



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ZPRACOVÁNÍ ANALOGOVÉHO SIGNÁLU Z PIEZOELEKTRICKÉHO SENZORU

ANALOG FRONT-END FOR PIEZOELECTRIC SENSOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Wich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Petr Wich**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Rubeš**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zpracování analogového signálu z piezoelektrického senzoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Piezoelektrický senzor lze použít pro měření mechanického přetvoření, podobně jako tenzometr. Pro každý druh měření je vhodný jiný typ elektroniky. Srovnání možných zapojení je tak dobrým krokem pro další vývoj takovýchto měřících zařízení.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše obvodů používaných pro zpracování analogového signálu z piezoelektrického senzoru
2. Návrh a výroba vybraných obvodů
3. Testování vyrobených obvodů a jejich vzájemné srovnání

Seznam doporučené literatury:

STOKLÁSEK, P. Převodník pro piezoelektrické snímače. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 4., dopl. vyd. Praha: BEN, 1999, 494 s. : il. ISBN 80-86056-37-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Účelem práce bylo popsat a porovnat vlastnosti elektrických obvodů používaných pro analogové zpracování signálu z piezoelektrického senzoru. Nejprve byla popsána základní zapojení, následně byl proveden návrh empirickou metodou a realizace převodníku proudu na napětí, nábojového zesilovače a obvodu pro snímače napětí na paralelním rezistoru. Pro účely jejich otestování byla vytvořena testovací soustava. S vytvořenými obvody bylo provedeno měření, při kterém byly obvody vzájemně porovnány a popsány jejich vlastnosti.

Abstract

The purpose of the thesis was to describe and compare the properties of analog front end for piezoelectric sensor circuits. First, the basic circuit was described, then the design and implementation of the current-to-voltage converter, the charge amplifier and the circuit for voltage sensors on the parallel resistor were carried out. There was construct measuring system for measurement of the circuits. At last was made measurement of the created circuits, results were compared with each other, and their properties described.

Klíčová slova

Piezoelektrický snímač, nábojový zesilovač, převodník proudu na napětí, analogový signál, napěťový sledovač, integrační člen, operační zesilovač

Keywords

Piezoelectric sensor, charge amplifier, current to voltage converter, analog signal, voltage tracker, integrating element, Analog Front End, operational amplifier

Bibliografická citace

WICH, Petr. *Zpracování analogového signálu z piezoelektrického senzoru* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139828>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ondřej Rubeš.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Zpracování analogového signálu z piezoelektrického senzoru“ jsem vypracoval samostatně, pod vedením svého vedoucího bakalářské práce a s pomocí odborné literatury, kterou jsem citoval v seznamu použité literatury.

V Brně dne 20.5.2022

.....

Petr Wich

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce Ing. Ondřeji Rubešovi za ochotu a vlídný přístup.

OBSAH

1. ÚVOD	12
2. PIEZOELEKTRICKÝ JEV	13
2.1. PIEZOELEKTRICKÉ KONSTANTY.....	14
2.1.1. VEKTOR POLARIZACE.....	14
2.1.2. NÁBOJOVÁ KONSTANTA D_{ij} [C/N]	14
2.1.3. NAPĚŤOVÁ KONSTANTA G_{ij} [VM/N].....	15
2.1.4. RELATIVNÍ DIELEKTRICKÁ KONSTANTA K [-].....	15
2.1.5. CURIEOVA TEPLOTA T_c [°C].....	15
2.1.6. YOUNGŮV MODUL PRUŽNOSTI E [PA]	15
2.2. PIEZOELEKTRICKÝ SNÍMAČ MFC.....	16
2.3. NÁHRADNÍ SCHÉMA PIEZOELEKTRICKÉHO SNÍMAČE	17
3. PŘEVODNÍKY PRO PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE	18
3.1. NÁBOJOVÝ ZESILOVAČ.....	18
3.1. NAPĚTÍ NA PARALELNÍ KAPACITĚ.....	20
3.2. PŘEVODNÍK PROUDU NA NAPĚTÍ.....	21
3.3. SNÍMÁNÍ NAPĚTÍ NA PARALELNÍM REZISTORU.....	22
4. VÝROBA TESTOVACÍ SOUSTAVY	23
4.1. SNÍMAČ	23
4.2. NÁVRH MECHANICKÉ KONSTRUKCE	24
4.3. VOLBA KOMPONENT	24
4.3.1. SERVOMOTOR	25
4.3.1. ARDUINO NANO V3	26
4.1. SESTAVENÍ SOUSTAVY	27
4.2. PROGRAM SERVOMOTORU.....	28
5. NÁVRH VYBRANÝCH ZAPOJENÍ	30
5.1. VÝROBA PROTOTYPU	31
5.2. MĚŘENÍ	32
5.3. ÚPRAVA NÁVRHU OBVODŮ	33
6. VÝROBA ZAPOJENÍ	34
6.1. NÁBOJOVÝ ZESILOVAČ.....	34
6.2. PŘEVODNÍK PROUDU NA NAPĚTÍ.....	34
6.3. SLEDOVÁNÍ NAPĚTÍ NA ODPORU	35
6.4. OSAZENÍ DESKY PLOŠNÉHO SPOJE A KOMPLETACE SOUSTAVY.....	36
7. MĚŘENÍ A POROVNÁNÍ ZAPOJENÍ	38
7.1. NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY	38
7.2. POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH PRŮBĚHŮ	39
8. ZÁVĚR	40
9. SEZNAM OBRÁZKŮ	41
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	42

1. Úvod

Piezoelektrické materiály mají v technické praxi mnoho využití. Mohou být použity jako akční člen, snímač nebo jako zdroj energie. Z toho důvodu je jejich využití stále častější.

Piezoelektrické snímače nepotřebují pro svou funkci vnější zdroj energie, řadí se mezi aktivní snímače. Při působení vnější síly produkují náboj úměrný této síle. Jejich využití je zejména při sledování dynamických dějů. Výstupní signál není pro svou vysokou impedanci vhodný k přímému zpracování. Je nutné jej nejprve připojit k meziobvodu s napěťovým výstupem o nízké výstupní impedanci.

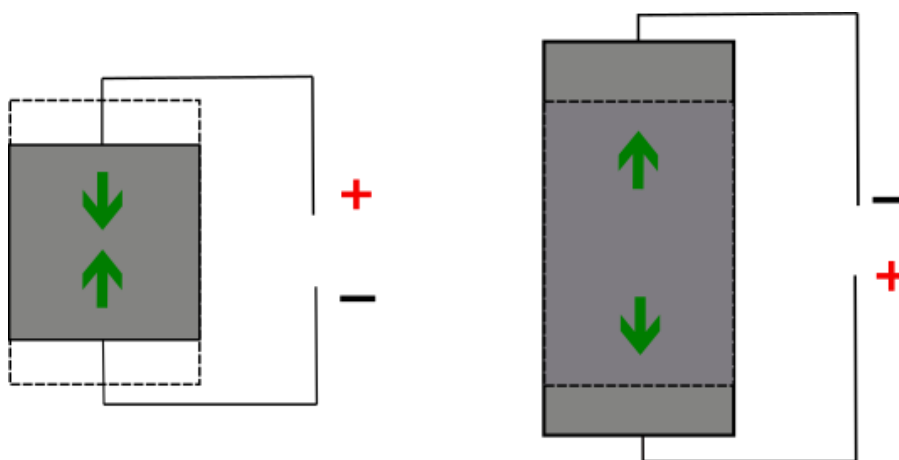
Výstupní napětí těchto obvodů může udávat buď velikost, nebo rychlost deformace snímače. Nejvhodnější způsob realizace obvodů je za použití některého zapojení s operačním zesilovačem. Takový signál již může být připojen k A/D převodníku.

Většina odborných textů zabývajících se návrhem a využitím takových meziobvodů jsou zpracovány v anglickém jazyce a neobsahují přímé porovnání jejich vlastností. Cílem této práce tak bylo shrnutí vlastností piezoelektrického snímače a vzájemné porovnání základních zapojení obvodů pro zpracování výstupního signálu z piezoelektrického snímače.

2. Piezoelektrický jev

Při mechanickém namáhání piezoelektrického materiálu na něm vzniká elektrický náboj, který je úměrný síle na materiál působící. Tento děj se nazývá přímý piezoelektrický jev. Naopak v případě přivedení elektrického náboje na tento materiál dojde k jeho deformaci, což se označuje jako nepřímý piezoelektrický jev. [1]

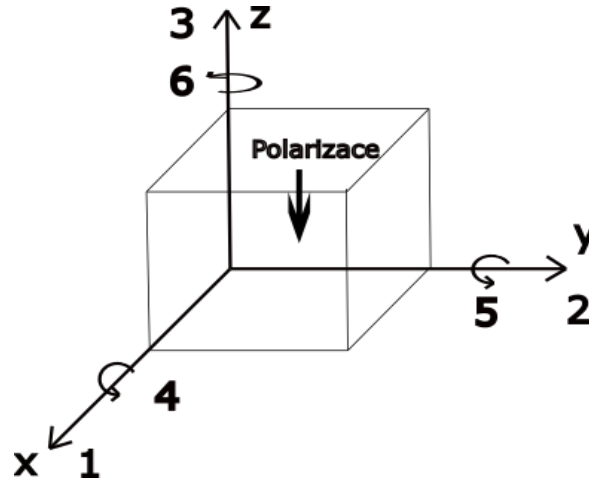
Pro vznik piezoelektrického jevu je důležité, aby krystaly materiálu byly anizotropní a rozmístění jejich náboje bylo nesymetrické. Molekuly takového materiálu musí také být polarizovány, jedna strana je nabitá kladně a druhá záporně. Polarizace může být u materiálu přirozeně nebo jí lze docílit výrobním procesem. Ten spočívá ve vystavení materiálu stejnosměrnému elektrickému poli za teploty blízké Curieho teplotě. Molekuly materiálu pak zůstanou z větší části orientovány ve směru polarizace. [2],[3]



Obrázek 1 Piezoelektrický jev

2.1. Piezoelektrické konstanty

Piezoelektrické konstanty udávají závislost výstupní veličiny na vstupní, informace o nich byly čerpány z [1] a [4]. Orientace všech působících i generovaných veličin se udává indexem v podobě čísla. Tyto indexy nabývají hodnot 1 až 6, kde čísla 1, 2, 3 udávají směr v ose a 4, 5, 6 pak rotaci kolem jednotlivých os, viz Obrázek 2.



Obrázek 2 Směrové indexy

2.1.1. Vektor polarizace

Je směrový vektor, který udává jakým směrem je orientován náboj v jednotlivých krystalech materiálu.

2.1.2. Nábojová konstanta d_{ij} [C/N]

Udává velikost náboje vygenerovaného piezoelektrickým materiálem při jeho namáhání mechanickým napětím a uzavřeném obvodu výstupních elektrod. Lze jí vyjádřit rovnicí

$$D_i = d_{ij} \cdot T_j . \quad (1)$$

Kde T_j [N/m²] označuje působící mechanické napětí, D_i [C/m²] pak hustotu generovaného náboje. Vztah platí i při výpočtu vzniklého mechanického napětí při působení známé nábojové hustoty na materiál. Indexem i se udává směr, kterým proudí náboje vygenerované působícím mechanickým napětím. Index j pak udává směr působení onoho napětí. V praxi se často objevují konstanty d_{33} a d_{31} .

2.1.3. Napěťová konstanta g_{ij} [Vm/N]

Vyjadřuje závislost generovaného elektrického pole E_i [V/m] na působícím mechanickém napětí T_j [N/m²] při rozpojených výstupních elektrodách.

$$E_i = -g_{ij} \cdot T_j \quad (2)$$

Vztah platí i při výpočtu vzniklého mechanického napětí za působení známé intenzity napětí na materiál. Index i udává orientaci generovaného elektrického pole a j směr působícího mechanického napětí.

2.1.4. Relativní dielektrická konstanta K [-]

Jedná se o bezrozměrnou konstantu vyjadřující poměr mezi permitivitou piezoelektrického materiálu a permitivitou vakua $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]. Kapacitu piezoelektrického materiálu mezi elektrodami C [F] lze vypočítat pomocí vztahu

$$C = \frac{K_3 \cdot \epsilon_0 \cdot S}{T} \quad (3)$$

Kde S vyjadřuje plochu elektrod [m²] a T [m] tloušťku piezoelektrického materiálu. Koeficient u K značí směr, ve kterém je relativní permitivita udána.

2.1.5. Curieova teplota T_c [°C]

Označuje teplotu, při níž dochází uvnitř materiálu k rekrystalizaci a materiál tím ztrácí své piezoelektrické vlastnosti. U průmyslově vyráběných piezoelektrických materiálů je snaha dosáhnout co možná nejvyšší hodnoty.

2.1.6. Youngův Modul pružnosti E [Pa]

Udává poměr mezi mechanickým napětím a deformací, kterou napětí vyvolá

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4)$$

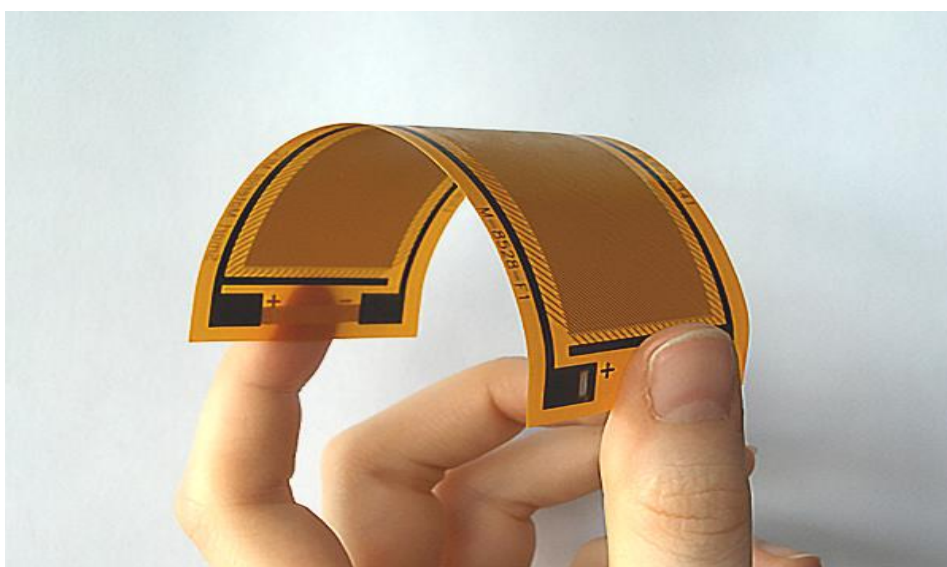
Kde σ [Pa] udává působící napětí a ϵ [-] je poměrná deformace

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5)$$

Δl [m] je změna délky tělesa a l_0 [m] původní délka tělesa

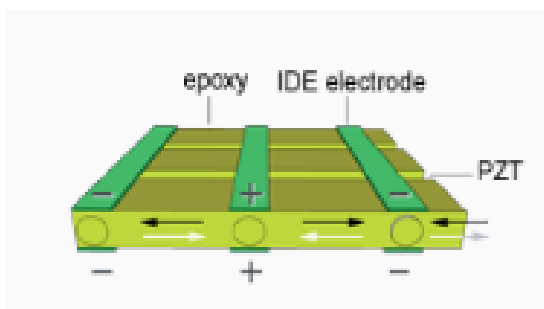
2.2. Piezoelektrický snímač MFC

Materiál byl vyvinut v NASA roku 1999. Plné znění označení materiálu je Macro Fiber Composite. Jedná se o kompozitní nízkoprofilové snímače mechanického napětí, jejichž výhodou je vysoká flexibilita a mechanická odolnost. Mezi další výhody patří také snadná aplikace na velké množství povrchů. Je možné je využít buď jako akční člen, nebo jako zdroj náboje. Při použití jako snímač se využívá schopnost materiálu generovat náboj. Z principu snímače vychází, že pro jeho funkci není zapotřebí vnějšího zdroje energie. [6]



Obrázek 3 MFC materiál [6]

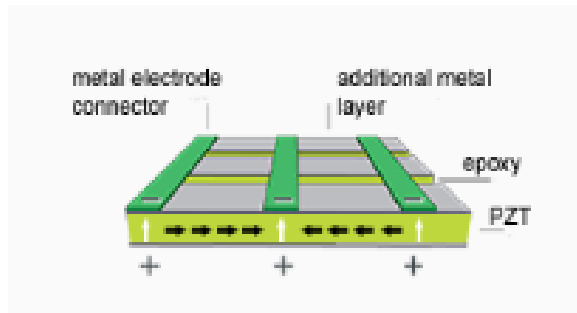
V závislosti na předpokládaném charakteru namáhání snímače se rozlišují jeho dvě varianty. Varianta určená pro namáhání tahem je označena jako P1.



Obrázek 4 Snímač P1 [6]

Černé šipky na obrázku označují směr deformace, zatímco bílé označují směr elektrického pole. Uplatňuje se u nich tedy nábojová konstanta d_{33} . Výstupní napětí na elektrodách se pohybuje v rozmezí -500 V až 1500 V. [6]

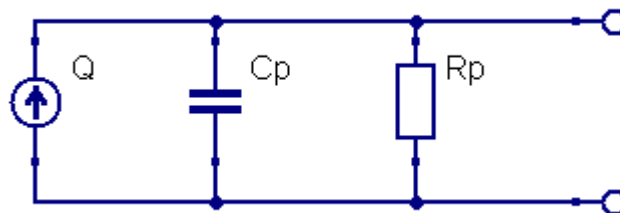
Varianty určené pro namáhání tlakem nese označení P2 nebo P3.



Obrázek 5 MFC typ P2/P3 [6]

Nábojová konstanta použitá k výpočtům je d_{31} . Velikost napětí, které vzniká na elektrodách snímače může nabývat velikosti od -60 V do 360 V. Varianty se od sebe liší polaritou a velikostí generovaného napětí na výstupních svorkách při stejné deformaci a také vlastní kapacitou snímače. Tyto rozdílné vlastnosti vychází z mechanické konstrukce snímačů. [6]

2.3. Náhradní schéma piezoelektrického snímače



Obrázek 6 Náhradní model s proudovým zdrojem

Chování piezoelektrického materiálu lze popsat z pohledu jeho elektrických vlastností náhradním modelem s proudovým zdrojem viz Obrázek 6. Schéma se skládá z proudového zdroje Q v kombinaci s paralelně připojenou kapacitou C_p a odporem R_p .

Náboj vycházející z proudového zdroje přímo odpovídá velikosti deformace ε ,

$$Q = \varepsilon . \quad (6)$$

Změna deformace $\dot{\varepsilon}$ pak odpovídá proudu I , který je časovou derivací náboje,

$$I = \dot{\varepsilon} . \quad (7)$$

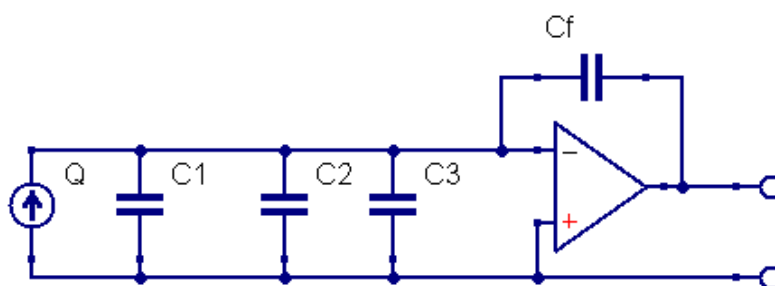
Hodnota C_p je určena laboratorním měřením daného snímače. Odpor R_p pak představuje měřitelný stejnosměrný odpor snímače. Obvykle nabývá hodnot v řádech $G\Omega$, z toho důvodu bývá zanedbáván. [5],[8],[9]

3. Převodníky pro piezoelektrické snímače

Piezoelektrický snímač není pro jeho vysokou výstupní impedanci vhodný pro připojení k vyhodnocovací elektronice. Je nutné signál nejprve zpracovat pomocí převodníku, který jej převede na napěťový signál o nízké impedanci a vhodně zesílí.

Obvody pro zpracování signálu mohou být integrovány přímo do snímače, což vede k vyšší ceně snímače, ale také vyšší odolnosti proti rušení. Nebo se může elektronika nacházet vně snímače a být připojena vodiči. Toto řešení je náchylné k rušení a projevují se zde také vlastnosti přívodních vodičů. Jedná o levnější, a v případě poruchy opravitelné řešení.

3.1. Nábojový zesilovač



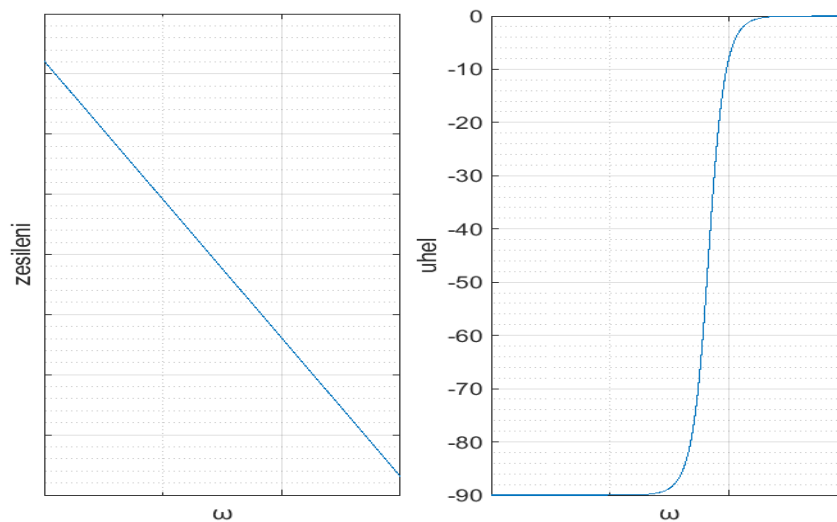
Obrázek 7 Zapojení s nábojovým zesilovačem

Obrázek 7 zobrazuje spojení piezoelektrického snímače a nábojového zesilovače včetně parazitní kapacity propojovacích vodičů. Kapacita C_2 znázorňuje kapacitu vodičů, C_3 je vstupní kapacita zesilovače. Obě tyto kapacity jsou v řádech pF, jsou tedy zanedbatelné oproti vlastní kapacitě snímače C_1 a zpětnovazební kapacitě C_f .

Operační zesilovač zajistí, že na kapacitě snímače nevznikne žádné napětí, všechny náboj ze snímače tedy musí vstoupit do výstupu operačního zesilovače. Při průchodu náboje kondenzátorem na něm vznikne napětí o velikosti

$$U = -\frac{dQ}{dt} \frac{1}{j \cdot \omega \cdot (C_1 + C_f)}. \quad (8)$$

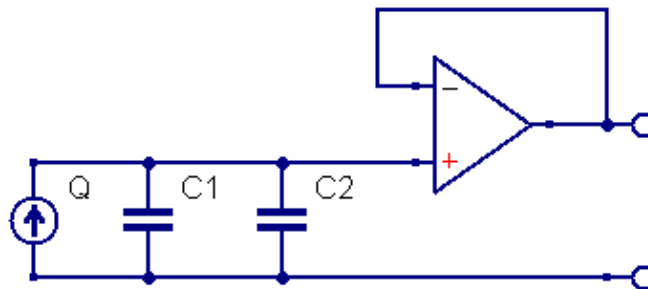
Výstupní napětí převodníku je tedy přímo úměrné náboji vzniklému na snímači Q a nepřímo úměrné kapacitě zpětnovazební kondenzátoru C_f . Čím vyšší je jeho kapacita, tím nižší je výstupní napětí. Jeho polarita je opačná oproti polaritě náboje. Piezoelektrický snímač v kombinaci s nábojovým zesilovačem se chová jako tenzometr. [8],[9]



Obrázek 8 Frekvenční charakteristiky nábojového zesilovače

Frekvenční charakteristiky jsou zobrazeny při uvažování proudu I jako vstupní veličiny.

3.1. Napětí na paralelní kapacitě



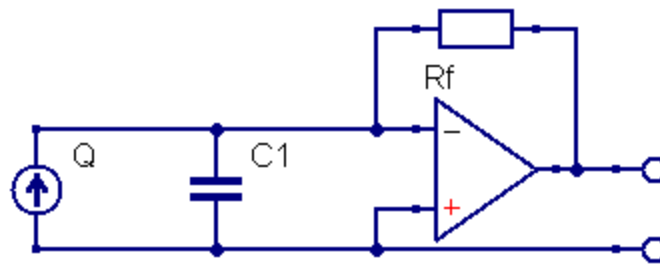
Obrázek 9 Paralelně připojená kapacita s napětovým sledovačem

Obrázek 9 zobrazuje kapacitu paralelně připojenou ke snímači a doplněnou o napětový sledovač. Kapacita C_1 značí kapacitu snímače a C_2 připojenou kapacitu. Napětový sledovač slouží k oddělení měřícího obvodu od snímače. Vstupní impedance obvodu by ovlivňovala výstupní napětí. Velikost vzniklého napětí lze vyjádřit vztahem

$$U = \frac{dQ}{dt} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot (C_1 + C_2)} \quad (9)$$

Napětí je závislé na vzniklém náboji Q a na kapacitách C_1 a C_2 . Využití tohoto zpracování je zejména při velké deformaci snímače nebo při využití vysoce citlivého snímače, kdy by vzniklý náboj mohl poškodit operační zesilovač, do kterého by přes zpětnou vazbu náboj vstupoval. V tomto zapojení má piezoelektrický snímač podobné chování jako tenzometr. Frekvenční charakteristiky zapojení jsou stejné jako u nábojového zesilovače. [9]

3.2. Převodník proudu na napětí



Obrázek 10 Spojení snímače a převodníku proudu na napětí

Obrázek 10 zobrazuje schéma spojení snímače a převodníku proudu na napětí. Operační zesilovač zabráňuje vzniku napětí na snímači, proud vycházející ze snímače musí procházet zpětnovazebním odporem R_f a je pohlcován operačním zesilovačem. Procházející proud tak vytváří napětí v závislosti na Ohmově zákonu

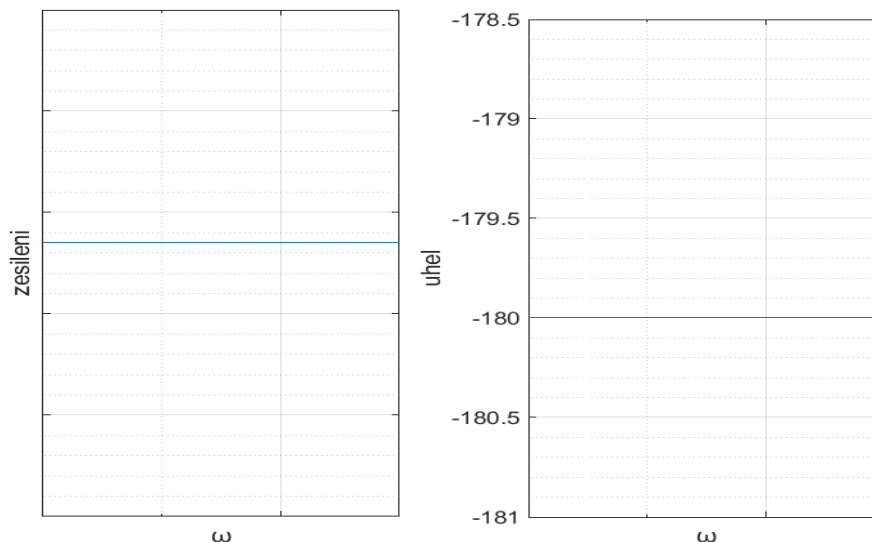
$$U = R \cdot I. \quad (10)$$

Kde I je proud vycházející z proudového zdroje Q . Při dosazení časové derivace náboje za velikost proudu vznikne závislost

$$U = R_f \cdot \frac{dQ}{dt}. \quad (11)$$

Kde napětí U je napětí na výstupu obvodu a Q vzniklý náboj, který je přímo úměrný působící síle. Napětí je tedy závislé na rychlosti deformace a zpětnovazebním odporu R_f . Jeho velikostí tak lze nastavit zesílení obvodu.

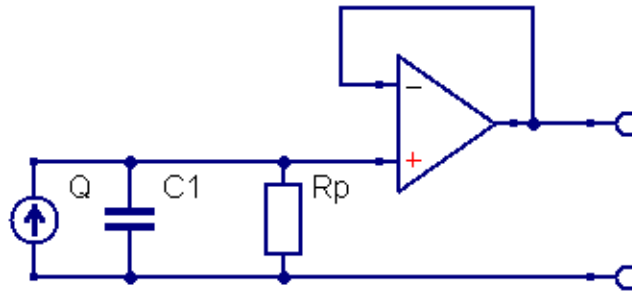
Napětí na výstupu reprezentuje rychlost deformace. Zpětnovazební zapojení způsobí jeho opačnou polaritu oproti náboji, který napětí vytvořil. [8], [9]



Obrázek 11 Frekvenční charakteristiky převodníku proudu na napětí

Charakteristiky jsou zobrazeny při uvažování proudu jako vstupní veličiny.

3.3. Snímání napětí na paralelním rezistoru



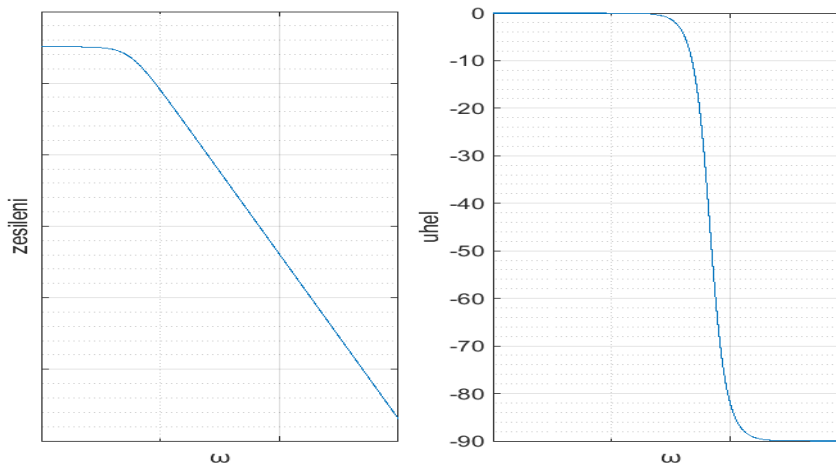
Obrázek 12 Paralelně připojená odpor s napěťovým sledovačem

Obrázek 12 je zobrazuje paralelní spojení snímače a odporu, na kterém je sledováno napětí pomocí napěťového sledovače. Ten slouží k oddělení měřícího obvodu od snímače. Vstupní impedance obvodu by ovlivňovala výstupní napětí.

Paralelním spojením snímače a odporu vzniká RC článek. Velikost napětí na výstupu vychází z 1. Kirchhoffova zákona, kdy se proud vycházející ze snímače dělí mezi proud rezistorem a kondenzátorem. Výstupní napětí je dáno vztahem

$$U = \frac{dQ}{dt} \cdot \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (12)$$

Výstupní napětí je tedy také závislé na frekvenci, vzniklém náboji, paralelním odporu R_p a vlastní kapacitě C_1 . Výhoda tohoto zapojení je, zejména při použití snímače generujícího velké množství náboje, který by mohl poškodit operační zesilovač s odporem ve zpětné vazbě.



Obrázek 13 Frekvenční charakteristiky výstupního napětí při měření na paralelním odporu

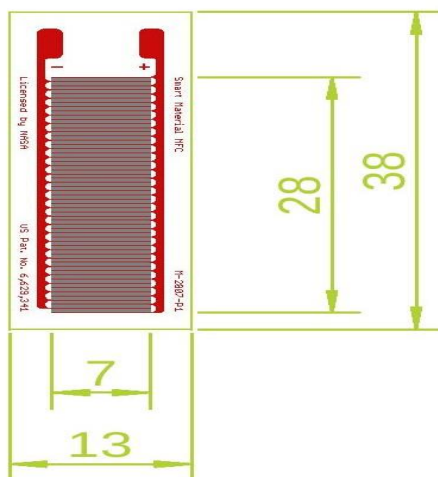
Při nízkých rychlostí změny deformace je zesílení zapojení konstantní, chová se tedy jako převodník proudu na napětí. Změna nastává při dosažení rychlosti změny $\omega = \frac{1}{R \cdot C}$. Zesílení se pak s rostoucí rychlostí snižuje. Frekvenční charakteristiky jsou vyjádřeny při uvažování proudu I jako vstupní veličiny. [5], [8], [9]

4. Výroba testovací soustavy

Za účelem provedení měření a srovnání zvolených zapojení, bylo nutné vytvořit soustavu, která umožnila stabilní upevnění snímačů. Následně bylo možné definovat podmínky deformace pozorovaného materiálu. To umožnilo naladění výstupního napětí zvolených obvodů na srovnatelnou úroveň, a především opakovatelnost provedených měření. Pro každý navrhovaný obvod byl zvolen samostatný snímač.

4.1. Snímač

Aby byly vstupní hodnoty do všech obvodů srovnatelné, musí být zdrojem signálu pro všechny obvody stejný snímač. Bylo tedy rozhodnuto o použití snímače M2807-P1. Jedná o snímač typu P1, na kladné elektrodě při deformaci tahem vytváří kladné napětí. Oproti variantám snímače P2 nebo P3 je jeho výhodou vyšší nábojová konstanta, při stejné deformaci vytvoří větší náboj. Obrázek 14 a Tabulka 1 popisují parametry snímače. Převezaty byly z webu [12].



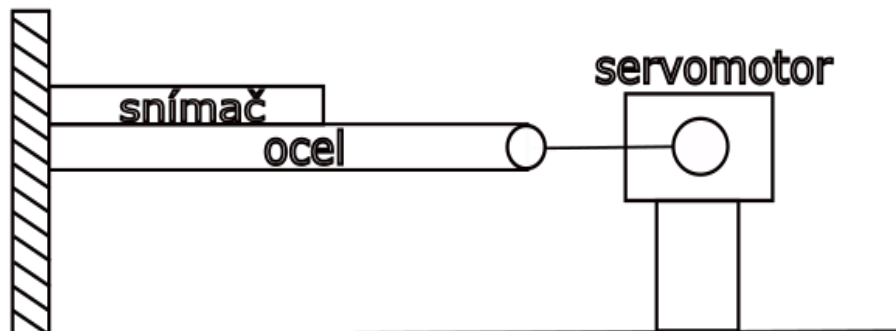
Obrázek 14 Piezoelektrický prvek M2807-P1 [7]

Celková délka	38 mm
Délka piezoelektrické vrstvy	28 mm
Celková šířka	13 mm
Šířka piezoelektrické vrstvy	7 mm
Tloušťka	0,3 mm
d_{33}	400 pC/N
Vlastní kapacita	0,7 nF
E	30,336 GPa

Tabulka 1 Parametry M2807-P1 [12]

4.2. Návrh mechanické konstrukce

Bylo zvolené uchycení s jedním koncem vetknutým. Bylo tak možné dosáhnout velké deformace. Navíc tak vznikla možnost připojit na volný konec servomotor, který bude materiál plech.



Obrázek 15 Návrh konstrukce

Obrázek 15 zobrazuje schématický návrh mechanické konstrukce testovací soustavy. Snímače byly umístěny na měkký ocelový plech. K volnému konci plechu byl připojen servomotor. Uchycení servomotoru a měřeného materiálu bylo pevně propojeno, aby nedocházelo ke vzájemnému posunu deformaci.

4.3. Volba komponent

Servomotor sloužící k deformaci plíšku byl ovládán pomocí vývojového kitu Arduino Nano. K napájení zvolených zapojení, servomotoru a Arduina byl použit spínaný zdroj MEAN WELL RQ-50 C, parametry zdroje byly převzaty z [10].

Zdroj má na výstupech napětí -15 V, 15 V, -5 V a 5 V. Výstupy 15, -15 byly použity na napájení elektroniky pro zpracování signálu ze snímačů. Pomocí výstupu 5 V se napájí servomotor a Arduino.

4.3.1. Servomotor

Jedná se o motor, u kterého je možné přesně nastavit polohu hřídele. Konkrétně byl použit servomotor SG90 9G. Jeho základem je stejnosměrný motor doplněný o regulační obvod a převody. Výstupní hřídel je možné natáčet v rozmezí $\langle 0^\circ; 180^\circ \rangle$. Motor se připojuje pomocí 3 vodičů (GND, Napájení, Signál). Regulační obvod je řízen střídou PWM signálu přiváděného na signální vodič. Nosná frekvence signálu je cca 50 Hz. Pro natočení motoru do polohy 0° je střída 0, naopak pro otočení do polohy 180° je střída 1. [11]

Napájecí napětí U	3 – 7,2 VDC
Rychlost	0,12 s/60°
Točivý moment (U = 4,8 V)	1,2 kg · cm
Točivý moment (U = 6 V)	1,6 kg · cm

Tabulka 2 Parametry servomotoru SG90 9G [11]



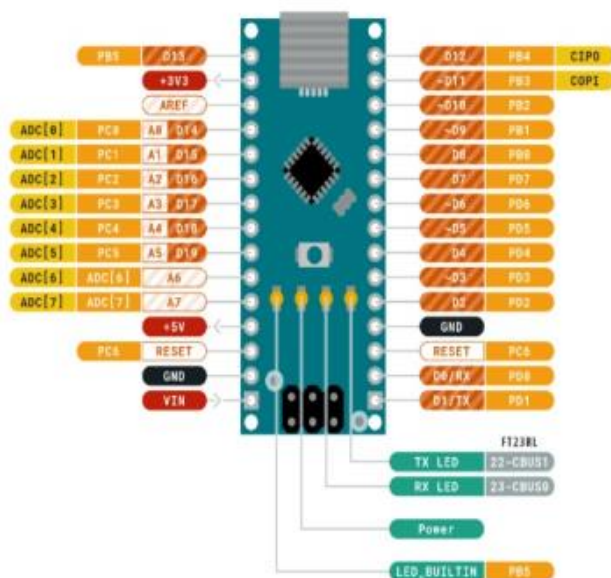
Obrázek 16 Servomotor SG90 9G [11]

4.3.1. Arduino Nano V3

Je minimalistická vývojová deska osazena 8bitovým mikrokontrolerem AVR ATmega328 s frekvencí 16 MHz. Deska obsahuje 14 digitálních pinů a 8 analogových, z toho 6 pinů umožňuje PWM. Rozměry desky jsou 18 × 45 mm s váhou 7 g.

Pracovní napětí procesoru je 1,8-5,5V. K napájení lze použít 5V pin na desce nebo pin VIN, kde napětí musí být v rozmezí 6-20 V, doporučené rozmezí od výrobce je 7-12 V. Při napětí 5 V je proud odebíraný procesorem 19 mA.

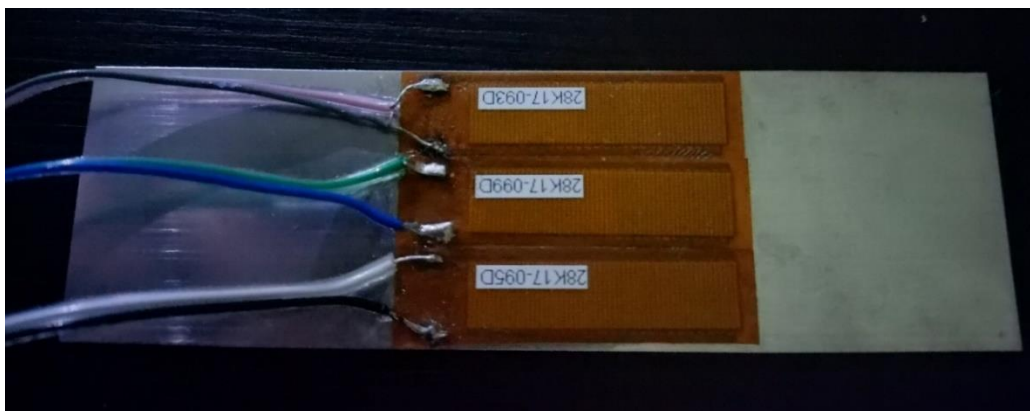
Procesor lze programovat přes USB konektor na desce, který je připojen k převodníku USB na UART FT232R nebo pomocí šestice pinů vyvedených na vrchní straně desky. Ty jsou přímo připojené na piny procesoru. [13]



Obrázek 17 Arduino Nano [13]

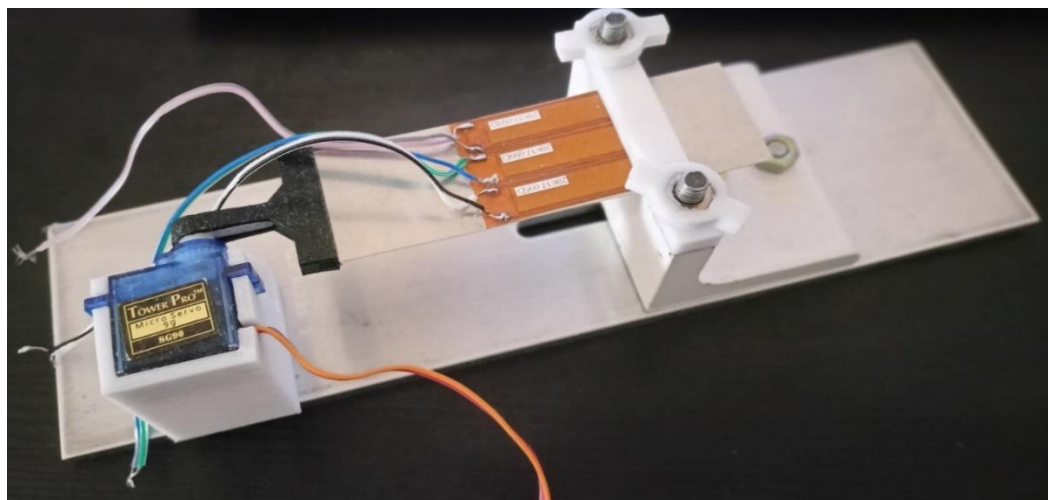
4.1.Sestavení soustavy

Snímače byly umístěny na měkký plíšek, aby při zvoleném uchycení a způsobu zatěžování, byla deformace všech snímačů shodná. Spojení bylo provedeno pomocí lepidla. Snímače byly přilepeny vedle sebe na stejnou stranu.



Obrázek 18 Testovací plíšek se snímači

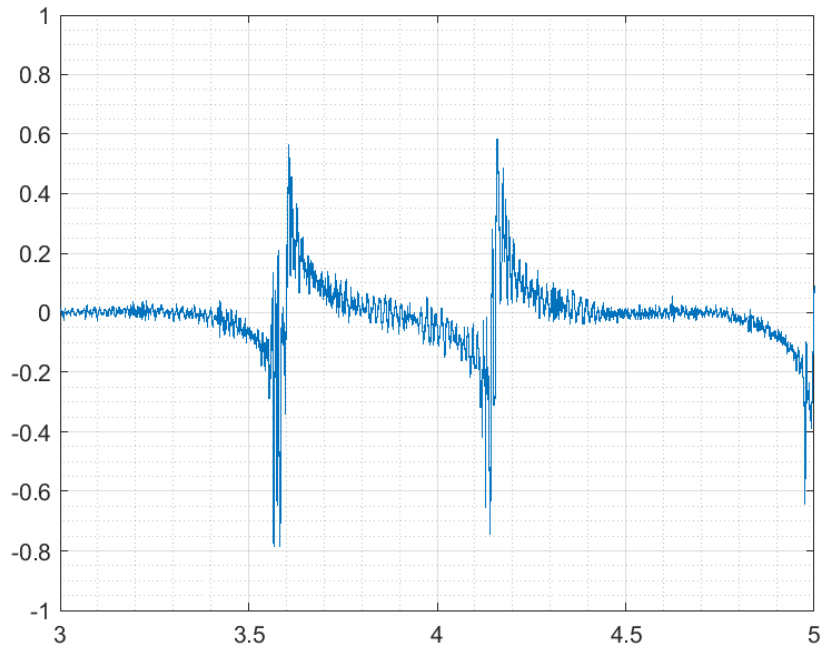
Uchycení testovacího vzorku bylo zhotoveno z ocelového L profilu, který tvoří spodní část a plastové vrchní části. Části k sobě byly staženy pomocí šroubů a matic. Servomotor byl umístěn do plastového uchycení. Základna, na které je sestava umístěna obsahuje drážky, ve kterých se může jak uchycení plíšku, tak uchycení motoru pohybovat. Řešení bylo navrženo, aby bylo možné vložit plíšek různé délky a následně připojovat a odpojovat servomotor bez nutnosti manipulace s plíškem.



Obrázek 19 Testovací stanice

4.2. Program servomotoru

Ovládání servomotoru pomocí programovatelného kitu dává možnost pohybem servomotoru nasimulovat různé časově průběhy zatěžování. Lze tedy vytvořit zatěžování snímače například pohyby simulující reálný průběh zatížení kolejí při průjezdu vlaku. Takový průběh zobrazuje Obrázek 20.



Obrázek 20 Průběh deformační síly působící na kolej při průjezdu vlaku

Program k pohybu servomotoru byl vytvořen v programovacím prostředí Arduino IDE při zahrnutí knihovny Servo.h. Pro komunikaci mezi počítačem a Arduinem pomocí USB bylo nutné nainstalovat drivery pro UART převodník.

```
void loop()
{
  myservo.write(90); // Natočení motoru do výchozí polohy
  delay(60);        // Čekání než se motor natočí
  myservo.write(85); // Malý impulz směrem do nahoru
  delay(20);        // Čekání než se motor natočí
  myservo.write(120); // Vychýlení motoru do spodní polohy
  delay(70);        // Čekání než se motor natočí
  myservo.write(60); // Vychýlení motoru do horní polohy
  delay(120);       // Čekání než se motor natočí
  myservo.write(90); // Vracení motoru do výchozí pozice
  delay(250);       // Čekání než se motor natočí
  myservo.write(120); // Vychýlení motoru do spodní polohy
  delay(250);       // Čekání než se motor natočí
  myservo.write(60); // Vychýlení motoru do horní polohy
  delay(120);       // Čekání než se motor natočí
  myservo.write(90); // Natočení do výchozí polohy
  delay(2000);      // Oddělení jednotlivých cyklů
}
```

Obrázek 21 Program pro natočení motoru

Obrázek 21 zobrazuje část programu pro natáčení servomotoru. Program se snaží napodobit průběh viz Obrázek 20. Výchozí poloha motoru je nastavena na 90° . Maximální hodnota, o kterou se servomotor může natočit je 30° na obě strany. Pro PWM signál ovládající motor byl zvolen pin 3. Motor se pohybuje v rozmezí $(60^\circ; 120^\circ)$. Jak je zmíněno v Tabulka 2, maximální rychlost motoru je $60^\circ/0,12$ s. Této hodnotě odpovídá minimální doba čekání mezi polohami.

5. Návrh vybraných zapojení

K realizaci byla zvolena 3 zapojení, a to nábojový zesilovač, převodník proudu na napětí a snímání napětí na paralelním odporu, kdy každý obvod byl připojen k samostatnému snímači. Pro určení hodnot součástek bylo rozhodnuto o použití empirické metody. Byla tedy nejprve vyrobena prototypová deska. Prvotní hodnoty součástek pro všechna zapojení byly zvoleny odhadem (Tabulka 3).

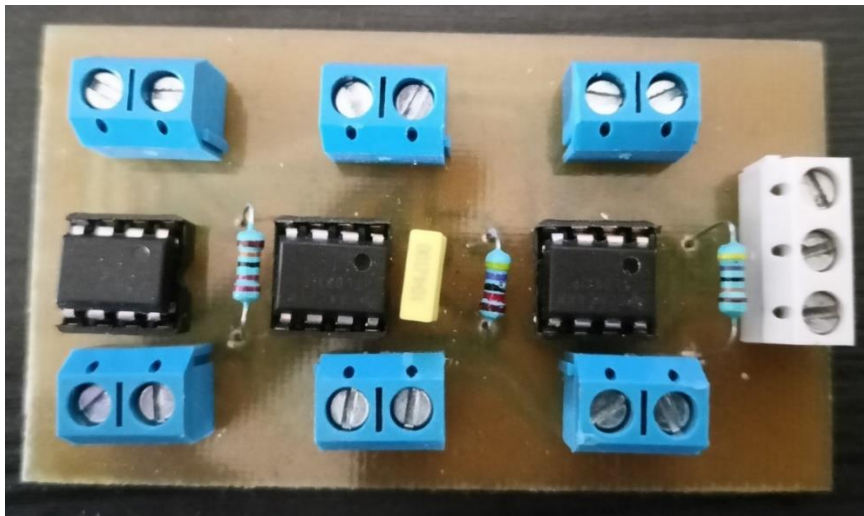
Zapojení nábojového zesilovače bylo doplněno o vybíjecí odpor R_v , paralelně připojeného ke zpětnovazebnímu kondenzátoru. Ten zabezpečil, aby na výstupu v důsledku zbytkového náboje nezůstávalo napětí. Odpor rezistoru musí být dostatečně velký, aby nedošlo k ovlivnění výstupního signálu. Časová konstanta takto vzniklého RC článku byla zvolena blízka 5 s.

Nábojový zesilovač	
R_v	10 M Ω
C_f	520 nF
Převodník proudu na napětí	
R_f	100 k Ω
Snímání napětí na paralelním odporu	
R_p	280 k Ω

Tabulka 3 Zvolené hodnoty součástek

Tabulka 3 zobrazuje zvolené hodnoty součástek pro výrobu prototypu. Označení součástek je v souladu se schématy viz Obrázek 7, Obrázek 10 a Obrázek 12.

5.1. Výroba prototypu

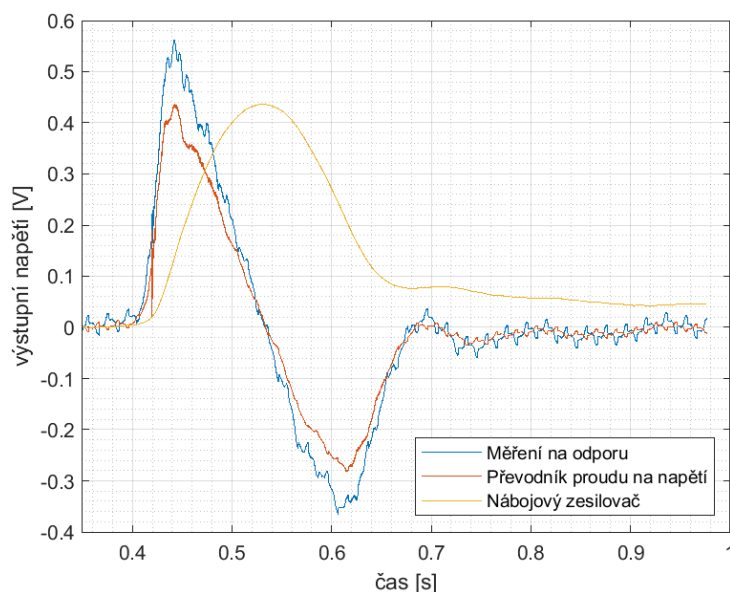


Obrázek 22 Prototyp zapojení

K určení hodnot součástek byla použita jednostranná deska plošného spoje. Osazena byla součástkami typu THT, operační zesilovače pak byly umístěny do patič. Kondenzátor byl použit keramický a rezistory metalizované. Pro připojení napájení snímačů i výstupních vodičů byly použity šroubovací svorkovnice. Operační zesilovače byly použity TL081 s napájením (-5 V; +5 V).

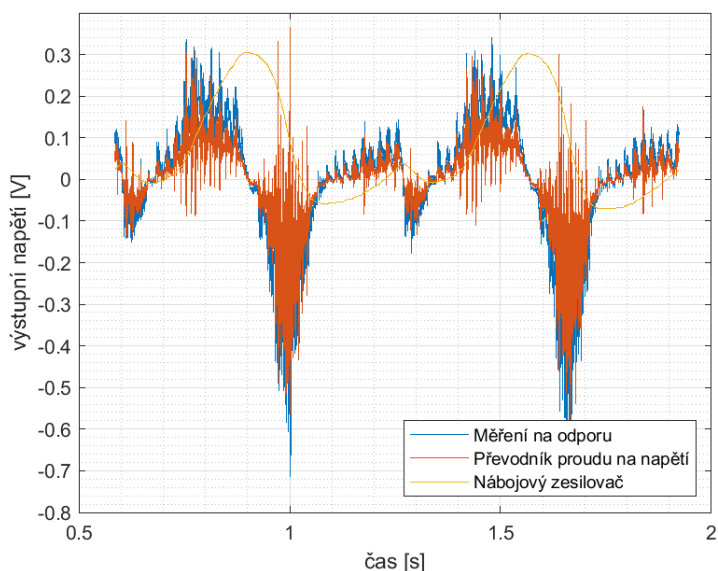
5.2. Měření

Zapojení byla otestována při krátkém zmáčknutí a při pohybování plíškem servomotorem. Průběhy byly zaznamenány na kartě NI-9234.



Obrázek 23 Měření při krátkém zmáčknutí

Obrázek 23 zobrazuje průběhy výstupních napětí vzniklých na obvodech při krátkém zmáčknutí volného konce plíšku. Časová konstanta nábojového zesilovače se ukázala být dostatečná. U průběhů převodníku proudu na napětí a snímání napětí na odporu lze vidět shodný průběh. Avšak u průběhu měření napětí na odporu je vidět rušení.



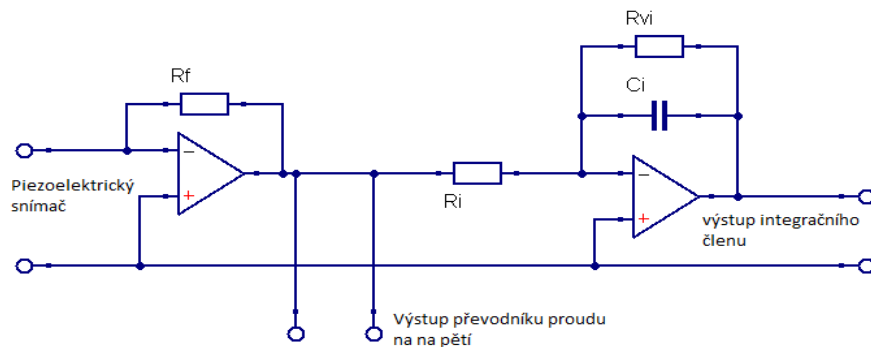
Obrázek 24 Měření se servomotorem

Při měření, kdy byl k deformaci použit servomotor (Obrázek 24), se na výstupním signálu z převodníku proudu na napětí a u snímání napětí na paralelním odporu projevil jednotlivé zuby v převodech servomotoru. Z toho důvodu bylo potřeba vložit mezi servomotor a plíšek gumovou spojkou, aby byl vliv zubů redukován.

5.3. Úprava návrhu obvodů

Po vyhodnocení naměřených průběhů viz Obrázek 23 a Obrázek 24 byly hodnoty součástek upraveny podle rovnic (8), (11) a (12), aby se hodnota napětí na výstupech obvodů teoreticky blížila hodnotě 3 V viz Tabulka 4. Napětí o takové hodnotě lze přímo připojit na A/D převodník libovolného běžně používaného mikrokontroleru.

V důsledku změny zpětnovazebního kondenzátoru nábojového zesilovače musel být pro zachování časové konstanty RC článku změněn i vybíjecí odpor.



Obrázek 25 Upravené zapojení převodníku proudu na napětí

Převodník proudu na napětí byl doplněn o integrační člen s operačním zesilovačem viz Obrázek 25. Odpor R_i nepřímě ovlivňuje velikost integrovaného proudu na kondenzátoru. Jeho hodnota byla zvolena jako stejná u rezistoru R_f . Ve zpětné vazbě byl použit stejný RC článek jako u nábojového zesilovače. Vzniklá soustava obvodů umožnila po zpracování výsledků z obou obvodů vyhodnotit, jak rychlost, tak míru deformace i za použití jednoho snímače. Výstupní signál z integračního členu je invertovaný oproti signálu z převodníku proudu na napětí.

Obvod pro sledování napětí na odporu byl upraven pouze změnou paralelního odporu.

Nábojový zesilovač	
R_v	50 M Ω
C_f	100 nF
Převodník proudu na napětí	
R_f	220 k Ω
R_i	220 k Ω
C_i	100 nF
R_{vi}	50 M Ω
Snímání napětí na paralelním odporu	
R_p	470 k Ω

Tabulka 4 Výsledné hodnoty použitých součástek

6. Výroba zapojení

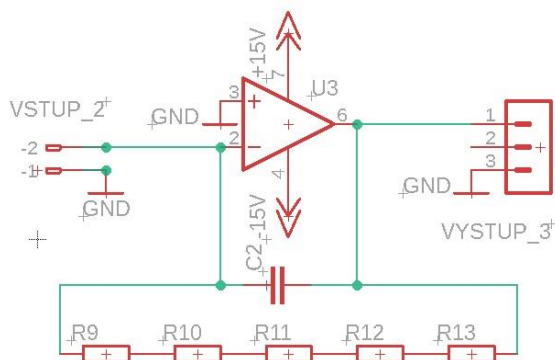
Všechna zapojení byla umístěna na společnou desku plošného spoje. Zároveň byla propojena nulovým potenciálem, na který se připojuje záporná elektroda použitých snímačů. Veškeré použité součástky na výrobu obvodů byly použity SMD, tedy bez vývodové součástky. Bylo tak rozhodnuto z důvodu omezení rušení.

Pro všechna zapojení byl použit operační zesilovač OPA137 v samostatném pouzdře s napájením ze zdroje MEAN WELL RQ-50 C.

K připojování snímačů byly použity VAGO svorky. Výstupní signál pak byl vyveden na kolíkovou lištu. Ta umožnila na výstup připojit, jak sondu osciloskopu, tak konektor k propojení s mikrokontrolerem. K připojení napájení slouží šroubovací svorkovnice.

Na desce plošného spoje se také nachází Arduino k ovládání servomotoru, ke kterému je umístěn vypínač.

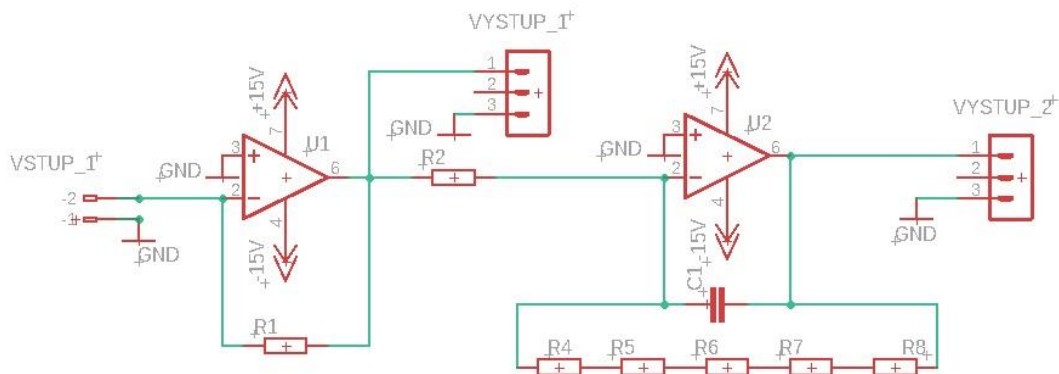
6.1. Nábojový zesilovač



Obrázek 26 Schéma reálného zapojení nábojového zesilovače

Jak je patrné z, aby bylo možné dosáhnout ve zpětné vazbě potřebného odporu, muselo být do série spojeno pět rezistorů 10MΩ (Obrázek 26). Rezistory s vyšším odporem jsou finančně výrazně náročnější.

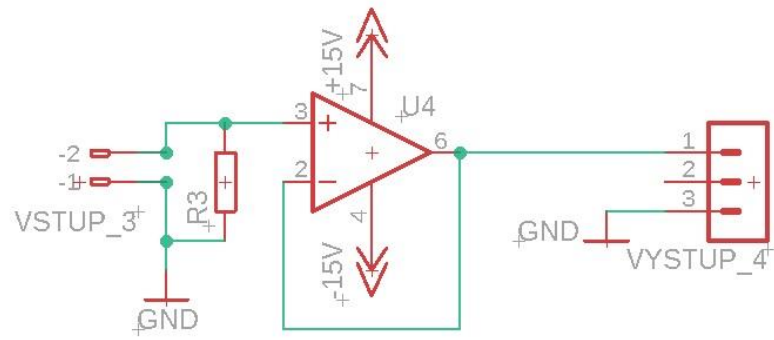
6.2. Převodník proudu na napětí



Obrázek 27 Schéma převodníku proudu na napětí doplněného o nábojový zesilovač

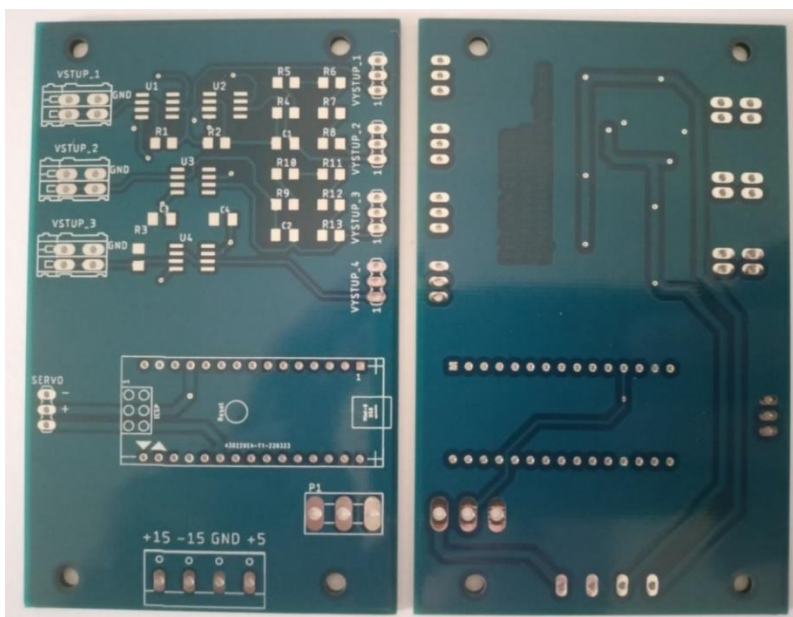
Odpory $R1$ a $R2$ byly umístěny co nejbližší k operačním zesilovačům. Výstup z převodníku proudu na napětí byl vyveden přímo za operačním zesilovačem.

6.3.Sledování napětí na odporu

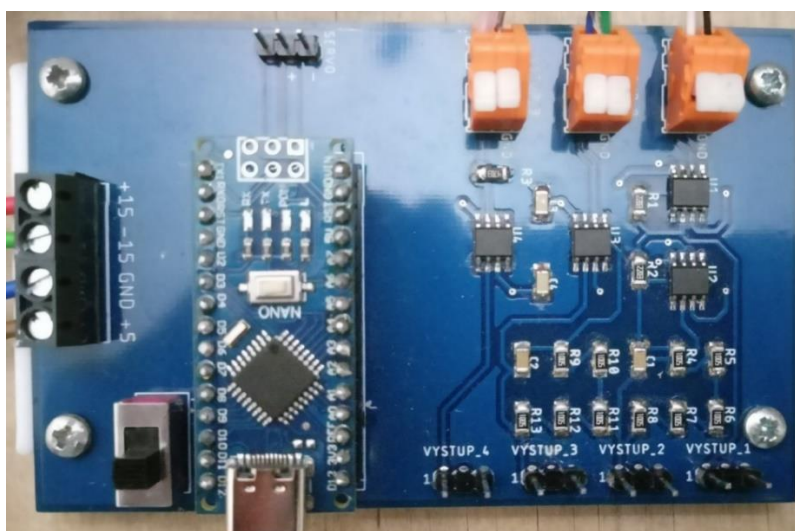


Obrázek 28 Schéma zapojení pro snímání napětí na odporu

6.4. Osazení desky plošného spoje a kompletace soustavy

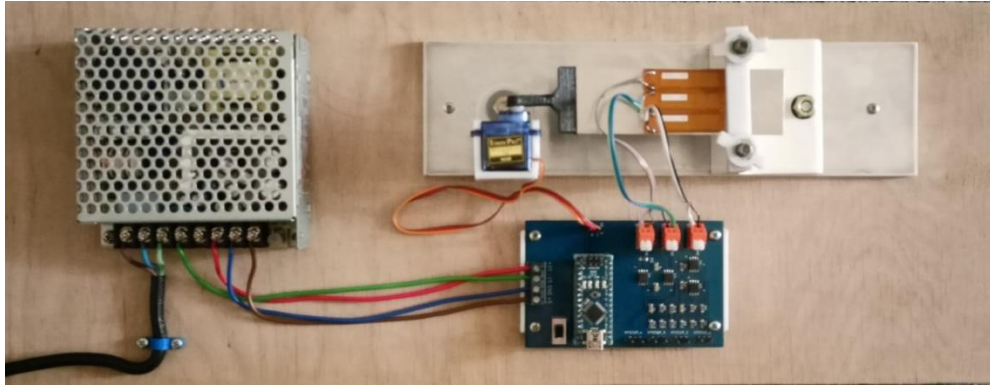


Obrázek 29 Vyrobená deska plošného spoje



Obrázek 30 Osazená deska plošného spoje

Deska byla osazena vybranými součástkami. Arduino nebylo do desky zaletováno. Bylo připojeno pomocí dutinkové lišty. Jeho vypínač je v poloze ZAPNUTO, když je posunut směrem k okraji desky. Výstupní kolíky mají společný zemnicí kontakt vždy vpravo. Kolíky označené jako 1 jsou výstupy dle schémat dříve zmíněných v této kapitole.



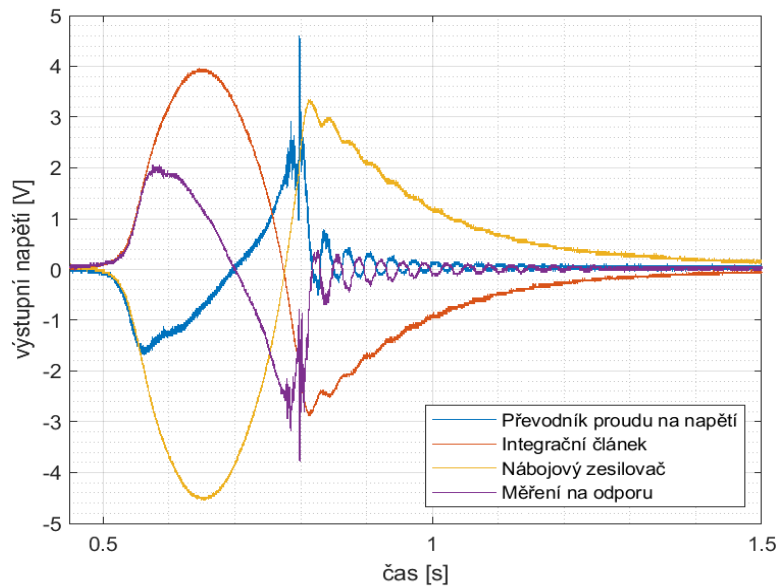
Obrázek 31 Kompletní soustava pro měření realizovaných zapojení

Po osazení DPS byly všechny komponenty soustavy umístěny na společnou základnu. Vznikl tak výukový model pro porovnání tří různých způsobů zpracování signálu z piezoelektrických snímačů s analogovým výstupem.

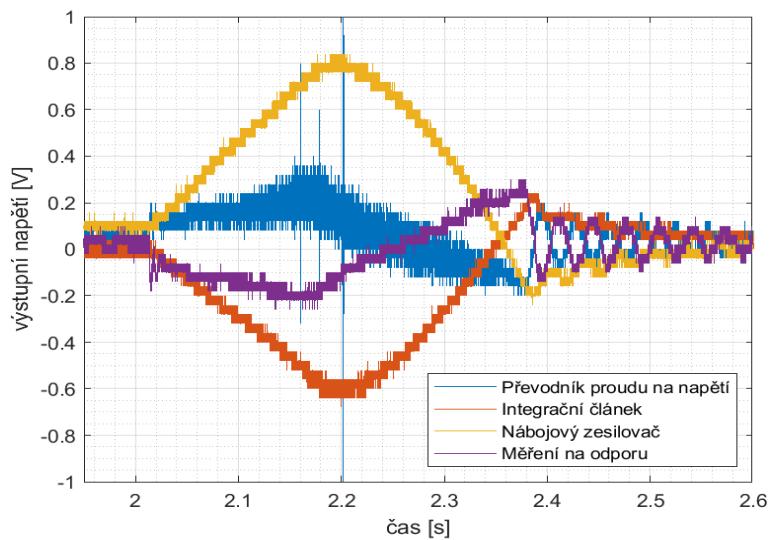
7. Měření a porovnání zapojení

7.1. Naměřené průběhy

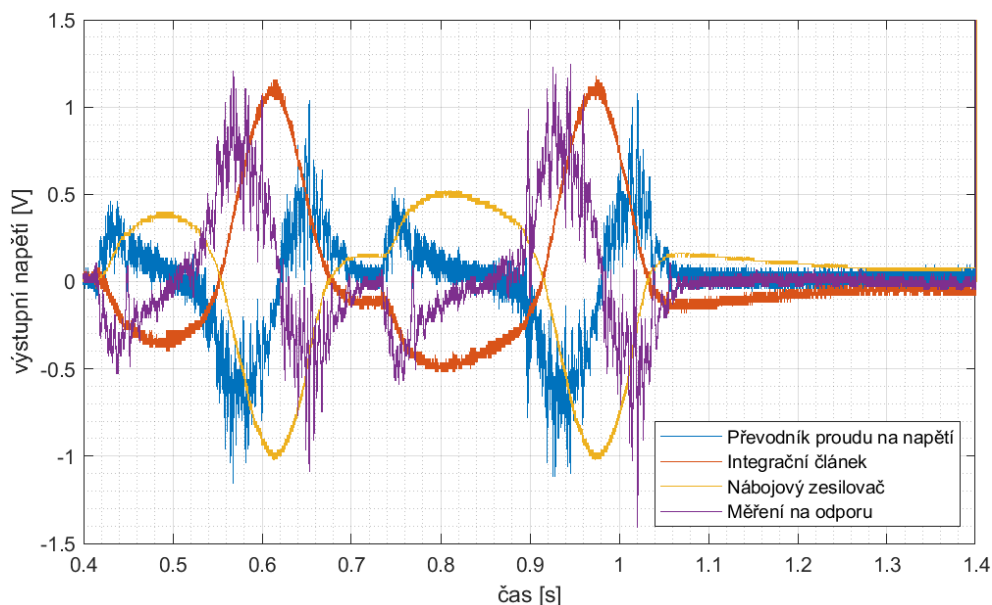
Měření bylo provedeno osciloskopem SIGLENT SDS 1104X-E.



Obrázek 32 Pohyb volného konce vzhůru



Obrázek 33 Pohyb volného konce dolů



Obrázek 34 Měření se servomotorem

7.2. Porovnání naměřených průběhů

Mezi sebou lze porovnat zapojení, u kterých výstupní napětí značí stejnou vlastnost deformace. Výstup ze snímače napětí na paralelním odporu je možné porovnat s převodníkem proudu na napětí a nábojový zesilovač s integračním článkem.

Při provedených měřeních byla rychlost deformace řádově nižší, než je mezní frekvence paralelního spojení snímače a odporu. Přenos zůstává v lineární části frekvenční charakteristiky. Chová se tak stejně jako převodník proudu na napětí. U naměřených průběhů je patrné, že obě zapojení vyjadřující rychlost deformace mají shodnou amplitudu, u pohybu plíškem servomotorem je to 1 V. Shodná byla i rychlost změny výstupního napětí. Rozdíl mezi průběhy pak lze pozorovat ve velikosti šumu, který byl u paralelního spojení odporu a snímače potlačen takto vzniklým RC článkem.

Průběh integračního článku a nábojového zesilovače se liší v absolutní hodnotě výchylky. Na výstupu integračního článku je napětí přibližně o 10 % nižší než u nábojového zesilovače. Tato skutečnost může být způsobena rozdílnou pozicí snímačů na měřeném plíšku, tolerancí součástek, popřípadě nedokonalým spojením snímače a materiálu.

Z naměřených průběhů (viz Obrázek 32 a Obrázek 33) je patrná rozdílná velikost vygenerovaného náboje při různém směru deformace u zvoleného umístění snímače. Při vychýlení volného konce vzhůru je velikost vygenerovaného náboje podstatně větší než při stejném vychýlení směrem dolů.

U průběhů vzniklých při deformaci plíšku servomotorem byla velikost výchylky nahoru i dolů stejná viz Obrázek 21. Velikost vygenerovaného náboje, kterému odpovídá výstupní napětí integračního článku a nábojového zesilovače, pak byla při pohybu dolů poloviční.

Použitá gumová spojka mezi plíškem a servomotorem pak značně potlačila vliv převodů na výstup obvodů popisující rychlost deformace, než je tomu u měření na prototypu které zobrazuje Obrázek 24.

8. Závěr

V práci byla nejprve popsána podstata piezoelektrického jevu. Následně byly zmíněny piezoelektrické konstanty popisující vlastnosti takových materiálů. V návaznosti na to byly popsány snímače MFC a jejich rozdělení.

V druhé části byly popsány základní zapojení analogových obvodů pro zpracování signálu z piezoelektrických snímačů. Zvlášť byly popsány obvody jejichž výstupní napětí reprezentuje míru deformace a rychlost deformace. Dále byly popsány jejich vlastnosti a frekvenční charakteristiky.

Pro opakovatelnost provedených měření byla vytvořena testovací soustava. Ta se skládá z upevnění testovacího vzorku, servomotoru, napájecího zdroje a mikrokontroleru ovládající servomotor.

Z popsaných obvodů byly zvoleny pro realizaci tři z nich. Konkrétně pak převodník proudu na napětí, nábojový zesilovač a měření napětí na paralelním odporu. K určení hodnot součástek zvolených obvodů byla použita empirická metoda.

Prvním krokem bylo vytvoření prototypu, kde byly hodnoty součástek zvoleny odhadem. Po analýze výstupních signálů ze zvolených obvodů byly upraveny hodnoty jejich součástek a za obvod převodníku proudu na napětí byl zařazen integrační člen.

Následně byla pro upravená zapojení zhotovena a osazena deska plošného spoje. Na tutéž desku bylo umístěno ovládání servomotoru. Na vytvořených obvodech byla provedena měření. Zvlášť byly zaznamenány průběhy při vychýlení testovacího materiálu směrem vzhůru, dolů a při deformaci pomocí servomotoru. Servomotorem byl simulován průběh zatížení při průjezdu vlaku po kolejkách.

Při měření bylo zjištěno, že signál z nábojového sledovače je shodný se signálem z integrátoru umístěným za převodníkem proudu na napětí. Signál ze snímání napětí na paralelním odporu je pak odolnější proti rušení při pomalých dějích. Pro měření pomalých dějů je tedy vhodné jej využít.

Současné snímání rychlosti i velikosti deformace lze provést použitím dvou snímačů, přičemž jeden bude připojen na převodník proudu na napětí a druhý na nábojový sledovač. Srovnatelnou variantou se pak ukázalo být použití převodníku proudu na napětí doplněného o integrační členek s operačním zesilovačem. Toto řešení je zároveň ekonomicky výhodnější.

Výsledkem práce bylo vytvoření výukového modelu pro porovnání 3 zvolených zapojení a měření snímačů s možností deformování snímače servomotorem. Servomotorem lze simulovat libovolný průběh, který je fyzicky možné jím realizovat.

Další možným pokračováním by bylo připojení výstupů k měřicímu obvodu a digitální zpracování signálu pomocí softwaru.

9. Seznam obrázků

Obrázek 1 Piezoelektrický jev	13
Obrázek 2 Směrové indexy	14
Obrázek 3 MFC materiál [6]	16
Obrázek 4 Snímač P1 [6]	16
Obrázek 5 MFC typ P2/P3 [6]	17
Obrázek 6 Náhradní model s proudovým zdrojem	17
Obrázek 7 Zapojení s nábojovým zesilovačem	18
Obrázek 8 Frekvenční charakteristiky nábojového zesilovače	19
Obrázek 9 Paralelně připojená kapacita s napěťovým sledovačem	20
Obrázek 10 Spojení snímače a převodníku proudu na napětí	21
Obrázek 11 Frekvenční charakteristiky převodníku proudu na napětí	21
Obrázek 12 Paralelně připojená odpor s napěťovým sledovačem	22
Obrázek 13 Frekvenční charakteristiky výstupního napětí při měření na paralelním odporu.....	22
Obrázek 14 Piezoelektrický prvek M2807-P1 [7]	23
Obrázek 15 Návrh konstrukce	24
Obrázek 16 Servnomotor SG90 9G [11]	25
Obrázek 17 Arduino Nano [13].....	26
Obrázek 18 Testovací plíšek se snímači	27
Obrázek 19 Testovací stanice	27
Obrázek 20 Průběh deformační síly působící na koleje při průjezdu vlaku	28
Obrázek 21 Program pro natočení motoru	28
Obrázek 22 Prototyp zapojení.....	31
Obrázek 23 Měření při krátkém zmáčknutí	32
Obrázek 24 Měření se servomotorem.....	32
Obrázek 25 Upravené zapojení převodníku proudu na napětí	33
Obrázek 26 Schéma reálného zapojení nábojového zesilovače	34
Obrázek 27 Schéma převodníku proudu na napětí doplněného o nábojový zesilovač	34
Obrázek 28 Schéma zapojení pro snímání napětí na odporu	35
Obrázek 29 Vyrobená deska plošného spoje	36
Obrázek 30 Osazená deska plošného spoje	36
Obrázek 31 Kompletní soustava pro měření realizovaných zapojení.....	37
Obrázek 32 Pohyb volného konce vzhůru	38
Obrázek 33 Pohyb volného konce dolů	38
Obrázek 34 Měření se servomotorem.....	39

10. Seznam použité literatury

- [1] *Piezelektrické snímače síly*. E-automatizace. Retrieved May 18, 2022, from http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm#piezo
- [2] Carter, R., & Kensley, R. *Introduction to Piezoelectric transducers*. PIEZO. Retrieved May 18, 2022, from <https://blog.piezo.com/hubfs/Manuals/Introduction-to-Piezoelectric-Transducers-Carter-Kensley.pdf>
- [3] D'AURÉLIEN. The Piezoelectric Effect: Piezoelectric Effect Basics [online]. 1999, 3 s. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf>
- [4] ACP INTERNATIONAL, LTD. PIEZOELECTRIC CONSTANTS. *Americanpiezo* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>
- [5] KARKI, James. TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. Signal conditioning piezoelectric sensors. Dallas, Texas, USA, 2000. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/sloa033a/sloa033a.pdf>
- [6] SMART MATERIAL CORP. - Home of the MFC. *Smart-material* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com/MFC-product-mainV2.html>
- [7] SMART MATERIAL CORP. *M2807-P1*. Smart-material. Retrieved May 4, 2022, from https://www.smart-material.com/media/Images/2807%20P1_bem.jpg
- [8] PCB PIEZOTRONICS, Inc. General signal conditioning guide: An introduction to the operation of ICP and charge output sensors and instrumentation. Depew, NY USA, 2009. Dostupné z: http://www.pcb.com/techsupport/docs/pcb/PCB-G0001G-1209_Lowres.pdf
- [9] SERRIDGE, Mark a Torben R. LICHT. BRÜEL & KJÆR. Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers: Theory and application handbook. Nærum, Dánsko, 1987. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bb0694.pdf>
- [10] *RQ-50-SPEC*. Mean Well. Retrieved May 18, 2022, from <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/Rq-50/RQ-50-spec.pdf>
- [11] ECLIPSE S.R.O. Towerpro SG90 9G servo motor. *Gme* [online]. 2016 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-211.1.pdf>
- [12] SMART MATERIAL CORP. *Smart Material*. Smart-material. Retrieved May 4, 2022, from <https://www.smart-material.com>
- [13] Arduino. *Arduino Nano*. Arduino. Retrieved May 4, 2022, from <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>