 4 hodnoty z každého rohu senzoru a mohla by být použita na aplikaci například vytvoření matice senzorů nebo 2D váhy. Schéma elektronického zapojení může být dohledáno na přiloženém CD.

# 11 Závěr

V teoretické části této diplomové práce byla nejdříve představena problematika grafenového aerogelu, jakožto klíčové součásti senzorů, jimiž se tato práce zabývá. Byly popsány jednotlivé metody získávání GA a následné využití v různých typech senzorů. Detailněji byl popsán proces výroby taktilních senzorů využívajících GA obdržených od AV ČR. Byla též zpracována stručná rešerše dalších typů taktilních senzorů využívajících jiné principy snímání. Dále byla představena metodika měření a nastíněna problematika nejistot a chyb měření.

Praktická část nejprve popisuje zprovoznění měřicí desky, kterou navrhl a poskytl vedoucí práce. Deska je popsána po technické stránce a následně je popsána komunikace s touto deskou. Také jsou zmíněné problémy, které se na desce objevily, a možné způsoby jejich řešení. Bylo také provedeno ověření funkčnosti a následné měření můstkovou metodou napříč všemi kanály. Měření mělo lineární charakter, což odpovídalo očekávání.

Pro tuto diplomovou práci byly Akademií věd ČR poskytnuty dvě sady senzorů, v práci označovaných jako první a druhá verze. Každá verze senzorů byla popsána a bylo provedeno měření elektrického odporu v nezatíženém stavu. Na každé verzi senzorů byla provedena série měření - statické, odtížení senzorů a cyklické zatěžování. Na senzorech první verze probíhala měření pomocí můstkové metody. Měření na senzorech první verze nelze vyhodnotit jako důvěryhodná. Důvodem je to, že se později ukázalo, že někdy během měření došlo k rozpadu materiálu uvnitř senzoru a tím pádem k jeho nevratnému zničení. Na senzorech druhé verze byly aplikovány nové poznatky získané při měření na senzorech první verze. Byly udělány revize stávajících návrhů experimentů a též byla provedena podrobnější měření změny elektrického proudu/napětí při konstantním napětí/proudu. Z měření lze vyhodnotit, že lépe vycházela měření změny proudu za konstantního napětí. Poté byla provedena měření pomocí můstkové metody a získané hodnoty byly linearizovány pomocí metody nejmenších čtverců. U zkoušky cyklickým zatěžováním bylo pozorováno, že vznikl rozdíl napětí v nezatíženém stavu a byla pozorována hystereze.

V rámci praktické části byly navrženy a vyrobeny dvě ukázkové aplikace možného využití senzorů v praxi. U každé aplikace je popsán návrh konstrukce, elektronické zapojení a je doplněna obrazová dokumentace. První aplikace demonstruje možné využití v oblasti robotiky, konkrétně uchopování předmětů různými manipulátory. Ústrojí sestávalo z pevné a pohyblivé části, na které byl připevněn GA senzor, která měla za úkol bez poškození uchopit vejce. Aplikace fungovala dle očekávání a plnila určenou funkci. Druhá aplikace simulovala měřicí váhu. Tato aplikace obsahovala dva senzory a byla popsána principem *1D váhy*. Bohužel se před dokončením měření poškodil jeden ze senzorů a tudíž tato část zůstala pouze navržena teoreticky bez funkčního ověření měřením.

Praktickou část částečně uzavírá kapitola nastiňující možná další vylepšení měření. Softwarová varianta naznačuje možnost užití filtrace dat s ukázkou kódu filtru a možného výsledku po jeho užití. Další variantou, jež práce v této části rozebírá, je možný návrh nové měřicí desky, která by minimalizovala některé problémy spojené a objevené při měření na desce současné. K práci je jako příloha dodán datový nosič obsahující schémata elektronických zapojení, 3D modely a řídicí programy.

Práce ukázala, že senzory z grafénového aerogelu mají potenciál a mohou najít své využití, avšak budou muset ujit ještě nezanedbatelnou cestu, zejména z pohledu jejich konstrukce, která momentálně neumožňuje snadné a široké nasazení v praxi. Využití dodaných senzorů hodnotím spíše jako senzory vhodné pro kvalitativní vyhodnocování působící síly. Kvantitativní vyhodnocování je komplikované, jelikož senzor vykazuje hysterezi, jak bylo popsáno v kapitole cyklického zatěžování u senzorů druhé verze. Hystereze byla objevena i u senzoru první verze, ale zde nelze spolehlivě určit, že toto nemohlo být způsobené zničením senzoru.

## Seznam literatury

- [1] Adafruit. *Adafruit\_NAU7802*. URL: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_NAU7802](https://github.com/adafruit/Adafruit_NAU7802) (cit. 20.03.2023).
- [2] Adafruit. *Adafruit-MCP23008-library*. URL: [https://github.com/adafruit/Adafruit-MCP23008-library/blob/master/Adafruit\\_MCP23008.cpp](https://github.com/adafruit/Adafruit-MCP23008-library/blob/master/Adafruit_MCP23008.cpp) (cit. 20.03.2023).
- [3] Boxing An et al. „Three-dimensional multi-recognition flexible wearable sensor via graphene aerogel printing“. In: *Chem. Commun.* 52 (73 2016), s. 10948–10951. DOI: 10.1039/C6CC05910D. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C6CC05910D>.
- [4] Boxing An et al. „Three-dimensional multi-recognition flexible wearable sensor via graphene aerogel printing“. In: *Chem. Commun.* 52 (73 2016), s. 10948–10951. DOI: 10.1039/C6CC05910D. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C6CC05910D>.
- [5] Thomas G Beckwith a N Lewis Buck. *Mechanical Measurements*. en. 3. vyd. World Student S. London, England: Addison Wesley, dub. 1982.
- [6] Jianyu Cao et al. „Enhanced activity of Pd nanoparticles supported on Vulcan XC72R carbon pretreated via a modified Hummers method for formic acid electrooxidation“. In: *Applied Surface Science* 274 (2013), s. 138–143. ISSN: 0169-4332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.133>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433213004649>.
- [7] Xueyuan Cao et al. „1D/2D Nanomaterials Synergistic, Compressible, and Response Rapidly 3D Graphene Aerogel for Piezoresistive Sensor“. In: *Advanced Functional Materials* 30.35 (2020), s. 2003618. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202003618>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adfm.202003618>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202003618>.

- [8] National Pen Company. *What Is Pencil Lead Really Made Of?* URL: <https://www.pens.com/blog/what-is-pencil-lead-made-of/> (cit. 28.02.2023).
- [9] Ravinder S. Dahiya et al. „Tactile Sensing—From Humans to Humanoids“. In: *IEEE Transactions on Robotics* 26.1 (2010), s. 1–20. DOI: 10.1109/TR0.2009.2033627.
- [10] fayaz. *Linear Bearing-LM8UU*. URL: <https://grabcad.com/library/linear-bearing-lm8uu-3> (cit. 08.03.2023).
- [11] A. K. Geim. „Graphene: Status and Prospects“. In: *Science* 324.5934 (2009), s. 1530–1534. DOI: 10.1126/science.1158877. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1158877>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1158877>.
- [12] George Gorgolis a Costas Galiotis. „Graphene aerogels: a review“. In: *2D Materials* 4.3 (čvn. 2017), s. 032001. DOI: 10.1088/2053-1583/aa7883. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/2053-1583/aa7883>.
- [13] Tobias Hansen. *Prusa i3 MK2*. URL: <https://grabcad.com/library/prusa-i3-mk2-2> (cit. 08.03.2023).
- [14] Milan Hofreiter a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. *Identifikace systémů I*. Czech. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN: 9788001042281;8001042286;
- [15] Cheng Chi et al. „Recent Progress in Technologies for Tactile Sensors“. In: *Sensors* 18.4 (2018). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18040948. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/948>.
- [16] Byungjune Choi, Hyouk Ryeol Choi a Sungchul Kang. „Development of tactile sensor for detecting contact force and slip“. In: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2005, s. 2638–2643. DOI: 10.1109/IR0S.2005.1545267.
- [17] D. D. L. Chung. „A critical review of piezoresistivity and its application in electrical-resistance-based strain sensing“. In: *Journal of Materials Science* 55.32 (lis. 2020), s. 15367–15396. ISSN: 1573-4803. DOI: 10.1007/s10853-020-05099-z. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05099-z>.
- [18] Texas Instruments. *Application Note: A Basic Guide to Bridge Measurements*. URL: [https://www.ti.com/lit/an/sbaa532/sbaa532.pdf?ts=1690365693490&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/sbaa532/sbaa532.pdf?ts=1690365693490&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (cit. 16.03.2023).

- [19] Texas Instruments. *TMUX1108 datasheet*. URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmux1108.pdf?ts=1690456771570&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmux1108.pdf?ts=1690456771570&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (cit. 20.03.2023).
- [20] Yong Jiang et al. „One-step hydrothermal synthesis of three-dimensional porous graphene aerogels/sulfur nanocrystals for lithium–sulfur batteries“. In: *Journal of Alloys and Compounds* 645 (2015), s. 509–516. ISSN: 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.125>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815014292>.
- [21] „1: Glossary of basic terms in polymer science (1996)“. In: *Compendium of Polymer Terminology and Nomenclature*. Ed. Richard G Jones et al. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2009, s. 215–216.
- [22] S. S. KISTLER. „Coherent Expanded Aerogels and Jellies“. In: *Nature* 127.3211 (květ. 1931), s. 741–741. ISSN: 1476-4687. DOI: [10.1038/127741a0](https://doi.org/10.1038/127741a0). URL: <https://doi.org/10.1038/127741a0>.
- [23] Prabhat Kumar et al. „Contact resistance based tactile sensor using covalently cross-linked graphene aerogels“. In: *Nanoscale* 14 (4 2022), s. 1440–1451. DOI: [10.1039/D1NR06893H](https://doi.org/10.1039/D1NR06893H). URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D1NR06893H>.
- [24] Guanhao Liang et al. „Flexible Capacitive Tactile Sensor Array With Truncated Pyramids as Dielectric Layer for Three-Axis Force Measurement“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 24.5 (2015), s. 1510–1519. DOI: [10.1109/JMEMS.2015.2418095](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2015.2418095).
- [25] Hao Ma et al. „Simulation and Analysis of Mechanical Properties of Silica Aerogels: From Rationalization to Prediction“. In: *Materials* 11.2 (2018). ISSN: 1996-1944. DOI: [10.3390/ma11020214](https://doi.org/10.3390/ma11020214). URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/2/214>.
- [26] Vivek Maheshwari a Ravi F. Saraf. „High-Resolution Thin-Film Device to Sense Texture by Touch“. In: *Science* 312.5779 (2006), s. 1501–1504. DOI: [10.1126/science.1126216](https://doi.org/10.1126/science.1126216). eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1126216>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1126216>.
- [27] MAX11270 *Datasheet*. *Linear Bearing-LM8UU*. URL: [https://cdn.sparkfun.com/assets/9/6/2/c/0/MAX11270\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/9/6/2/c/0/MAX11270_Datasheet.pdf) (cit. 23.05.2023).
- [28] Microchip. *MCP23008 datasheet*. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21919e.pdf> (cit. 20.03.2023).

- [29] Naila Moloo. *Meet Aerographene, The Material Lighter Than Air and Stronger Than Steel*. URL: <https://studentsxstudents.com/meet-aerographene-the-material-lighter-than-air-and-stronger-than-steel-2d0374a43a16> (cit. 02.03.2023).
- [30] Fengxiao Niu et al. „Ultralight and Hyperelastic Nanofiber-Reinforced MXene–Graphene Aerogel for High-Performance Piezoresistive Sensor“. In: *Advanced Materials Technologies* 6.11 (2021), s. 2100394. DOI: <https://doi.org/10.1002/admt.202100394>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/admt.202100394>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admt.202100394>.
- [31] Martin Novák a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. *Technická měření*. Czech. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN: 9788001063880;8001063887;
- [32] Nuvoton. *NAU7802 datasheet*. URL: <https://www.nuvoton.com/resource-files/NAU7802%20Data%20Sheet%20V1.7.pdf> (cit. 20.03.2023).
- [33] Cambridge University Press. *Cambridge Dictionary*. URL: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/aerogel> (cit. 28.02.2023).
- [34] The Nobel Prize. *The Nobel Prize in Physics 2010*. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/press-release/> (cit. 28.02.2023).
- [35] Pro'sKit. *MT-1710 Digital True RMS-Multimeter*. URL: [https://img.gme.cz/files/eshop\\_data/eshop\\_data/1/722-509/deutch.722-509.1.pdf](https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/1/722-509/deutch.722-509.1.pdf) (cit. 16.03.2023).
- [36] Daniel Řehák. „Konstrukce robotické ruky“. Bachelor's Thesis. ČVUT v Praze, 2021.
- [37] İbrahim Şahin et al. „Kinetics of Supercritical Drying of Gels“. In: *Gels* 4.1 (2018). ISSN: 2310-2861. DOI: [10.3390/gels4010003](https://doi.org/10.3390/gels4010003). URL: <https://www.mdpi.com/2310-2861/4/1/3>.
- [38] Martin Silhavič et al. „Anomalous elasticity and damping in covalently cross-linked graphene aerogels“. In: *Communications Physics* 5 (led. 2022). DOI: [10.1038/s42005-022-00806-5](https://doi.org/10.1038/s42005-022-00806-5).
- [39] Manuals+User Manuals Simplified. *SIGURO SCR-SC-J640B Digital Scale Instruction Manual*. URL: <https://manuals.plus/siguro/scr-sc-j640b-digital-scale-manual> (cit. 02.04.2023).

- [40] Irina Smirnova a Pavel Gurikov. „Aerogel production: Current status, research directions, and future opportunities“. In: *The Journal of Supercritical Fluids* 134 (2018). 30th Year Anniversary Issue of the Journal of Supercritical Fluids, s. 228–233. ISSN: 0896-8446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.037>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844617307684>.
- [41] Bio Graphene Solutions. *TECHNOLOGY*. URL: <https://biographenesolutions.com/technology/> (cit. 27.02.2023).
- [42] *Vývojová deska Arduino Uno*. URL: <https://allegro.cz/nabidka/originalni-arduino-uno-rev3-a000066-10456311519> (cit. 06.08.2023).
- [43] Jian Wang a Mark Ellsworth. „Graphene Aerogels“. In: *ECS Transactions* 19.5 (květ. 2009), s. 241. DOI: 10.1149/1.3119548. URL: <https://dx.doi.org/10.1149/1.3119548>.
- [44] Marcus A. Worsley et al. „Synthesis of Graphene Aerogel with High Electrical Conductivity“. In: *Journal of the American Chemical Society* 132.40 (2010). PMID: 20860374, s. 14067–14069. DOI: 10.1021/ja1072299. eprint: <https://doi.org/10.1021/ja1072299>. URL: <https://doi.org/10.1021/ja1072299>.
- [45] Shuying Wu et al. „Strain Sensors with Adjustable Sensitivity by Tailoring the Microstructure of Graphene Aerogel/PDMS Nanocomposites“. In: *ACS Applied Materials Interfaces* 8 (srp. 2016), s. 24853–24861. DOI: 10.1021/acsami.6b06012.
- [46] Hui Xie et al. „Pixel-based optical fiber tactile force sensor for robot manipulation“. In: *SENSORS, 2012 IEEE*. 2012, s. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2012.6411462.
- [47] Yuxi Xu et al. „Self-Assembled Graphene Hydrogel via a One-Step Hydrothermal Process“. In: *ACS Nano* 4.7 (2010). PMID: 20590149, s. 4324–4330. DOI: 10.1021/nn101187z. eprint: <https://doi.org/10.1021/nn101187z>. URL: <https://doi.org/10.1021/nn101187z>.
- [48] Congxing Yang et al. „Graphene Aerogel Broken to Fragments for a Piezoresistive Pressure Sensor with a Higher Sensitivity“. In: *ACS Applied Materials & Interfaces* 11.36 (2019). PMID: 31449746, s. 33165–33172. DOI: 10.1021/acsami.9b12055. eprint: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b12055>. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b12055>.



- [49] Vít Záhřava. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Czech. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN: 8073002663;9788073002664;

# Seznam obrázků

1	Struktura grafitu a grafenu, převzato a upraveno z [41] . . . . .	3
2	Struktura aerogelu na bázi oxidu křemičitého – upraveno a převzato z [25] . . . . .	4
3	Proces přeměny vodného roztoku GO (nalevo) na grafenový hydrogel (napravo) – upraveno a převzato z [47] . . . . .	5
4	Ultralehký grafenový aerogel usazený na květině – převzato z [29] . .	6
5	Nalevo taktilní senzor, napravo citlivost senzoru – upraveno a převzato z [7] . . . . .	8
6	Nalevo taktilní senzor, napravo citlivost senzoru – upraveno a převzato z [30] . . . . .	8
7	Nalevo taktilní senzor, napravo graf relativní změny odporu v závislosti na tlaku – upraveno a převzato z [4] . . . . .	9
8	Různé konfigurace uchycení pinů – upraveno a převzato z [23] . . . .	10
9	Naměřené hodnoty deformační citlivosti pro tah a tlak – upraveno a převzato z [23] . . . . .	11
10	Naměřené hodnoty deformační citlivosti pro tah a tlak – převzato z [36]	13
11	Princip mechanismu <i>light intensity modulation</i> - převzato z [46] . . .	13
12	Pyramidová konstrukce kapacitního senzoru - převzato z [24] . . . . .	14
13	Zapojení Wheatstoneova můstku, převzato z [18] . . . . .	20
14	Měřicí deska nalevo, hlavní deska s připojeným programátorem napravo	21
15	Užitá vývojová deska Arduino Uno, převzato z [42] . . . . .	21
16	Testování měřicího můstku a lineární aproximace . . . . .	24
17	Testovací stojan užitý k měření . . . . .	26
18	Výsledky statického měření . . . . .	28
19	Výsledky měření odtížení senzoru . . . . .	28
20	První derivace měření odtížení senzoru – zobrazeno pouze do času cca 100 s . . . . .	29

21	Sestava pro měření cyklického namáhání . . . . .	30
22	Výsledky měření cyklického namáhání . . . . .	31
23	Rozpad GA uvnitř první verze senzoru . . . . .	31
24	Vyvedení kontaktů ze senzoru na čtyři konektory u druhé verze senzoru	32
25	Verze senzorů – nalevo první verze, napravo druhá verze . . . . .	33
26	Nová měřicí sestava . . . . .	34
27	Možný vznik chyby měření při užití více kuliček . . . . .	35
28	Výsledky měření na senzoru č. 1 a 2 při konstantní hodnotě proudu .	35
29	Výsledky měření na senzoru č. 1 a 2 při konstantní hodnotě napětí . .	36
30	Výsledky měření na senzoru č. 1 a 2 při měření na můstku . . . . .	37
31	Dynamika změny napětí senzoru č. 1 při $I=\text{const}=50\text{mA}$ . . . . .	39
32	Dynamika změny napětí senzoru č. 2 při $I=\text{const}=15\text{mA}$ . . . . .	39
33	Mechanismus pro cyklické zatěžování . . . . .	40
34	Průběh napětí při cyklickém zatěžování . . . . .	41
35	Průběh napětí při cyklickém zatěžování – na začátku a na konci . . .	41
36	Konstrukce uchopovacího zařízení . . . . .	43
37	Schéma zapojení robotické aplikace . . . . .	44
38	Nalevo reálná aplikace váhy, napravo render . . . . .	47
39	Schéma zapojení váhové aplikace . . . . .	47
40	Aplikace průměrovacího filtru na měřená data z obr. č. 35 nalevo . . .	52

## Seznam tabulek

5.1	Přesnost multimetru při měření el. odporu . . . . .	17
5.2	Přesnost multimetru při měření el. proudu . . . . .	18
6.1	Naměřené hodnoty z ADC pomocí odporové dekády . . . . .	23
7.1	Naměřené hodnoty el. odporu v nezatíženém stavu . . . . .	25
7.2	Naměřené hmotnosti kuliček, které byly použity k zatěžování . . . . .	27
8.1	Naměřené hodnoty el. odporu v nezatíženém stavu . . . . .	33
8.2	Naměřené hodnoty el. odporu . . . . .	34

# Seznam kódů

9.1	Inicializace objektů . . . . .	44
9.2	Nastavení objektů ADC, MCP23008 a krokového motoru . . . . .	44
9.3	Blok zastavení motoru při splnění daných podmínek . . . . .	45
9.4	Funkce nacti_hodnoty() . . . . .	49
9.5	Hlavní smyčka programu – získání měřené hmotnosti . . . . .	50
9.6	Hlavní smyčka programu – odeslání měřených dat . . . . .	50
10.1	Návrh funkce průměrovacího filtru . . . . .	51

# Seznam příloh

Příloha č. 1: CD

# Seznam použitého softwaru

Autodesk Inventor 2022

Overleaf  $\text{\LaTeX}$  editor

STMStudio

STM32CubeIDE

Prusa Slicer

Inventor

Arduino IDE

Visual Studio Code

Python

KiCAD 6

PC software pro OWON XDS3000 4CH osciloskop