



# 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

## 2D SENZOR POLOHY PRO PLANÁRNÍ POLOHOVACÍ PLATFORMY

2D POSITION SENSOR FOR PLANAR POSITIONING PLATFORMS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Brisuda

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matej Rajchl

BRNO 2021

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Dominik Brisuda</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Matej Rajchl</b>
Akademický rok:	2020/21

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:

## 2D senzor polohy pro planární polohovací platformy

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mnoho ukázkových mechatronických úloh vyžaduje precizní měření polohy objektu v rovině (např. Ball on plate systém), ale komerční senzory k tomu určené, jsou obvykle buď drahé nebo nepřesné nebo se nedají jednoduše propojit s řídicím hardwarem. Motivací této práce je udělat přehled možných senzorů a navrhnout vhodnou alternativu k dostupným komerčním produktům, což umožní další rozvoj výukových modelů v rámci mechatronické laboratoře.

### Cíle bakalářské práce:

1. Udělejte průzkum trhu snímačů pro snímání polohy v rovině se zaměřením na jejich vhodnost využití pro real-time řízení, cenu a kvalitu.
2. Na základě průzkumu vyberte nejvhodnější snímač vhodný pro typické úlohy řízení mechatronických systémů (např. ball on plate).
3. Navrhněte DPS, která bude zpracovávat signál ze senzoru a bude ho převádět na dva analogové signály reprezentující polohu v osách x a y.
4. Otestujte rozsah, rozlišení, kvalitu signálu a limity tohoto výsledného senzoru.

### Seznam doporučené literatury:

FRADEN, J.: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications 5th ed. 2016 Edition, Springer International Publishing, Switzerland 2016.

VALÁŠEK, M. a kol.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT Praha, 1995.

ZÁHLAVA, V.: Návrh a konstrukce plošných spojů, Vydavatelství BEN, 2011.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **Abstrakt**

Táto bakalárska práca sa zaoberá spracovaním prehľadu dostupných 2D senzorov polohy, ktoré sú vhodné pre mechatronické sústavy, ako je napríklad „Ball on plate system“. Pri takýchto systémoch je potrebné, aby regulátory systému prijímali čo najpresnejšie súradnice polohy telesa za dostatočujúco rýchly čas. Taktiež zohráva veľkú úlohu, aký tvar, veľkosť a hmotnosť má regulovaný predmet pohybujúci sa po senzore a z akého je materiálu. Z tohto tvrdenia vyplýva, že rôzne druhy senzorov budú reagovať na daný predmet odlišne. V prvej časti tejto práce sa preto urobil prehľad jednotlivých typov 2D senzorov a následne sa posúdila ich vhodnosť pre dané systémy. Druhou časťou bakalárskej práce je návrh jednotky pre spracovávanie signálu, ktorá bude zaznamenávať signál zo senzoru a privádzať ho na dve výstupné svorky, ktorých výstupné hodnoty napätia budú reprezentovať polohu predmetu na senzore. Takýmto spracovaním sa docieli, že s polohou sa bude dať jednoducho pracovať, napríklad ju priviesť priamo do regulátoru. V poslednej časti sa zrealizovalo testovanie sústavy, kde sa merala rýchlosť snímacej jednotky a kvalita testovaného senzoru. Pri kvalite senzoru sa merala lineárnosť, minimálna aktivačná sila a šum výstupného signálu v rôznych miestach pri odlišných zaťažovacích hmotnostiach.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with processing of the overview of 2D position sensors available and suitable for mechatronic systems such as “Ball on plate system”. With these systems it is inevitable for the system regulators to receive the most precise coordinates of the body position in sufficiently fast time. Another important thing is the shape, size, weight, and material of the regularized subject moving on the sensor. This statement follows, that different types of sensors will have different reactions for the given subject. Therefore, there is an overview of types of 2D sensors in the first part of the thesis. Afterwards, their suitability for given systems was considered. In the second part of the thesis there is a project of a unit for signal processing. This unit will record the signal from the sensor and drive it onto 2 outputs, which output voltage values will represent the placement of object on the sensor. By this processing, the position will be easily worked with, for example to bring it straight to the regulator. In the last part of the thesis the system was tested. The speed of scanning unit was measured, as well as the quality of the tested sensor. With the sensor quality linearity, minimal activating force and noise of the output signal on different places with different ballast weight were measured.

## **Kľúčové slová**

Dotyková obrazovka, Senzor, Technológia dotykovej obrazovky, SPI komunikácia, snímacia elektronika, DPS, PicoScope, Lineárnosť senzoru, Šum senzoru, Mechatronika

## **Keywords**

Touchscreen, Sensor, Touchscreen technology, SPI communication, sensing electronics, PCB, PicoScope, Sensor linearity, Sensor noise, Mechatronics

## **Bibliografická citácia**

BRISUDA, Dominik. *2D senzor polohy pro planární polohovací platformy* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131786>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Matej Rajchl.

## **Čestné prehlásenie**

Ja, Dominik Brisuda, čestne prehlasujem, že som bakalársku prácu na téma „2D senzor polohy pro planární polohovací platformy“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v tejto práci.

V Brne, 21.2.2021

.....

Dominik Brisuda

## **Pod'akovanie**

Týmto by som chcel poďakovať Ing. Matejovi Rajchlovi za trpezlivosť, ochotou a nápomocné poznámky k tejto bakalárskej práci. Ďalej by som chcel poďakovať mojej rodine, spolužiakom, tímu Mechlabu VUT FSI a všetkým, ktorý mi pomáhali a sprevádzali ma v mojom štúdiu.

Dominik Brisuda

## Obsah

1	Úvod .....	9
2	Teoretický rozbor práce .....	10
2.1	2D Senzor polohy.....	10
2.1.1	Rezistívny senzor .....	10
2.1.2	Kapacitné senzory .....	11
2.1.3	SAW senzory .....	12
2.1.4	Infračervené senzory .....	13
2.1.5	Výber senzoru .....	13
2.2	SPI rozhranie.....	15
2.3	Výber komponentov a ich komunikácia.....	16
2.3.1	Výber Touch Screen kontrolérom a jeho komunikácia.....	17
2.3.2	Výber Digitál-Analog prevodníku a jeho komunikácia .....	18
2.3.3	Výber procesoru a jeho komunikácia.....	20
3	Popis praktickej časti práce .....	21
3.1	Návrh ovládacej jednotky .....	21
3.1.1	Schéma zapojenia a zoznam použitých komponentov .....	23
3.2	Testovanie sústavy .....	24
3.2.1	Nastavenie zariadenia PicoScope.....	26
3.2.2	Lineárnosť senzoru.....	27
3.2.3	Šum v nezaťaženom stave.....	28
3.2.4	Šum pri minimálnej aktivačnej sile.....	28
3.2.5	Šum pre jednotlivé zaťažovacie polohy závislé od hmotnosti závažia .....	29
1.	Šum pre polohu 1 .....	29
2.	Šum pre polohu 2 .....	30
3.	Šum pre polohu 3 .....	32
4.	Šum pre polohu 4 .....	33
5.	Šum pre polohu 5.....	35
4	Záver .....	37
5	Referencie .....	39
6	Zoznam Obrázkov.....	41
7	Zoznam Grafov .....	41
8	Zoznam elektronických príloh.....	42
Príloha 1	Obrázok schémy zapojenia ovládacej jednotky	
Príloha 2	Obrázok kódu z programu MATLAB R2019b	
Príloha 3	Obrázok časti kódu z programu MPLAB X IDE v5.3	

# 1 Úvod

Technické vedy sa začali naplno rozvíjať koncom 18. a začiatkom 19. storočia, kedy sa začalo pomaly prechádzať z manuálnej na strojovú – automatizovanú činnosť, respektíve výrobu. Takáto zmena umožnila vyššiu rýchlosť, ale aj presnosť rôznych zariadení a strojov, a taktiež nám priniesla do života bezpečnosť a pohodlnosť. V súčasnosti môžeme vidieť výdobytky technických vied všade okolo nás, či už sa pozrieme na zdravotnícke zariadenia, ktoré nám zachraňujú životy, stavebné technológie a elektrotechniku, ktoré uľahčujú prácu, automobilový priemysel ale aj materiálové vedy, strojnictvo či environmentalistiku a mnoho ďalších odvetví, v ktorých sa technika nachádza. Všetky dostupné produkty dnešnej doby, ktoré slúžia ľuďom, museli prejsť dlhým výskumom a vývojom, kým dosiahli plnohodnotnej funkčnosti a podoby, v akej ich dnes poznáme.

Ak sa zameriame na sensoriku a automatizáciu, zistíme, že na trhu sa nachádza obrovské množstvo rozličných sensorov a tiež komponentov pre riadiace a ovládacie systavy. Nie všetky však sú dostatočne výkonné a kvalitné pre implementáciu a tiež nie je ku všetkým poskytnuté dostatočné množstvo informácií. Niektoré pomerne mladé systémy, ako napríklad „Ball on plate system“, od ktorého sa v tejto bakalárskej práci budeme v niektorých prípadoch odrážať, si dokonca vyžadujú unikátne riadiace a ovládacie jednotky, ktoré nie sú bežne dostupné na trhu. Pri práci a prípadnom rozvoji takýchto systémov je pre tento nedostatok nutná vlastná a zdĺhavá výroba riadiacich a ovládacích jednotiek, za ktorou až následne môže byť realizované testovanie sensorov, prípadný rozvoj alebo ďalšie použitie systému. Problémom dostupných ovládacích jednotiek 2D sensorov je, že sú navrhnuté pre prácu s displejom, alebo ako „Touchpad“, takže výsledný signál je posielaný cez USB rozhranie, čo sťažuje komunikáciu s riadiacimi jednotkami systémov.

Cieľom tejto bakalárskej práce je porovnať jednotlivé dostupné 2D senzory polohy podľa ich princípu fungovania a vytvoriť zoznam vhodných sensorov, od rôznych firiem a s rôznymi parametrami, ktoré by bolo možné využiť v mechatronických systémoch. Ďalším cieľom je vytvorenie univerzálnej ovládacej jednotky, pre akýkoľvek sensor vybraného druhu, ktorej výstupný signál bude možné jednoducho pripojiť ku ďalším hardwarom. Pomocou tejto jednotky bude možné pohodlne a rýchlo otestovať kvalitu neznámeho 2D senzora a umožní to ďalšiu prácu a rozvoj s výukovými modelmi.

## 2 Teoretický rozbor práce

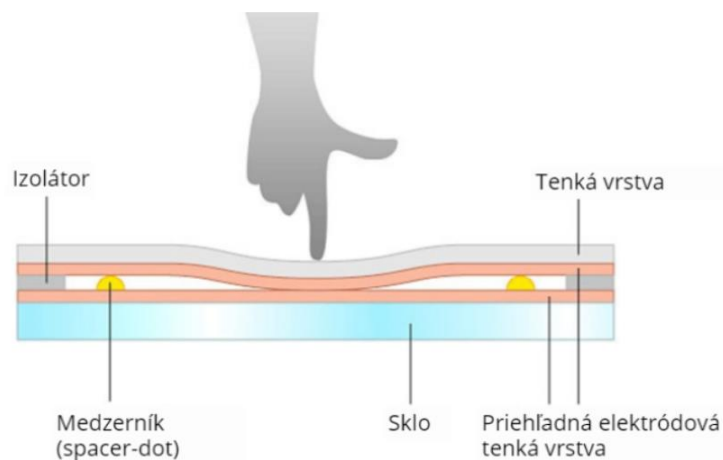
### 2.1 2D Senzor polohy

V dnešnej dobe majú 2D senzory polohy široké spektrum použitia. Využívajú sa napríklad: v automobiloch, domácich spotrebičoch, notebookoch, telefónoch, hodinkách a mnohých ďalších dotykových zariadeniach. Pri rôznych využitíach sa vyžaduje rôzna presnosť, kvalita a frekvencia prijímaného signálu. Napríklad: pri použití senzoru, ktorým sa ovláda LCD displej v automobile, netreba mať zbytočne veľkú frekvenciu prijímania dát, dokonca ani presnosť, naopak pri použití v „Real-time“ systémoch sa vyžaduje, aby mal senzor dostatočne vysokú frekvenciu odosielania dát a taktiež presnosť, aby daná sústava vedela včas a vhodne reagovať na zmeny.

Dá sa povedať, že senzory, ktoré sa dajú dnes kúpiť, môžeme zaradiť do piatich skupín podľa toho, na akom princípe fungujú, respektíve na aký charakter využitia je daný senzor potrebný.

#### 2.1.1 Rezistívny senzor

Rezistívne senzory patria medzi prvé, ktoré sa začali používať pre zisťovanie polohy v 2D priestore. Spodná časť displeja sa skladá z jednej hrubej vrstvy skla, na ktorom je potiahnutá tenká neviditeľná vrstva vodivého kovu. Vrchná časť tohto senzoru sa skladá z ohybnej membrány, na ktorej je tiež rovnaká vrstva kovu. Tieto dve vrstvy sú oddelené veľmi úzkou vrstvou vzduchu, v ktorej sú pravidelne rozmiestnené podpery, zabezpečujúce, aby sa tieto dve časti displeju samovoľne nedotýkali. Po krajoch sú umiestnené izolačné pásiky, ktoré zabezpečujú celkové oddelenie vrchnej a spodnej časti. Akonáhle vyvoláme dostatočný tlak, respektíve silu na to, aby sa nám spodná a vrchná vrstva kovu spojili, začne displejom tiecť prúd, vyvolaný vstupným napätím a odporom týchto vodivých vrstiev a medených spojov konektoru. Tieto senzory sa ďalej rozdeľujú na štvorvodičové a päťvodičové, čo predstavuje počet výstupných vodičov zo senzoru.



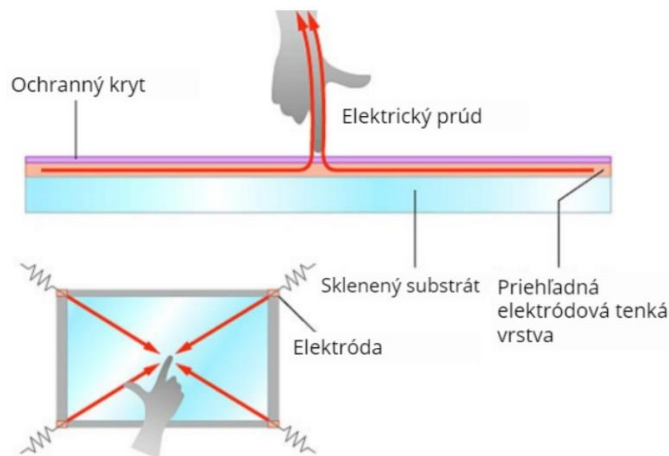
Obrázok 1 Princíp fungovania rezistívneho senzora [9]

## 2.1.2 Kapacitné senzory

Kapacitné senzory patria v dnešnej dobe medzi najpoužívanejšie senzory v oblasti prenosnej techniky, ako sú mobilné zariadenia alebo tablety. Pre zaznamenávanie polohy využívajú elektrický náboj. Zmenu elektrického náboja v senzore možno vyvolať iba telesom, ktoré je vodivé a má iný elektrický potenciál ako nabitý senzor. Pre vyhodnocovanie polohy sa využívajú integrované obvody, ktoré zaznamenávajú malé zmeny v elektrickom prúde, vyvolané kontaktom vhodného telesa, ako je napríklad ľudský prst.

### a) *Surface Capacitive*

Kapacitné senzory typu „surface capacitive“ sa skladajú zo spodnej vrstvy skla, na ktorom je nanosená tenká priehľadná vrstva elektródy, pokrytá ochrannou vrstvou vodivej fólie. Vo všetkých štyroch rohoch senzoru sú umiestnené elektródy pod nízkym napätím, cez ktoré sa generuje rovnomerné elektrické pole po celej aktívnej ploche senzoru. Pri kontakte vznikne napäťový úbytok, závislý od vzdialenosti predmetu a elektródy, ktorý sa vyhodnocuje a prevádza na polohu.

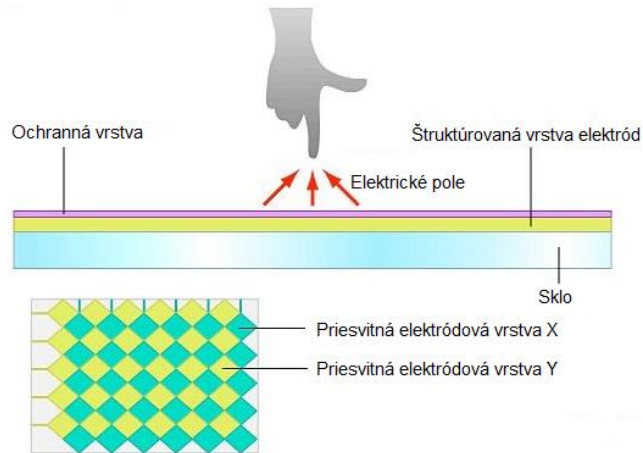


Obrázok 2 Princíp fungovania „surface capacitive“ senzora [9]

### b) *Projected Capacitive*

Kapacitné senzory typu „projected capacitive“ sa skladajú zo spodnej vrstvy skla, na ktorej je nanosená štruktúrovaná vrstva elektród, pokrytá ochrannou vrstvou vodivej fólie. Tenká elektródová vrstva je štruktúrovaná podľa dvojrozmerného karteziánskeho súradnicového systému, inými slovami, ako môžeme vidieť na obrázku 3, je rozdelená na X a Y os, teda vytvára maticu zloženú z elektród. Senzor je napojený na integrovaný obvod, ktorý privádza elektrický náboj do senzoru, teda do tejto matice a monitoruje ho. Pri kontakte so sensorom sa v danom mieste zmení elektrický náboj, čo integrovaný obvod zaznamená ako zmenu v matici, takže z pozície zmeny vie určiť polohu kontaktu.

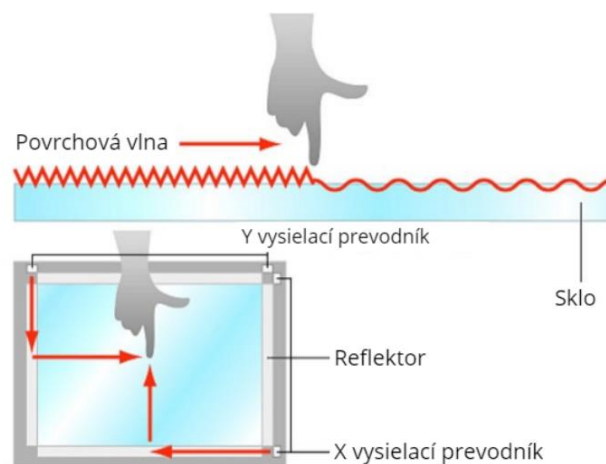
Tento princíp fungovania umožňuje snímanie polohy pre viacero kontaktov na rôznych miestach v jednom okamihu.



Obrázok 3 Princíp fungovania „projected capacitive“ senzora [9]

### 2.1.3 SAW senzory

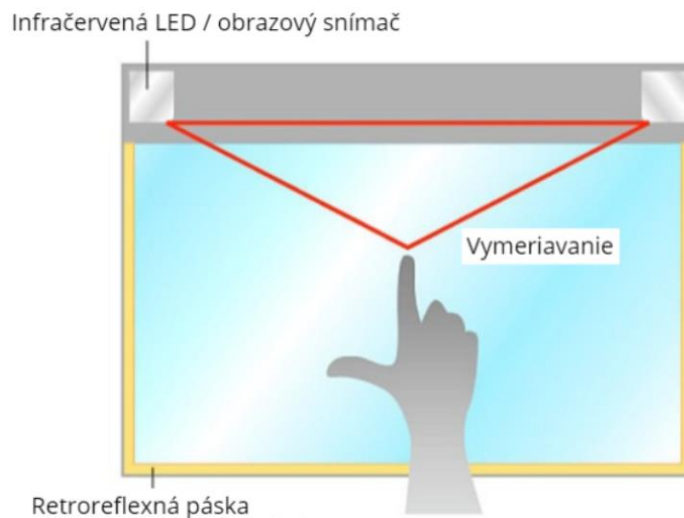
Skratka „SAW“ je z anglického pomenovania pre „Surface Acoustic Wave“, čo v preklade znamená „Povrchové Akustické Vlny“. Tieto typy senzorov sa skladajú zo sklenenej dosky, ktorá má po bokoch pripevnené vysielacie prevodníky akustických vln. Prevodníky sú umiestnené oproti sebe na opačných stranách skleneného panelu, pričom jeden prevodník slúži ako odosielateľ signálu a druhý ako prijímateľ signálu. Vysielací signál má vysoký kmitočet vlnenia a po dotyku prstu, alebo iného predmetu, ktorý dokáže tmiť akustický signál, dôjde ku zmene kmitočtu signálu v mieste dotyku. Prijímací prevodník zachytí zmenu kmitočtu signálu, prípadne absenciu signálu a integrovaný obvod vyhodnotí polohu dotyku. Ako je zrejme zo zloženia, tieto senzory boli vyvinuté hlavne kvôli veľmi dobrej priehľadnosti skrz senzor, ktorá nie je rušená rôznymi tenkými metalickými vrstvami.



Obrázok 4 Princíp fungovania „SAW“ senzora [9]

## 2.1.4 Infračervené senzory

Infračervené senzory sa väčšinou vyrábajú ako rámy, do ktorých je vložený sklenený panel. Snímanie polohy je realizované rôznymi metódami. Jednou z metód je vyhodnocovanie polohy pomocou snímania tieňov, kde sú do dvoch rohov jednej hrany senzoru umiestnené infračervené LED svietidlá. Medzi svietidlami je umiestnený senzor pre snímanie tieňov, ktorý vyhodnocuje polohu tieňu spôsobeného predmetom v snímanej ploche. Iná metóda pracuje na princípe, keď sa po celom obvode rozmiestnia vysielajúce a snímajúce infračerveného svetla a integrovaný obvod vyhodnocuje prerušenie lúčov. Tento princíp snímania umožňuje viacdotykové snímanie a podobne ako v predchádzajúcom „SAW“ senzore aj tento senzor má veľmi dobrú prehľadnosť.



Obrázok 5 Princíp fungovania infračerveného senzora [9]

## 2.1.5 Výber senzoru

Pri výbere vhodného senzora treba predovšetkým myslieť na to, ako bude daný senzor používaný. V našom prípade uvažujeme snímanie polohy kovovej guľičky, to znamená, že daný senzor musí vedieť spracovávať polohu tuhého-kovového predmetu.

Z podstaty kapacitných senzorov je zrejmé, že kovová guľička nebude schopná vyvolať zmenu elektrického náboja na senzore, takže môžeme povedať, že kapacitné senzory sú pre zadanie tejto bakalárskej práce nevhodné.

V dostupnom videozázname [8] od firmy Faytech Co., pracovník porovnával jednotlivé druhy senzorov a ich kvalitu snímania tuhého kovového predmetu, konkrétne skrutkovača, kde vidíme, že senzor polohy s technológiou „SAW“ vôbec na daný predmet nereagoval. Tento výsledok je podložený teóriou, že tuhé materiály nedokážu absorbovať pulzy akustického vlnenia, takže snímače nezaznamenajú žiadnu zmenu [16]. Z toho plynie záver, že senzory so snímaním polohy pomocou princípu „SAW“, sú pre zadanie

tejto bakalárskej práce taktiež nevhodné. Takisto sa z videa potvrdilo tvrdenie o nevhodnosti kapacitných senzorov.

Z týchto dvoch zistení a podstaty fungovania vyplýva, že vhodné senzory pre prácu s typickými mechatronickými systémami, ako je systém „Ball on plate“, sú senzory rezistívne a senzory infračervené.

Na základe tohto poznatku sa urobil prieskum trhu, pri ktorom sa hľadal najvhodnejší senzor v pomere cena a kvalita. Cenovo sa zvolila kategória senzorov do 50 €. Pri kvalite senzoru sa prihliadalo na niekoľko vlastností:

1. Pri rezistívnych senzoroch sa ako prvé pozeralo na najnižšiu možnú aktivačnú silu, pri ktorej začne senzor odosielať informácie o polohe. Tento parameter sa bral do úvahy, pretože ak chceme regulovať polohu napríklad kovovej guľičky, tak čím väčšia bude aktivačná sila, tým väčšia musí byť aj kovová guľička, aby nám senzor spoľahlivo meral presnú polohu. Rozsah najnižšej aktivačnej sily hmotnosti predmetu sa preto určil na 80 g.
2. Ako druhé sa pozeralo na maximálnu odozvu senzoru, to znamená, ako rýchlo dokážeme z daného senzoru vyčítavať informácie o novej polohe. Maximálna doba odozvy sa stanovila na 10 ms.
3. V poslednom rade sa pozeralo na veľkosť uhlopriečky senzora, aby sa dalo pohodlne a presne uskutočniť meranie na senzore. V prípade infračerveného senzoru sa zistilo, že pri kúpe sa minimálna cena pohybuje okolo hodnoty 55€. Pri prieskume sa zistilo, že mnoho dostupných, lacnejších senzorov nemá k dispozícii datasheet, takže nie je možné zistiť potrebné informácie o parametroch senzoru.

Pri konečnom výbere sme brali do úvahy, že drahšie senzory majú menšiu aktivačnú silu a rýchlejšiu odozvu a tiež zaručujú vyššiu spoľahlivosť, ale sú odskúšané pri rôznych iných prácach, ktoré sa už realizovali. Po záverečnom zvážení všetkých skutočností, sme sa rozhodli pre výber lacnejšieho senzora od predajcu BuyDisplay, ktorý podľa datasheetu spĺňa požadované parametre.

Pracovné napätie:	3 – 7 V
Uhlopriečka:	8''
Aktivačná sila:	50 – 120 g
Odozva:	< 10 ms
Cena:	7,13 €

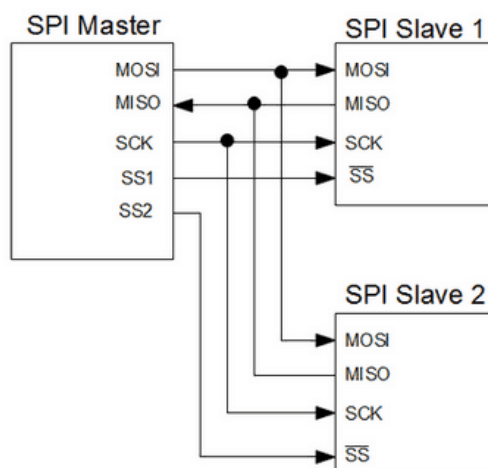
Tabuľka 1 Parametre použitého senzora



Obrázok 6 Použitý rezistívny 2D senzor polohy [10]

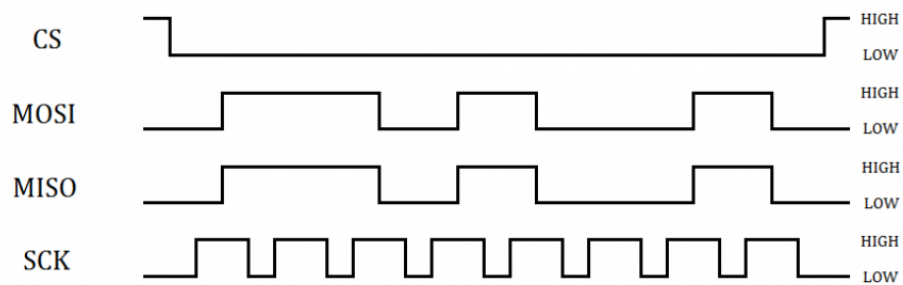
## 2.2 SPI rozhranie

Skratka SPI je odvodená z anglického označenia „Serial Peripheral Interface“, čo v preklade znamená sériové periférne rozhranie. Využíva sa pre komunikáciu medzi jednotlivými integrovanými obvodmi, ako sú A/D prevodníky, procesory, rôzne čipy pre spracovávanie signálu, pamäte a pod., v mikrokontroléroch a podobných riadiacich jednotkách. Z názvu plynie, že komunikácia medzi jednotlivými komponentami prebieha sériovo, teda dáta sa posielajú postupne za sebou v bitovej forme. Aby sa mohlo využívať SPI rozhranie v obvode, je potrebné, aby jednotlivé integrované obvody obsahovali potrebné piny a mali prispôbenú vnútornú štruktúru.



Obrázok 7 Zapojenie komponentov pri SPI komunikácii [11]

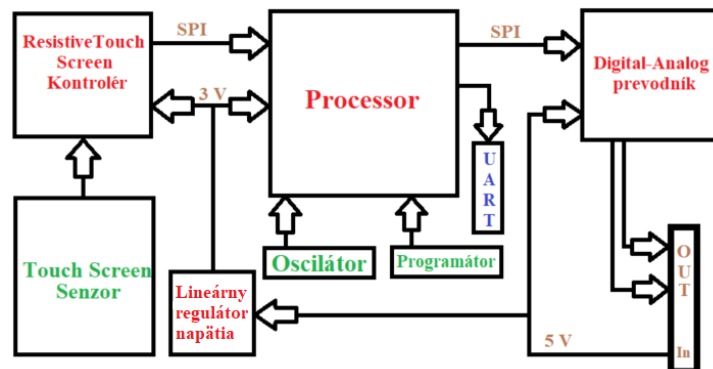
Komunikácia medzi jednotlivými integrovanými obvodmi má pevne stanovené pravidlá a taktiež zapojenia. V zapojení sa vždy určí jeden hlavný integrovaný obvod označovaný ako Master, zväčša to býva procesor, ktorý bude riadiť celú komunikáciu, takže ostatné jednotky označované ako Slave čakajú, pokiaľ Master nezačne komunikáciu. Pre zahájenie komunikácie využíva Master pin, ktorý funguje ako SS (Slave Select) alebo CS (Chip Select), ktorý pri začiatku komunikácie nastaví výstupnú hodnotu tohto pinu buď na 0, alebo 1, čím aktivuje Slave zariadenie. Veľkou výhodou je, že tieto dve zariadenia Master a Slave vedia komunikovať vo „Full Duplex“ móde, to znamená, že odosielanie a prijímanie dát prebieha zároveň. Pre zosynchronizovanie týchto dát sa využíva Clock, v preklade hodinový signál, ktorý sa generuje buď externe pomocou oscilátorov, alebo interne v danom Master procesore a následne je tento signál vyvedený na pin SCLK alebo SCK, ktorý musí byť spojený so všetkými ostatnými Slave zariadeniami. Jeho úlohou je určiť spoločnú frekvenciu na akej budú všetky komponenty komunikovať. Pre samotné posielanie dát sa využívajú MOSI (Master Out Slave In) a MISO (Master In Slave Out) piny, kde anglické slovo Out znamená „von“ a slovo In znamená „dnu“. Pri tomto označení sa hovorí o dátach, ktoré sa posielajú medzi aktívnymi jednotkami. Pri jednotkách, ktoré sú primárne určené ako Slave, sa tieto piny MOSI a MISO označujú ako DIN (Data In) a DOUT (Data Out). Všetky tieto piny má každý integrovaný obvod jasne určené, preto treba vždy skontrolovať datasheet daného integrovaného obvodu, na ktorom piny sa daná funkcia nachádza.



Obrázok 8 Časový priebeh SPI komunikácie [12]

## 2.3 Výber komponentov a ich komunikácia

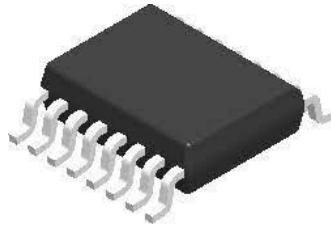
Pred výberom vhodných komponentov sme vytvorili blokovú schému zapojenia jednotky pre spracovávanie signálu (ďalej ako ovládacia jednotka), podľa ktorej sme postupovali pri výbere komponentov a taktiež pri samotnom návrhu ovládacej jednotky.



Obrázok 9 Bloková schéma zapojenia ovládacej jednotky

### 2.3.1 Výber Touch Screen kontrolérom a jeho komunikácia

Ako prvý hlavný člen ovládacej jednotky bolo treba vybrať vhodný kontrolér, ktorý vie spracovať analógový signál zo senzora a prekonvertovať ho na digitálny výstup, ktorý sa bude spracovávať v procesore. Pre tento účel bol vybraný integrovaný obvod **ADS7843IDBQRQ1** od spoločnosti Texas Instruments, ktorý je stavaný na spracovávanie signálu zo 4-vodičového rezistívneho senzora (Ďalej už iba čip).



Obrázok 10 Touch Screen kontrolér ADS7843IDBQRQ1 [2]

Tento čip vie pracovať v 8 bitovom a 12 bitovom rozlíšení, to znamená, že na výstup sa bude posielat' hodnota polohy, buď v jednom alebo druhom formáte. Maximálna vzorkovacia frekvencia tohto čipu je 125 kHz. Čip obsahuje 16 pinov na výstupe, kde 4 piny sa používajú pre napájanie, 4 piny pre pripojenie 4-vodičového rezistívneho senzora a 6 pinov je určených pre komunikáciu pomocou SPI rozhrania. Zvyšné piny ostanú nepripojené. Zapojenie tohto kontroléru je uvedené v jeho datasheete [2].

Pre komunikáciu sme nastavili 12 bitové rozlíšenie, takže celková doba prijatia a odoslania dát bude mať dĺžku 24 bitov. Prvých osem bitov je potrebných pre nastavenie pracovnej činnosti čipu.

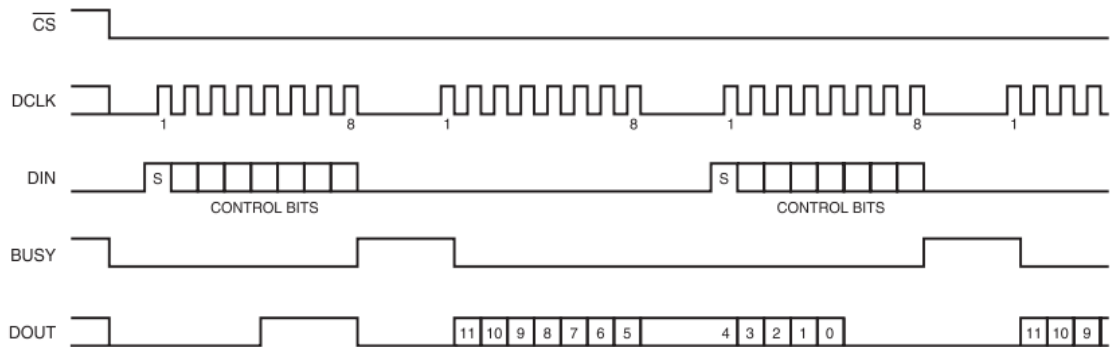
Bit 7 (MSB)	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0 (LSB)
S	A2	A1	A0	MODE	SER/DFR	PD1	PD0

Obrázok 11 Osem inicializačných bitov pre čip [2]

Značenie bitov má opačnú logiku, preto 7. bit na Obrázku 12 bude znamenať prvý odoslaný bit v komunikácii. Ako vidíme prvý bit značený „S“ je štartovací bit pre nastavovanie čipu. Pokiaľ tento bit nie je v hodnote 1, kontrolér bude celú osem bitovú informáciu ignorovať. Ďalšími 3 bitmi A2, A1, a A0 nastavujeme vnútorné zapojenie čipu, čím ho nastavíme na požadované meranie, napríklad meranie prúdu v X-ovej osi. Piatym bitom MODE nastavujeme rozlíšenie výstupných dát čipu. Šiesty bit SER/DFR je pre dodatočné nastavenie interného zapojenia, takže má spojitost' s bitmi A2 – A0 . Poslednými bitmi PD1 a PD0 sa nastavuje napájací mód, či má byť kontrolér počas konverzie plne napájaný, alebo má prejsť do Low-Power módu.

Po odoslaní ôsmich inicializačných bitov sa čip prepne do prevádzacieho režimu, kedy sa z čipu odosielajú informácie o nameranej polohe. Keďže komunikácia prebieha na základe osem bitových informácií, výsledné dáta čipu budú v 16 bitovom formáte. Prvý bit bude vždy nulový, pretože po inicializácii je potrebné zabezpečiť určitú dobu, počas ktorej, čip spracováva údaje zo senzora. Nasledujúcich dvanásť bitov bude obsahovať údaje o nameranej polohe predmetu. Z toho vyplýva, že ostávajú posledné tri bity, ktoré čip vyplní nulovými hodnotami. Kvôli podstate SPI komunikácie, sa pre

získanie týchto dát musia posielat' z procesoru takzvané „dummy data“, ktoré budú v našom prípade obsahovať iba nulové hodnoty. Čip vyhodnotí štartovací bit ako 0, takže



Obrázok 12 Časový priebeh 16 bitovej komunikácie s čipom [2]

proces čipu sa nijako nezmení.

Potrebnú dobu čakania po inicializácii čipu sme dopočítali nasledujúcim spôsobom: pre dosiahnutie najvyššej vzorkovacej frekvencie potrebujeme pracovať na najvyššej možnej frekvencii. Z datasheetu vieme, že maximálna frekvencia clocku je 2 MHz. Pomocou vzťahu:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

kde  $T$  je perióda a  $f$  je frekvencia, vieme dopočítať, že maximálna dĺžka jedného clocku je  $0,5 \mu\text{s}$ . V datasheete čipu [2] je ukázané, že pri sériovom odčítavaní dát, je potrebných pre jednu vzorku iba 16 bitov z toho 1 bit je určený práve pre dopočítavanú dobu po inicializácii. Z toho vyplýva, že celková doba jednej vzorky sa bude rovnať  $7,5 \mu\text{s}$ , čo odpovedá vzorkovacej frekvencii s veľkosťou približne 133 kHz. Po aplikovaní rovnice (1), dopočítame z maximálnej vzorkovacej frekvencie minimálnu dĺžku trvania jednej vzorky, čo sa rovná  $8 \mu\text{s}$ , takže 125 kHz. V závere je zrejmé, že doba potrebná pre správne meranie čipu po inicializácii, je  $0,5 \mu\text{s}$ . Ako posledné, čo treba zabezpečiť, je doba po zapnutí čipu, teda doba medzi padajúcou hranou CS a prvou nábežnou hranou clocku CKL.

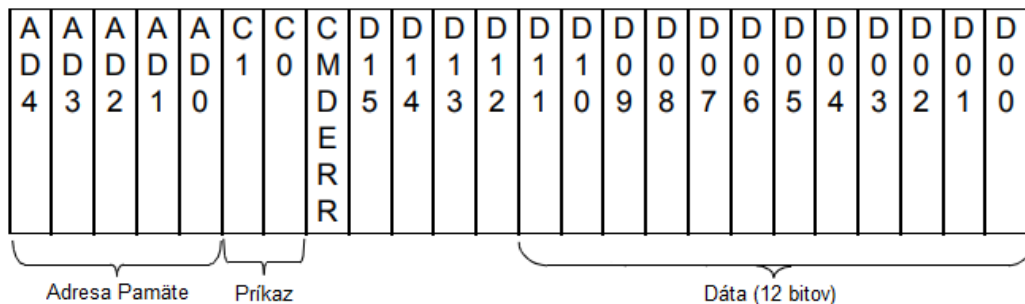
### 2.3.2 Výber Digitál-Analog prevodníku a jeho komunikácia

Ako druhý člen ovládacej jednotky sa musel vhodne zvoliť Digital-Analog prevodník, ďalej už len DAC, ktorého komunikácia prebieha pomocou SPI rozhrania. Ako je uvedené v zadaní tejto bakalárskej práce, potrebujeme, aby sa jeho výstup mohol rozdeliť na dva jednotlivé signály a to pre X a Y polohu predmetu na senzore. Pre tento účel bol zvolený DAC s označením **MCP48FEB22-E/UN** od spoločnosti Microchip Technology, ktorý má 10 pinov, z toho 2 piny sú určené pre operačné napätia, 4 piny slúžia pre komunikáciu pomocou rozhrania SPI a 2 piny slúžia pre odosielanie výstupnej analógovej hodnoty. Pri práci s DACom sa vychádzalo z jeho datasheetu [3].



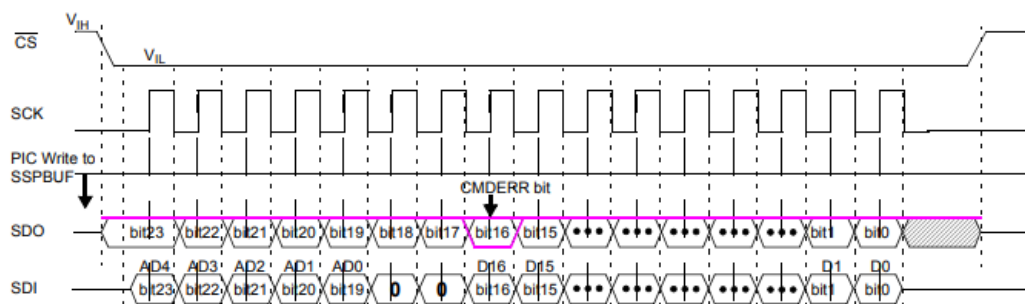
Obrázok 13 13 Digitál-Analóg prevodník MCP48FEB22-E/UN [15]

Komunikácia prebieha pomocou 24 bitového formátu vstupných dát, kde prvých osem bitov slúži na inicializáciu DACu, následné štyri bity sú takzvané „dummy data“ a zvyšných dvanásť bitov sa konvertuje na analógovú hodnotu na výstup. Prvých osem inicializačných bitov sa skladá z piatich bitov A4 - A0, ktorými nastavujeme adresu pamäte, do ktorej sa budú dáta zapisovať. Ďalšie dva bity C1 - C0, ktorými zadávame prevodníku príkaz, či bude z danej pamäte čítať hodnotu alebo do nej zapisovať a na konci je CMDERR bit, ktorý nastavuje prevodník na hodnotu 1, pokiaľ je predchádzajúcich sedem bitov správne nastavených. Tento bit umožní SPI pinu DOU odosielať pre nás nepotrebné dáta, čím umožní DACu prijímanie zvyšných 16 bitov. Obidva analógové výstupy majú rozdielne pamäte, takže pre rozdelenie polohy pre X a Y sa zakaždým posielajú hodnoty do inej pamäte.



Obrázok 15 24-bitová komunikácia Digital-Analog prevodníku [3]

Po správnom nastavení odosielaných dát procesorom, teda prijímaných dát na DACu, bude komunikácia vyzerat' nasledovne:



Obrázok 14 Časový priebeh 24 bitovej komunikácie s Digital-Analog prevodníkom [3]

### 2.3.3 Výber procesoru a jeho komunikácia

Ako hlavný riadiaci člen Master sa vybral microkontrolér od spoločnosti Microchip Technology, ktorý má označenie **PIC18LF25K83-I/SO**.



Obrázok 16 Procesor PIC18LF25K83-I/SO [13]

Ide o 8 bitový procesor, ktorý umožňuje SPI komunikáciu. Obsahuje 28 pinov, takže dostatočné množstvo pre pripojenie všetkých potrebných komponentov. Ako môžeme vidieť z datasheetu procesoru [1], piny 27 a 28 slúžia pre komunikáciu s procesorom. Pre programovanie procesoru sa použil program MPLAB X IDE v5.30 od spoločnosti Microchip Technology, ktorý spoľahlivo spolupracuje s procesormi typu PIC. Pre naprogramovanie procesoru je treba použiť programátor, ktorý zabezpečuje správne prekonvertovanie a nahratie kódu do procesoru. V našom prípade sme použili programátor typu PICkit 4, taktiež od spoločnosti Microchip Technology.



Obrázok 17 Programátor PICkit 4 [14]

Pri samotnom programovaní sa muselo vychádzať z daných datasheetov komponentov [1], [2], [3]. Tiež chceme docieľiť, aby pri komunikácii procesoru s ostatnými komponentami celá výmena dát prebiehala v digitálnej podobe. Pre správne fungovanie digitálnej komunikácie na pinoch, je potrebné vypnúť prednastavené analógové rozhranie týchto pinov.

SPI modul v našom procesore sa skladá z dvoch 2-Bytových bufferov (zásobníkov), pričom jeden je určený pre odosielanie dát, TX buffer, a druhý pre prijímanie dát, RX buffer. SPI mód sa nastavil, aby pracoval vo „Full-Duplex“ móde, čo

znamená, že komunikácia prebieha pokiaľ RX buffer nie je plný a TX buffer nie je prázdny. Konečný program má nasledovný postup :

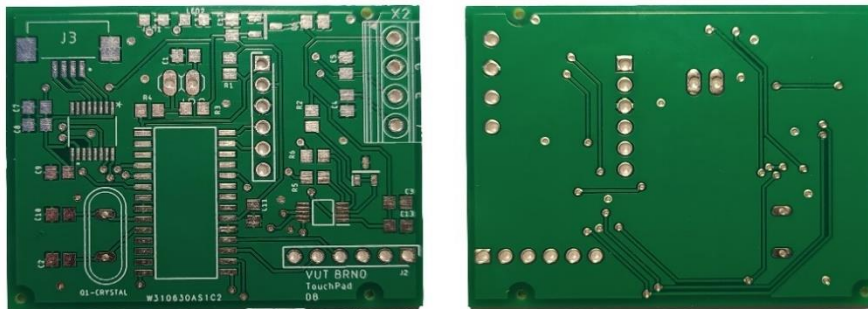
1. Inicializácia celkových nastavení procesoru
2. Komunikácia s čipom, uloženie prijatých informácií o polohe
3. Upravenie uložených informácií do správnej podoby
4. Komunikácia s DACom

Tento postup, okrem 1. bodu , sa musel zopakovať pre polohy X aj Y, takže dvakrát za jeden cyklus kódu. Časť kódu je možné vidieť v prílohe 3.

### 3 Popis praktickej časti práce

#### 3.1 Návrh ovládacej jednotky

Pri návrhu ovládacej jednotky sa vychádzalo z nadobudnutých vedomostí z literatúry [4] a tiež z blokovej schémy (obrázok 9). Na návrh dosky plošných spojov, ďalej ako DPS, sa využil program AUTODESK EAGLE, kde sa najskôr navrhli schémy zapojenia jednotlivých komponentov, z ktorých sa vytvorila výsledná celková schéma. Z výslednej schémy sa vygenerovala a vhodne upravila schéma plošných spojov a výsledná verzia schémy plošných spojov sa dala do výroby. Celý proces návrhu bol sprevádzaný datasheetmi jednotlivých komponentov [1], [2], [3], [5], [6]. Pre korektný návrh schémy zapojenia danej súčiastky bolo nevyhnutné najskôr plne pochopiť funkcionality a následne túto vedomosť aplikovať pri zapojení s ostatnými komponentami.



Obrázok 18 Fotografia plošného spoja

Na obrázku 18 môžeme vidieť výslednú dosku plošných spojov, ktorá sa skladá z dvoch vrstiev, naľavo horná, napravo spodná. Pre zjednodušenie zapojenia sa využila funkcia Polygon, pri ktorej sa zem obvodu (mínusový pól) rozťahne po celej doske, čím vznikne jedna súvislá vrstva zápornej polarita a následne sa do tejto vrstvy vyfrézujú jednotlivé cesty (zapojenia) kladnej polarita.

Medzi výstupné analógové piny DACu a svorky, ktoré predstavujú finálny výstup pre snímanie polohy, sa umiestili RC filtre, ktoré predstavujú filtračné články dolnej prepusti. Výstupnou hodnotou DACu je napätie.

Pri navrhovaní RC filtra sme museli zabezpečiť, aby filtračný kondenzátor dokázal pracovať na maximálnej frekvencii čipu 2 MHz, to znamená, aby dokázal na sebe

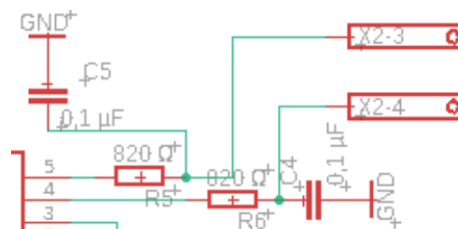
dostatočne rýchlo zmeniť napätie, ale zároveň aby odfiltroval dostatok šumu. To sa zabezpečí vhodne zvoleným odporom, ktorý vyvolá dostatočne veľký prúd, ale zároveň vhodne zvolenou veľkosťou kondenzátora. Pri návrhu filtra sme vychádzali zo vzťahu:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2)$$

,kde  $f_c$  je „cut-off“ frekvencia a  $\tau$  je časová konštanta filtru, ktorá je rovná :

$$\tau = RC \quad (3)$$

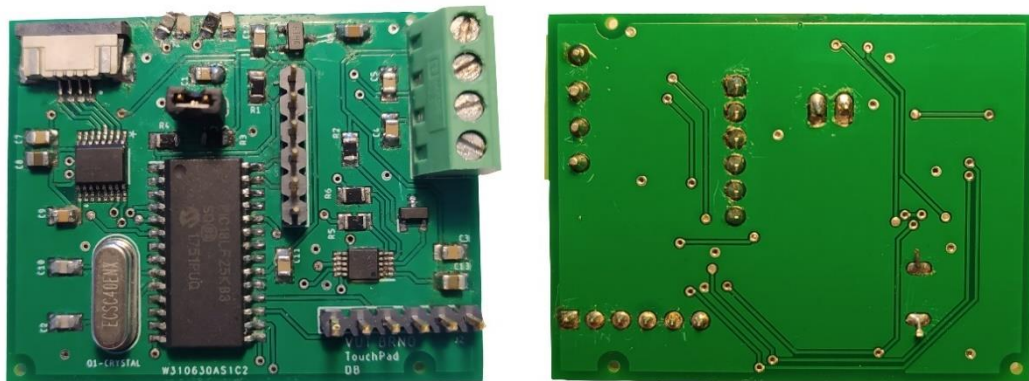
Požadovaná „cut-off“ frekvencia sa stanovila na 2 kHz. Po navrhnutí odporu a kondenzátora z rovnice (2), vyšla časová konštanta filtra **82  $\mu$ s** a prepočítaná „cut-off“ frekvencia **1941 Hz**. Správnosť výpočtov sa overila vo výpočtovom programe [7].



Obrázok 19 Navrhnutý RC filter

Pri zapojení DACu sme použili externú napätovú referenciu [6], pri ktorej bolo potrebné vhodne zvoliť vstupný odpor. V datasheete napätovej referencie [6] je znázornená vnútorná schéma zapojenia a všetky potrebné údaje pre dopočítanie odporu. Po uplatnení druhého Kirchhoffovho zákona a následne Ohmovho zákona sme dopočítali potrebný odpor, ktorý vyšiel 100  $\Omega$ .

Po obdržaní vyrobenej DPS a dodaní zakúpených komponentov bolo potrebné spájkovať súčiastky na plošný spoj.



Obrázok 20 Fotografia ovládacej jednotky

Výsledná ovládacia jednotka sa pri programovaní napájala z 3 sériovo zapojených tužkových batérií s označením AA, ktoré pri plnom nabití dosahovali napätie o veľkosti 4,7 V. Takýto zdroj napájania nie je vhodný pri pracovnom režime, pretože napätie na batériách postupne časom klesá a tým sa menia charakteristické hodnoty, ako je napríklad

napätie na výstupe, alebo presnosť práce integrovaných obvodov. Najvhodnejšie je pripojiť sústavu na zdroj konštantného napätia.

### 3.1.1 Schéma zapojenia a zoznam použitých komponentov

Po vypracovaní jednotlivých schém zapojení komponentov a ich následnom spojení do seba, vznikla výsledná schéma ovládacej jednotky, ktorá je pridaná ako príloha 1.

Po zostavení schémy sa vybrali a kupovali potrebné súčiastky cez internetový obchod <https://cz.mouser.com>. Pre zostavenie ovládacej jednotky boli potrebné nasledujúce súčiastky:

<b>Procesor:</b>	1x PIC18LF25K83-I/SO
<b>Touch Screen kontrolér:</b>	1x ADS7843IDBQRQ1
<b>Digital-Analog prevodník:</b>	1x MPC48FEB22-E/UN
<b>Napät'ová referencia:</b>	1x TL431
<b>Regulátor napätia:</b>	1x MCP1703
<b>Rezistory:</b>	2x 10 k $\Omega$
	1x 470 $\Omega$
	1x 100 $\Omega$
	2x 820 $\Omega$
<b>Kondenzátory:</b>	3x 1 $\mu$ F
	2x 10 $\mu$ F
	6x 1 $\mu$ F
	2x 30 pF
<b>LED diódy:</b>	2x s referenčným napätím < 3,3 V
<b>Kryštálický Oscilátor:</b>	1x 4MHz
<b>Pevné koncové spojky:</b>	1x 4 kontakty
<b>Pin Header:</b>	2x 6 vertikálnych kontaktov v rade
	1x 2 vertikálne kontakty v rade
<b>Jumper socket:</b>	1x

Tabuľka 2 Zoznam použitých súčiastok

Pre typ rezistorov sme zvolili kategóriu SMD s technológiou Thick Film, v puzdre o veľkosti 0805 in (2 mm na dĺžku a 1,2 mm na šírku) s teplotným koeficientom 100 PPM/C od výrobcu Vishay / Dale.

Pre typ kondenzátorov sme zvolili tiež kategóriu SMD, ide o viacvrstvové keramické kondenzátory v puzdre s veľkosťou 0805, od výrobcu KEMET. Dielektrikum jednotlivých kondenzátorov je rôzne a pohybuje sa v kategóriách X5R, X7R a X8R. Pri všetkých kondenzátoroch sa zvolilo menovité napätie 25 VDC.

Keďže maximálna frekvencia, na ktorej môže sústava fungovať je 2MHz, pri výbere oscilátora sa usúdilo, že pre zaručenie stabilného a dostatočne rýchleho hodinového signálu bude postačujúci kryštálický oscilátor s kmitočtom 4 MHz.

Pri regulátore napätia je potrebné, aby nám vhodne znižoval vstupné napätie tak, aby na výstupe bolo maximálne požadovaných 3,3 V. Zvolili sme preto regulátor typu **MCP1703** od spoločnosti Microchip Technology, ktorý znižuje vstupné napätie 5 V na výstupné napätie 3 V.

## 3.2 Testovanie sústavy

Počas testovania sústavy bola ovládacia jednotka pripojená pomocou staršej nabíjačky pripojenej priamo do siete, ktorá dávala na výstupe napätie s veľkosťou 5,4 V a maximálny jednosmerný prúd 500 mA. Podstatou testovania bolo zistiť:

1. Rýchlosť akou dokáže daná sústava pracovať
2. Lineárnosť senzora
3. Minimálnu aktivačnú silu potrebnú pre spojitú snímajú
4. Šum senzora v rôznych miestach pre rôzne aktivačné sily.

Pre zistenie týchto vlastností sme našu sústavu pripojili na počítačový osciloskop, typu PicoScope 2206B MSO od spoločnosti pico Technology, ktorý obsahuje dva analógové kanály a šesťnásť digitálnych kanálov pre snímajú signálov. Pri práci s osciloskopom sa využíval program PicoScope 6. Všetky merania prebehli pomocou pripojenia analógových sond na výstupné svorky a po pripojení digitálnych sond na svorky procesoru, bolo možné sledovať presný priebeh SPI komunikácie.

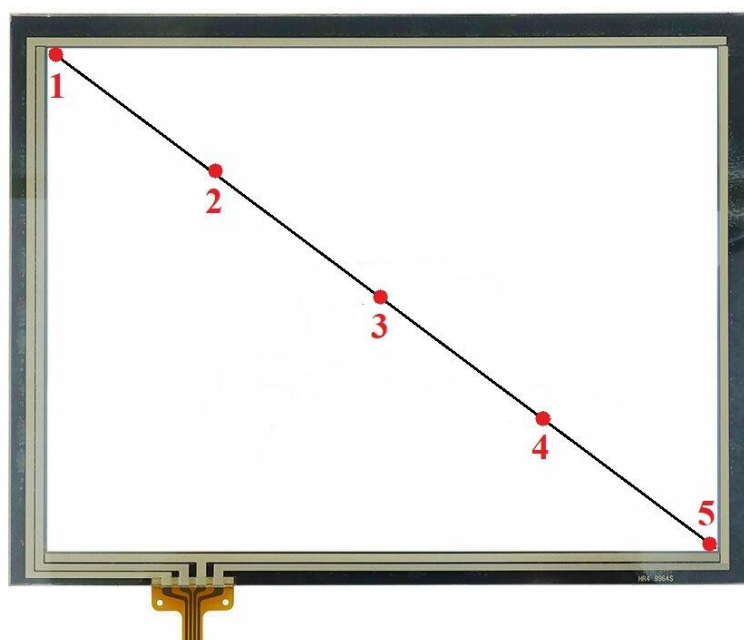


Obrázok 21 Nameraná digitálna SPI komunikácia v ovládacej jednotke

Pomocou funkcie pravítka v aplikácii sa zmerala reálna dĺžka jedného cyklu merania polohu X a Y. Zistilo sa, že dĺžka jednotlivých cyklov môže byť mierne odlišná.

Po nájdení najkratšej a najdlhšej dĺžky cyklu sme dopočítali, že stredná hodnota sa rovná **175,35  $\mu$ s**. Túto hodnotu budeme považovať za priemernú dĺžku cyklu, jednu periódu. Z rovnice (1) teda vieme, že zariadenie pracuje so vzorkovacou frekvenciou 5703 Hz. Z úvahy, že ovládacia jednotka sníma najskôr signál pre X polohu a následne pre Y polohu, dospejeme k záveru, že doba pre získanie novej X alebo Y polohy je dvojnásobná, takže frekvencia získavania novej hodnoty polohy je polovičná. Z toho vyplýva, že nový údaj o X alebo Y polohe predmetu na senzore dostaneme na výstupe **2851**-krát za sekundu. Samozrejme tento údaj sa môže líšiť v závislosti od toho, ako rýchlo dokáže daný senzor polohy reagovať na zmenu polohy predmetu.

Pri meraniach lineárnosti a šumu sa určilo 5 bodov na uhlopriečke senzoru, pre ktoré sa realizovali dané merania. Ak premietneme daný senzor do karteziánskeho súradnicového systému, os X sa bude nachádzať na ľavej hrane senzoru a os Y bude na hornej strane senzoru. Z toho vyplýva, že bod [0,0] sa bude nachádzať v ľavom hornom rohu senzora. Tento bod označíme ako **polohu 1**. Každá ďalšia poloha bude vzdialená od predchádzajúcej polohy o 50,66 mm, čím zaručíme, že **poloha 5** sa bude nachádzať v protiláhlom rohu senzora [max,max]. Takýmto rozdelením sa určilo, že pre polohu 1 bude na výstupných svorkách najnižšie možné napätie pre oba signály a pre polohu 5 zas najvyššie.

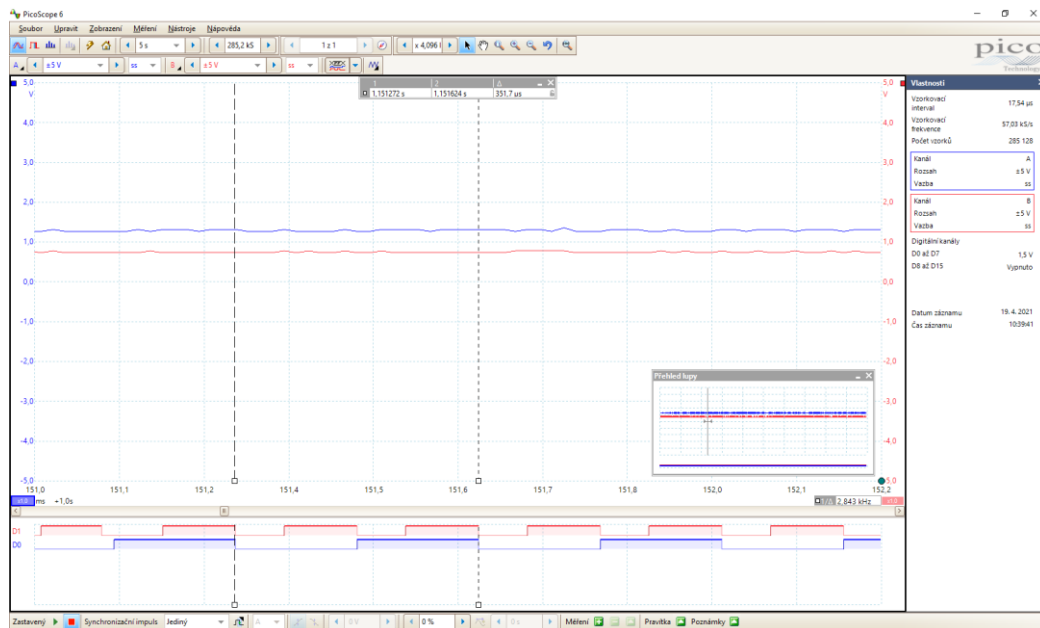


Obrázok 22 Rozmiestnenie meraných polôh na senzore [10]

Pre jednotlivé polohy sa ďalej pracovalo s rôznymi aktivačnými silami, takže s rôznou hmotnosťou záťaže. Keďže senzor má v datasheete napísanú hodnotu aktivačnej sily 50 – 120 g, zvolili sa 3 hodnoty, pre ktoré sa bude šum testovať. Prvá hodnota je 53 g, druhá 80 g a tretia 110 g.

### 3.2.1 Nastavenie zariadenia PicoScope

Pre nasledujúce merania sa úplne vypli a odpojili digitálne sondy, okrem dvoch potrebných, aby výpočty a namerané hodnoty patrili iba analógovým signálom. Z predchádzajúceho merania vieme, že doba jedného cyklu zisťovania polohy je dlhá 175,35  $\mu$ s. Pre dostatočne presné meranie šumu sa stanovilo, aby osciloskop namerlal 10 hodnôt na výstupných svorkách za jeden cyklus a celková dĺžka merania je stanovená na 5 s. Perióda merania osciloskopu je teda 17,54  $\mu$ s, z čoho vyplýva, že frekvencia merania je 57 028,8 vzoriek za sekundu (Hz). Osciloskop počas celej doby merania zaznamená približne 285 144 vzoriek. Tieto vzorky sú zložené z oboch signálov X a Y, preto vo výsledku meranie polohy X bude mať polovičný počet zo všetkých vzoriek. Pre odlišenie merania X a Y signálu sa použili dve digitálne sondy, ktoré zaznamenávali priebeh CS Touch Screen kontroléru (Obrázok 21 - signál D1) a signálu z LED diódy (Obrázok 21 - signál D0). LED dióda bola naprogramovaná tak, aby bola zapnutá pri meraní Y polohy a vypnutá pri meraní X polohy. Je potrebné si uvedomiť, že celkový počet nameraných vzoriek sa skladá z hodnôt, ktoré priviedol na výstup DAC a z hodnôt, ktoré sú spôsobené vplyvom šumu sond a iných parazitných vplyvov.



Obrázok 23 Ukážka merania signálu

Pre spracovanie nameraných hodnôt sa použil program MATLAB R2019b, kde sa vytvoril program, ktorý pracuje tak, že pri padajúcej hrane CS čipu (obrázok 21 – signál D1) sa zapína komunikácia s Touch Screen kontrolérom, takže na výstup DACu prišla nová hodnota polohy. Ak je signál LED diódy v hodnote 1 (obrázok 21 – signál D0), meria sa Y poloha, takže nová Y poloha sa na výstupe DACu objaví až pri padajúcej hrane signálu D0, čo trvá dva celé cykly. Výsledná hodnota pre Y signál z jedného merania polohy sa bude priemerovať z dvoch celých cyklov, teda z 20 nameraných hodnôt. Z výsledných hodnôt sme v druhej časti programu vytvorili dva histogramy, ktoré reprezentujú početnosť daných hodnôt na výstupe za celkovú meranú dĺžku 5 s. Aby sa dali grafy medzi sebou porovnávať, všetky merania sme v histogramoch rozdelili na rovnaký počet skupín – 23. Kód je spracovanie je možné vidieť v prílohe 2.

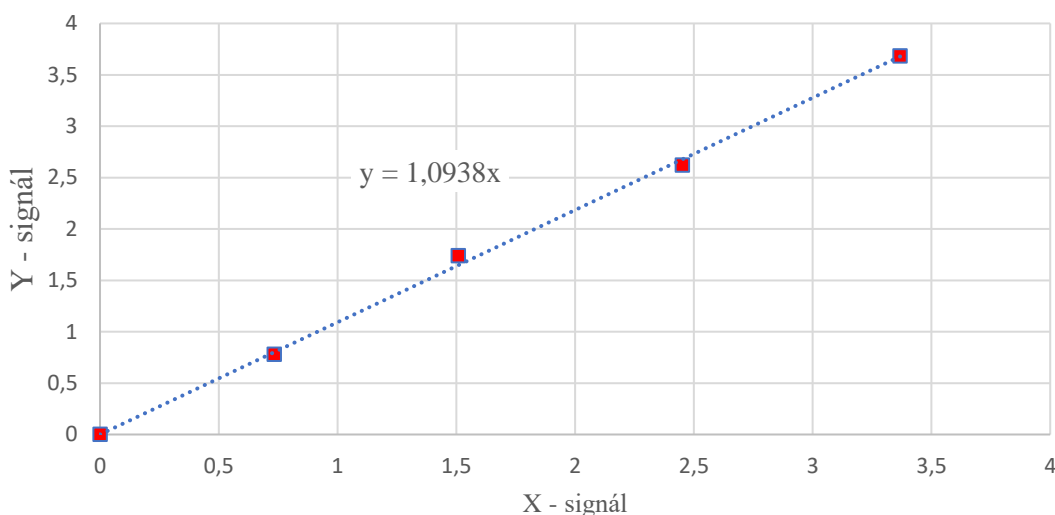
### 3.2.2 Lineárnosť senzoru

Pri meraní lineárnosti sa pracovalo s maximálnou zvolenou hodnotou záťaže, predstavujúcou 110 g. Pri meraní sa v aplikácii nastavilo počítanie priemernej hodnoty analógových signálov zo sond za celú dobu merania a závažie sa postupne posúvalo z polohy 1 do polohy 5. Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke:

	X – SIGNÁL [V]	Y – SIGNÁL [V]
<b>POLOHA 1:</b>	1,358	0,788
<b>POLOHA 2:</b>	2,092	1,567
<b>POLOHA 3:</b>	2,866	2,526
<b>POLOHA 4:</b>	3,810	3,409
<b>POLOHA 5:</b>	4,726	4,472

Tabuľka 3 Namerané hodnoty pre výpočet lineárnosti senzora

Pre vytvorenie grafickej závislosti sa všetky namerané hodnoty skorigovali o hodnotu polohy 1, tým sa posunul graf do počiatku súradnicovej sústavy, ale smernica priamky ostala nezmenená.



Graf 1 Lineárna závislosť senzora

Pri počítaní lineárnosti sa vychádzalo zo smernicovej rovnice priamky:

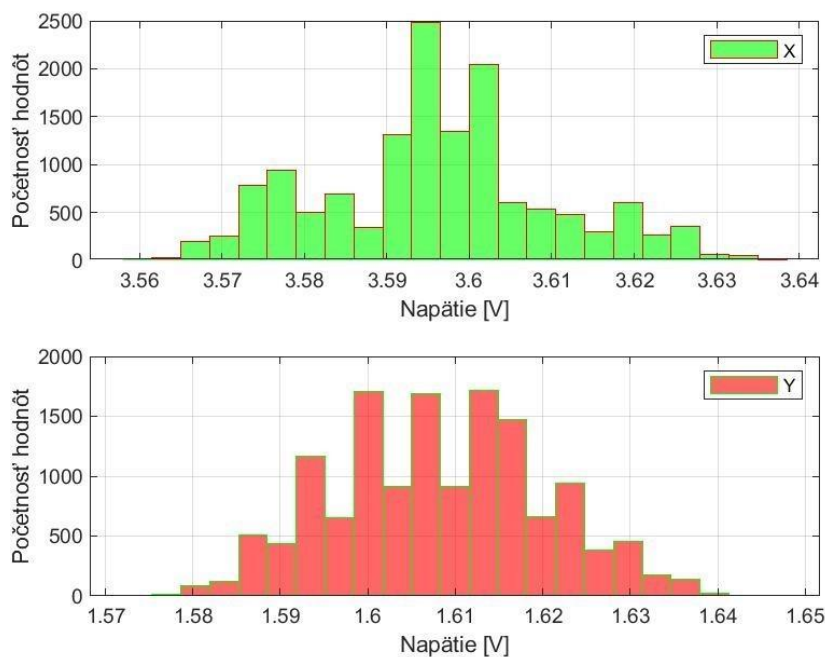
$$y = kx + q \quad (4)$$

kde  $x$  a  $y$  predstavujú súradnice bodu,  $k$  predstavuje smernicu priamky (koeficient lineárnosti) a  $q$  je posunutie na osi  $y$ , čo je v našom prípade 0. Po úprave dostaneme vzorec pre výpočet koeficientu lineárnosti:

$$k = \frac{y}{x} \quad (5)$$

Po následnom dopočítaní ostatných koeficientov nám vyšlo, že lineárnosť senzoru je  $\pm 5,37\%$ .

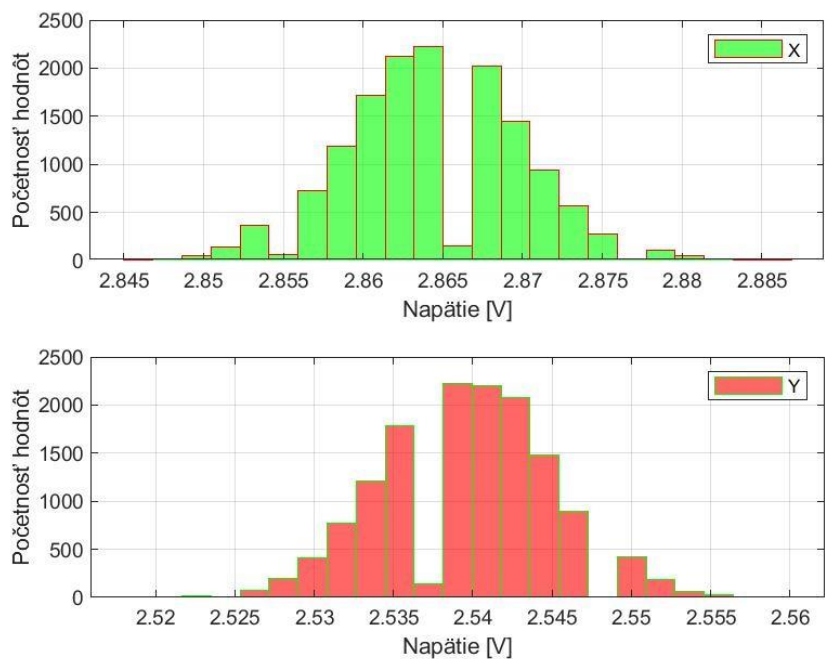
### 3.2.3 Šum v nezaťaženom stave



Graf 2 Rozloženie šumu pre nezaťažený stav senzora

### 3.2.4 Šum pri minimálnej aktivačnej sile

Pre meranie minimálnej aktivačnej sily sa zvolila poloha 3, čo je uprostred senzoru, pretože sa predpokladá, že po krajoch bude senzor snímať horšie.

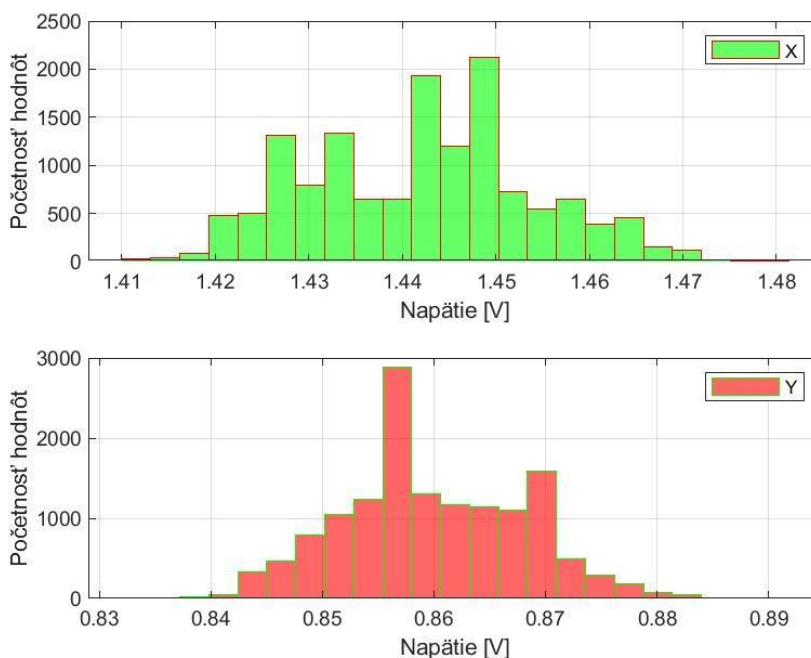


Graf 3 Rozloženie šumu pre minimálnu zaťažovaciu hmotnosť

### 3.2.5 Šum pre jednotlivé zaťažovacie polohy závislé od hmotnosti závažia

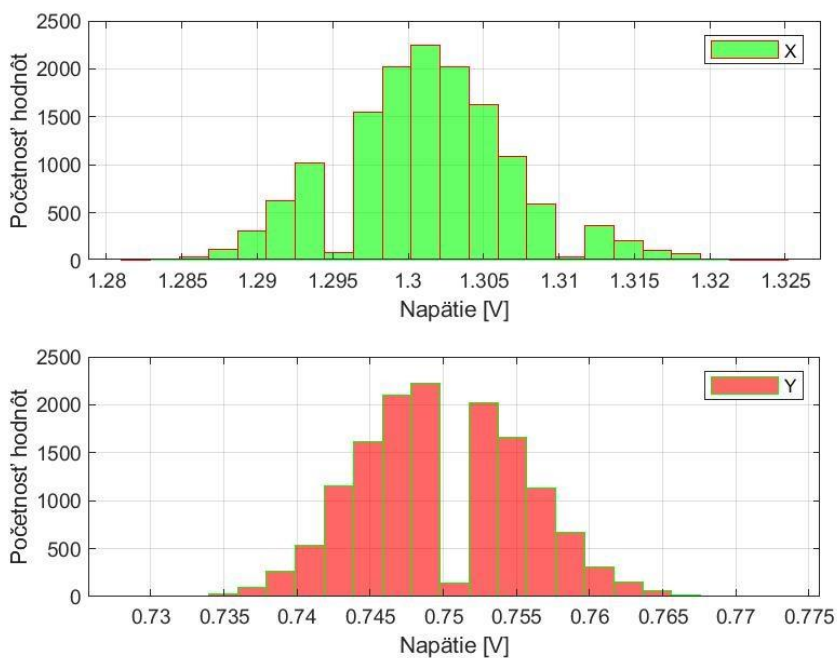
#### 1. Šum pre polohu 1

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g:



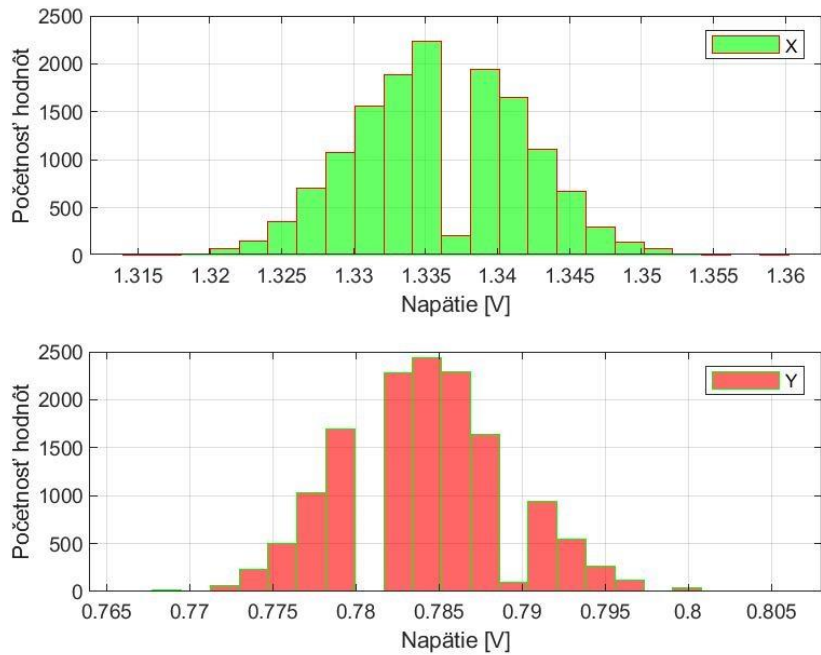
Graf 4 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 1

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g:



Graf 5 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 1

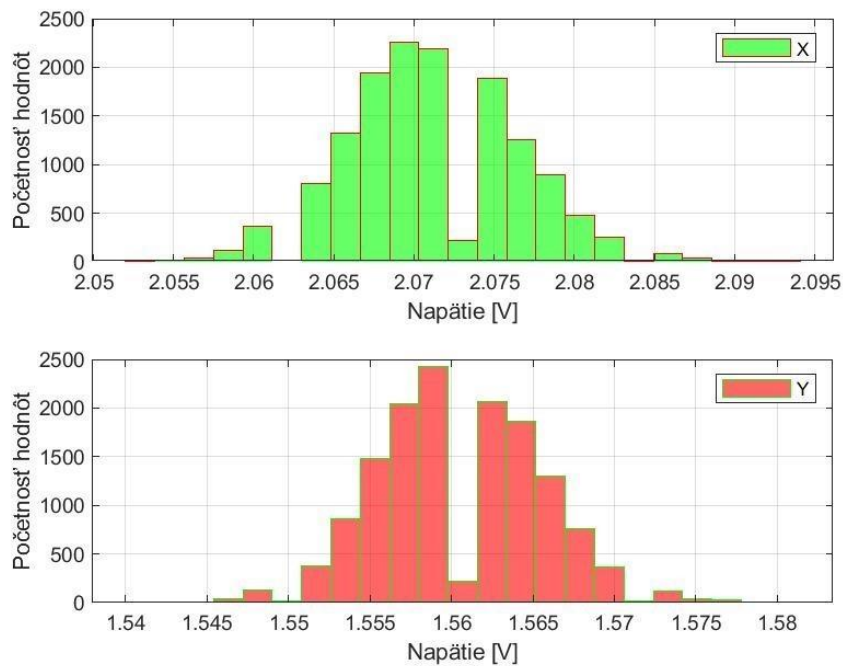
Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g:



Graf 6 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 1

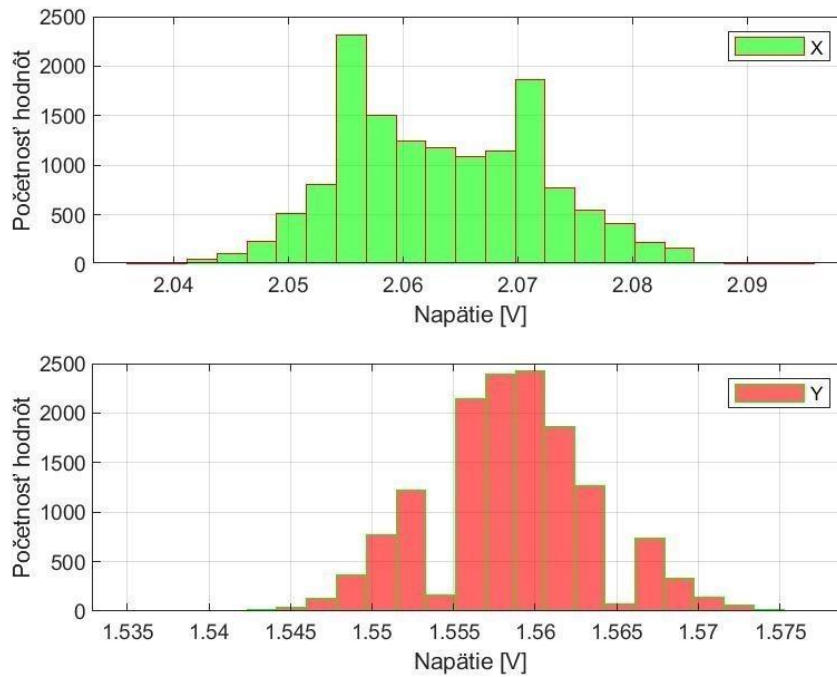
## 2. Šum pre polohu 2

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g:



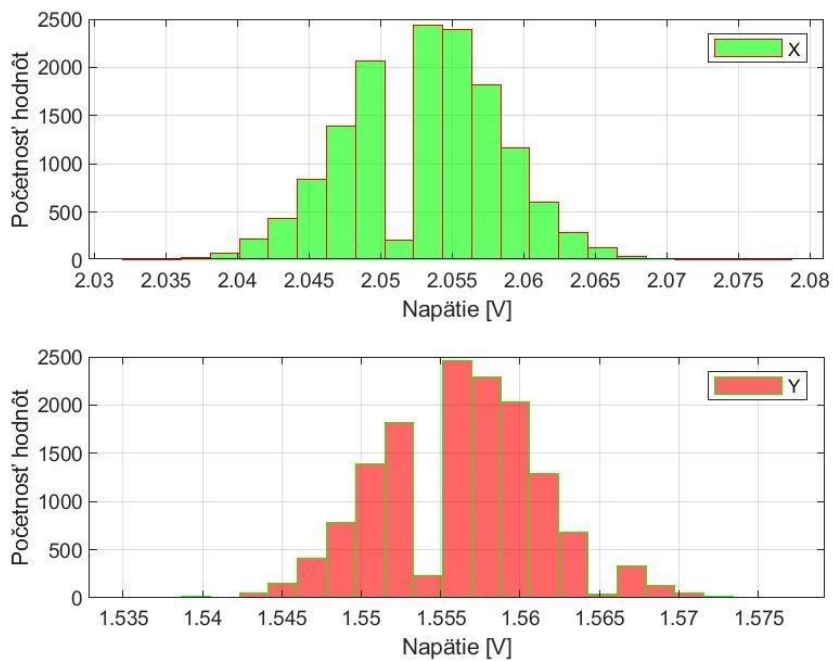
Graf 7 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 2

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g:



Graf 8 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 2

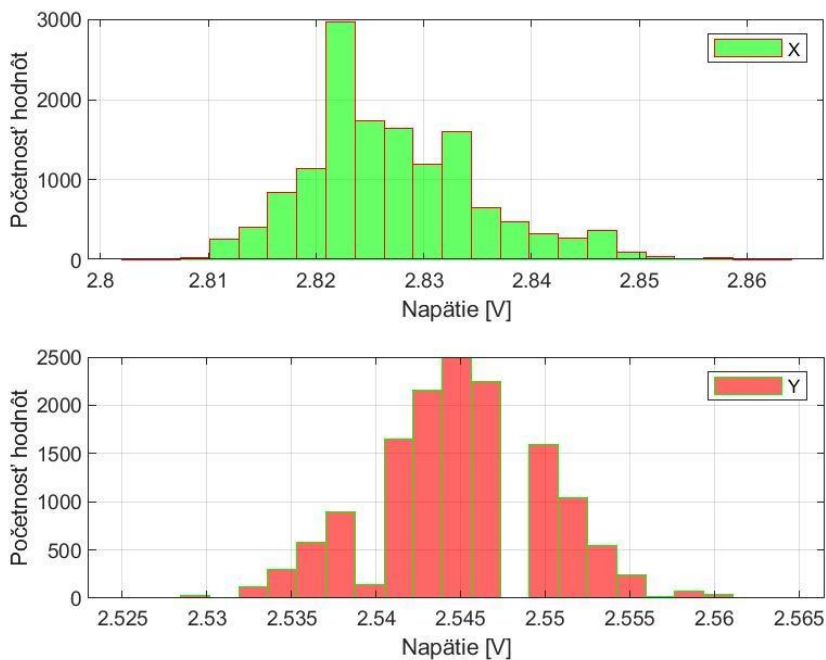
Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g:



Graf 9 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 2

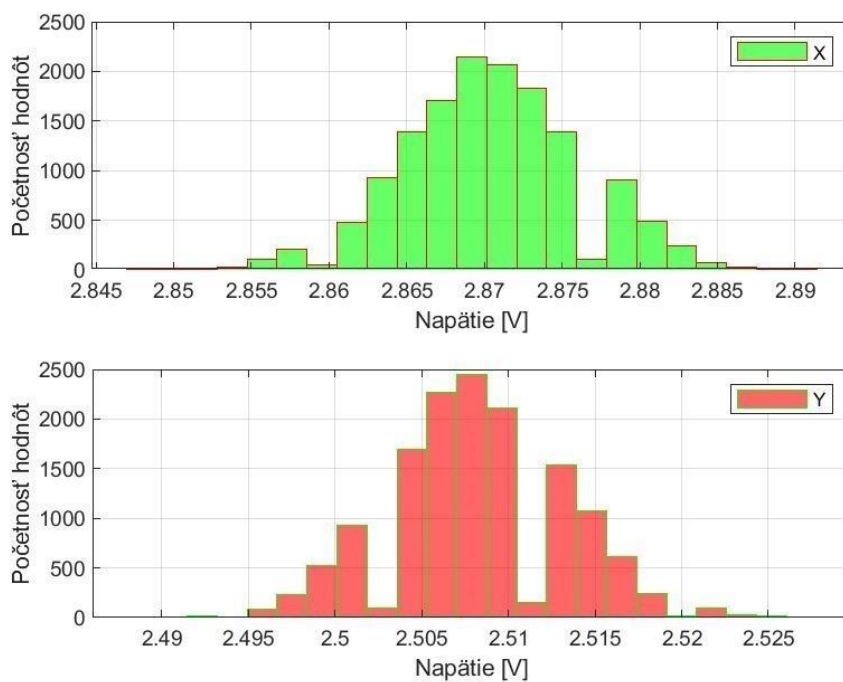
### 3. Šum pre polohu 3

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53g:



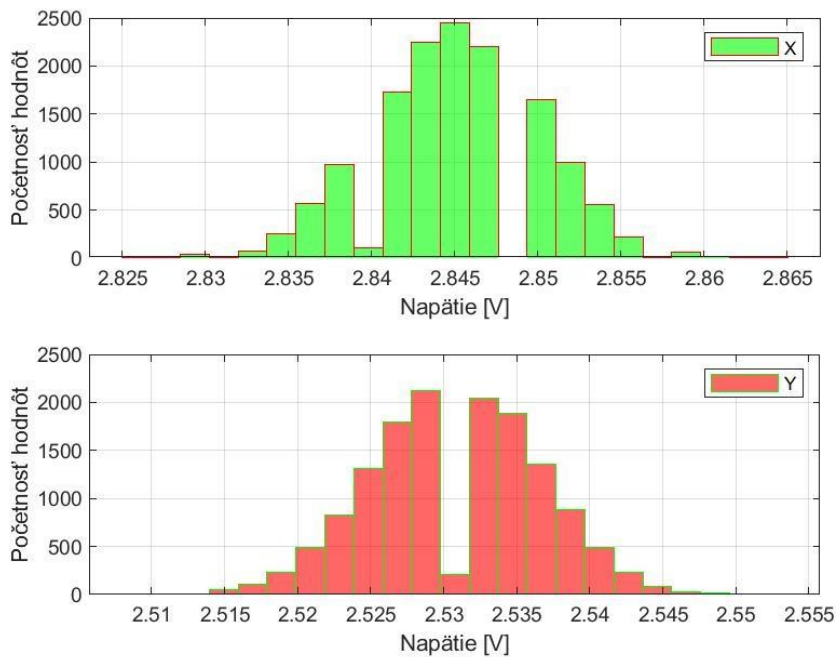
Graf 10 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 3

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g:



Graf 11 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 3

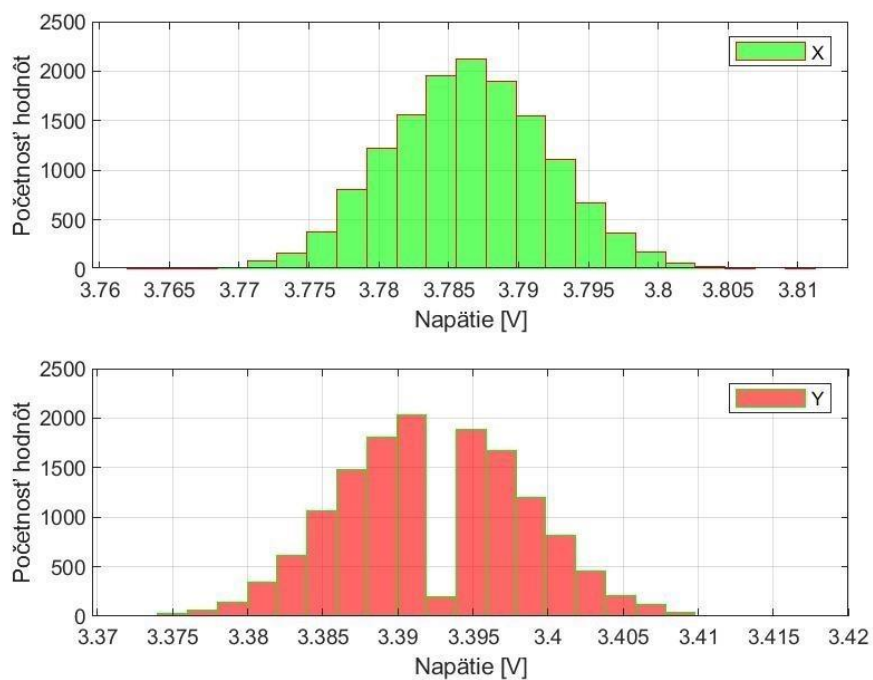
Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g:



Graf 12 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 3

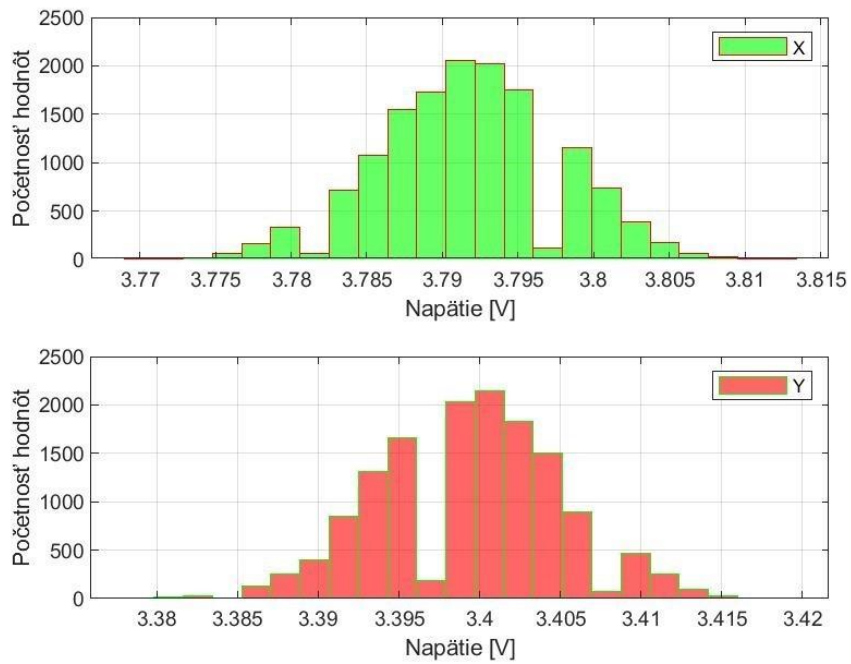
#### 4. Šum pre polohu 4

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g:



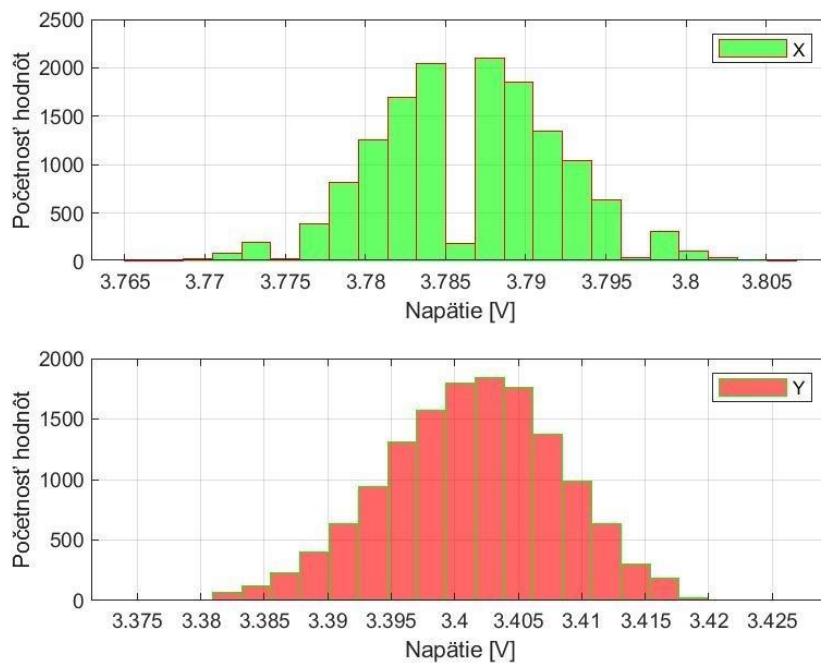
Graf 13 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 4

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g:



Graf 14 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 4

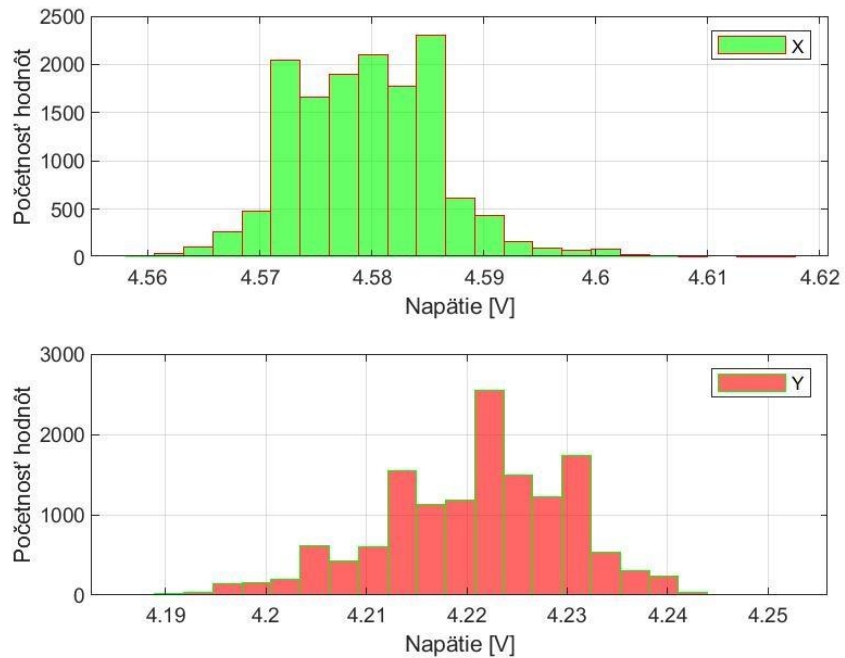
Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g:



Graf 15 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 4

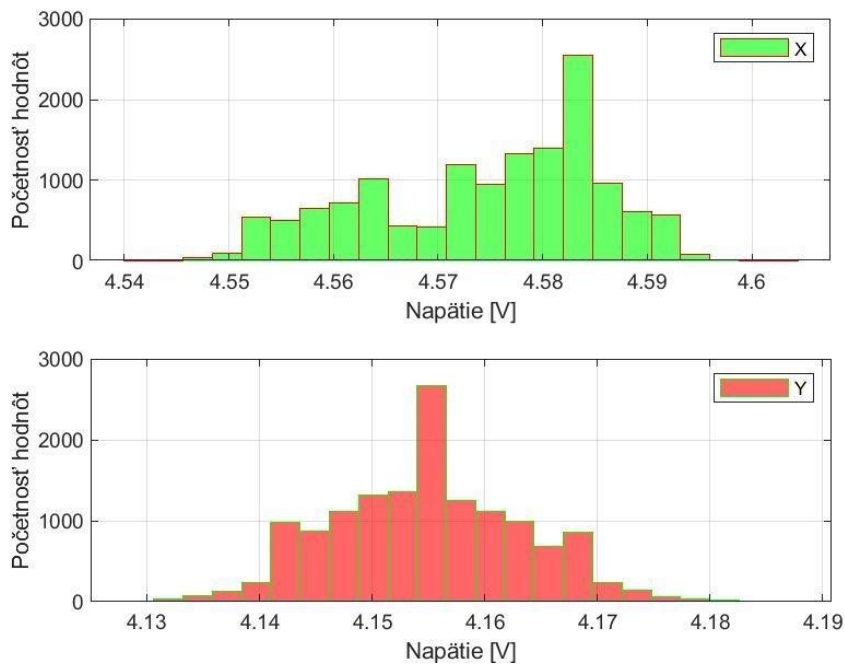
## 5. Šum pre polohu 5

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g:



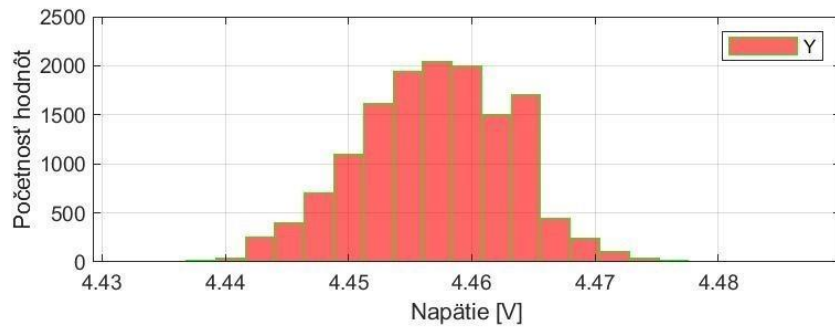
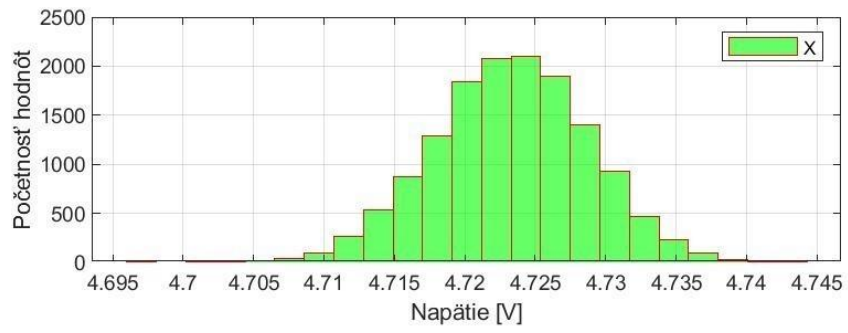
Graf 16 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 5

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g:



Graf 17 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 5

Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g:



Graf 18 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 5

## 4 Záver

Zadaním tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť zoznam použiteľných a dostupných 2D senzorov polohy, navrhnuť ovládaciu jednotku pre spracovanie signálu zo senzora a následne otestovať danú sústavu na šum, minimálnu aktivačnú silu a lineárnosť senzoru.

V prvom kroku sme vytvorili daný zoznam, pre Rezistívne a Infrared senzory, v ktorom sa nachádzajú dostupné senzory na trhu s rôznymi veľkosťami a parametrami, od spoločností: Digikey, BuyDisplay, Fujitsu, Schurter a iné. Zo zoznamu sme vybrali senzor od spoločnosti BuyDisplay, ktorý sme následne v pokračovaní práce testovali.

V druhej časti sme vytvárali ovládaciu jednotku, ktorá sníma polohu predmetu na senzore a privádza ho na výstupné svorky, ktorých hodnota napätia reprezentuje polohu predmetu na senzore. Po otestovaní sme zistili, že ovládacia jednotka privedie na výstup novú hodnotu polohy pre jednu os každých 350  $\mu$ s, teda pracuje na frekvencii 2851 Hz. Rozsah výstupných hodnôt sa pohybuje pre X os v hodnotách od 1,358 V až po 4,726 V a pre Y os od 0,788 V po 4,472 V. Tento rozsah hodnôt je závislý od napájacieho napätia Digital-Analóg prevodníku. Z výsledku môžeme posúdiť, že pre „Real-time“ systémy, pracuje ovládacia jednotka dostatočne rýchlo. Z toho vyplýva, že táto jednotka je vhodná pre ďalší rozvoj výukových modelov.

V poslednej časti sme testovali daný senzor:

- Pri prvom teste sa zistilo, že v datasheete senzoru je uvedená minimálna aktivačná sila 50 g, ale daný senzor zvláda plynule snímať polohu už pri 40 g, okrem okrajov senzoru. Pri nižšej hmotnosti senzor sníma, avšak miestami dochádza k výpadku signálu. Absolútna minimálna hmotnosť, pri ktorej začal senzor miestami reagovať bola 23 g.
- Druhý test bol zameraný na lineárnosť senzoru. Po otestovaní s uvedenou hornou hranicou minimálnej aktivačnej sily vyšla lineárnosť senzoru  $\pm 5,37\%$ . V datasheete senzoru je písaná lineárnosť  $\leq 1,5\%$ . Malá odchýlka mohla nastať pri nesprávnom meraní, avšak rozdiel týchto dvoch hodnôt je pomerne veľký, preto môžeme prehlásiť, že daný senzor nespĺňa predpísanú lineárnosť.
- Tretím testom bol zmeraný šum senzora. Ako môžeme vidieť z výsledných grafov:
  - Pri nezaťaženom senzore je výsledný signál do značnej miery rozšumený a namerané hodnoty nezodpovedajú hodnotám z geometrického stredu senzora
  - Pri minimálnej aktivačnej sile má šum senzora pomerne presné Gaussovo rozdelenie
  - Pri zaťažujúcej hmotnosti 53 g poloha 1,5 a 80g poloha 5 (tieto polohy predstavujú kraje senzora), je rozloženie šumu značne nerovnomerné, čo môže mať za následok nepresnú reguláciu, avšak tieto polohy sú hraničné a menej využívané
  - Pri ostatných meraniach má šum relatívne presné Gaussovo rozloženie, pričom vhodným spracovaním výsledného signálu môžeme dosiahnuť vysokú presnosť a kvalitu polohy predmetu

Z týchto meraní plynie, že senzor ma postačujúce vlastnosti pre ďalšiu prácu a rozvoj výukových modelov.

## 5 Referencie

- [1] Microchip Technology Inc. [online katalógový list]. PIC18(L)F2526K83. ©2020 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC18\(L\)F2526K83-Data-Sheet-DS40001943C.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC18(L)F2526K83-Data-Sheet-DS40001943C.pdf)
- [2] Texas Instruments Inc. [online katalógový list]. ADS7843-Q1. ©2012 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads7843-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1620400103651&ref\\_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads7843-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1620400103651&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F)
- [3] ] Microchip Technology Inc. [online katalógový list]. MCP48FEB22-E/UN. ©2015 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005429B.pdf>
- [4] ZÁHLAVA, V. Návrh a konstrukce plošných spojů. Vydavatelství BEN, 2011.
- [5] Microchip Technology Inc. [online katalógový list].MCP1703. ©2011 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22049f.pdf>
- [6] Texas Instruments Inc. [online katalógový list]. TL431, TL432. ©2004 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1620360409766&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.cn%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1620360409766&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.cn%252F)
- [7] OKAWA Electric Design [online výpočtový program]. RC Low-pass Filter Design Tool. ©2004 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z : <http://sim.okawa-denshi.jp/en/CRlowkeisan.htm>
- [8] Faytech Co. [online videozáznam]. Faytech SAW, Infrared, Resistive and Capacitive Touch Panel Information. ©2013 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=G-iWjOmc-24&ab\\_channel=faytechTouchDevices](https://www.youtube.com/watch?v=G-iWjOmc-24&ab_channel=faytechTouchDevices)
- [9] Automatizácia365 [online]. Prehľad dotykových technológií v priemyselnom prostredí . ©2020 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: <https://www.automatizacia365.sk/2020/06/29/prehľad-dotykovych-technologii-v-priemyselnom-prostredi/>
- [10] BuyDisplay [online]. ©2019 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: <https://www.buydisplay.com/8-inch-4-wire-resistive-touch-screen-panel-1>
- [11] EMBEDDS [online]. ©2013 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: <https://embedds.com/serial-peripheral-interface-in-avr-microcontrollers/>
- [12] DESIGNSPARK [online]. ©2020 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: <https://www.rs-online.com/designspark/using-the-analog-discovery-to-debug-digital-logic>

[13] Premier Farnell Limited [online]. ©2021 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z:  
<https://fr.farnell.com/en-FR/microchip/pic18f25k83-i-ss/mcu-8-bits-64mhz-ssop-28/dp/3634573>

[14] Mouser Electronics, Inc. [online]. ©2018 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z:  
<https://cz.mouser.com/new/microchip/microchip-mplab-pickit-4/>

[15] RS Components Ltd. [online]. ©2020 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z:  
<https://bh.rsdelivers.com/product/microchip/mcp48feb22-e/un/microchip-mcp48feb22-e/un-2-channel-dac-10-pin-msop/1460328>

[16] DMC Co., Ltd., Touch Screen Museum. [online článok]. Surface Acoustic Wave. ©2004 [cit. 21.5.2021]. Dostupné z:  
<https://www.dmccoltd.com/english/museum/touchscreens/technologies/AcousticWave.aspx>

## 6 Zoznam Obrázkov

Obrázok 1 Princíp fungovania rezistívneho senzora [9].....	10
Obrázok 2 Princíp fungovania „surface capacitive“ senzora [9].....	11
Obrázok 3 Princíp fungovania „projected capacitive“ senzora [9].....	12
Obrázok 4 Princíp fungovania „SAW“ senzora [9].....	12
Obrázok 5 Princíp fungovania infračerveného senzora [9] .....	13
Obrázok 6 Použitý rezistívny 2D senzor polohy [10].....	15
Obrázok 7 Zapojenie komponentov pri SPI komunikácií [11].....	15
Obrázok 8 Časový priebeh SPI komunikácie [12].....	16
Obrázok 9 Bloková schéma zapojenia ovládacej jednotky .....	16
Obrázok 10 Touch Screen kontrolér ADS7843IDBQRQ1 [2].....	17
Obrázok 11 Osem inicializačných bitov pre čip [2] .....	17
Obrázok 12 Časový priebeh 16 bitovej komunikácie s čipom [2].....	18
Obrázok 13 13 Digitál-Analóg prevodník MCP48FEB22-E/UN [15] .....	19
Obrázok 14 Časový priebeh 24 bitovej komunikácie s Digital-Analog prevodníkom [3] .....	19
Obrázok 15 24-bitová komunikácia Digital-Analog prevodníku [3].....	19
Obrázok 16 Procesor PIC18LF25K83-I/SO [13] .....	20
Obrázok 17 Programátor PICkit 4 [14].....	20
Obrázok 18 Fotografia plošného spoja .....	21
Obrázok 19 Navrhnutý RC filter .....	22
Obrázok 20 Fotografia ovládacej jednotky.....	22
Obrázok 21 Nameraná digitálna SPI komunikácia v ovládacej jednotke.....	24
Obrázok 22 Rozmiestnenie meraných polôh na senzore [10] .....	25
Obrázok 23 Ukážka merania signálu .....	26

## 7 Zoznam Grafov

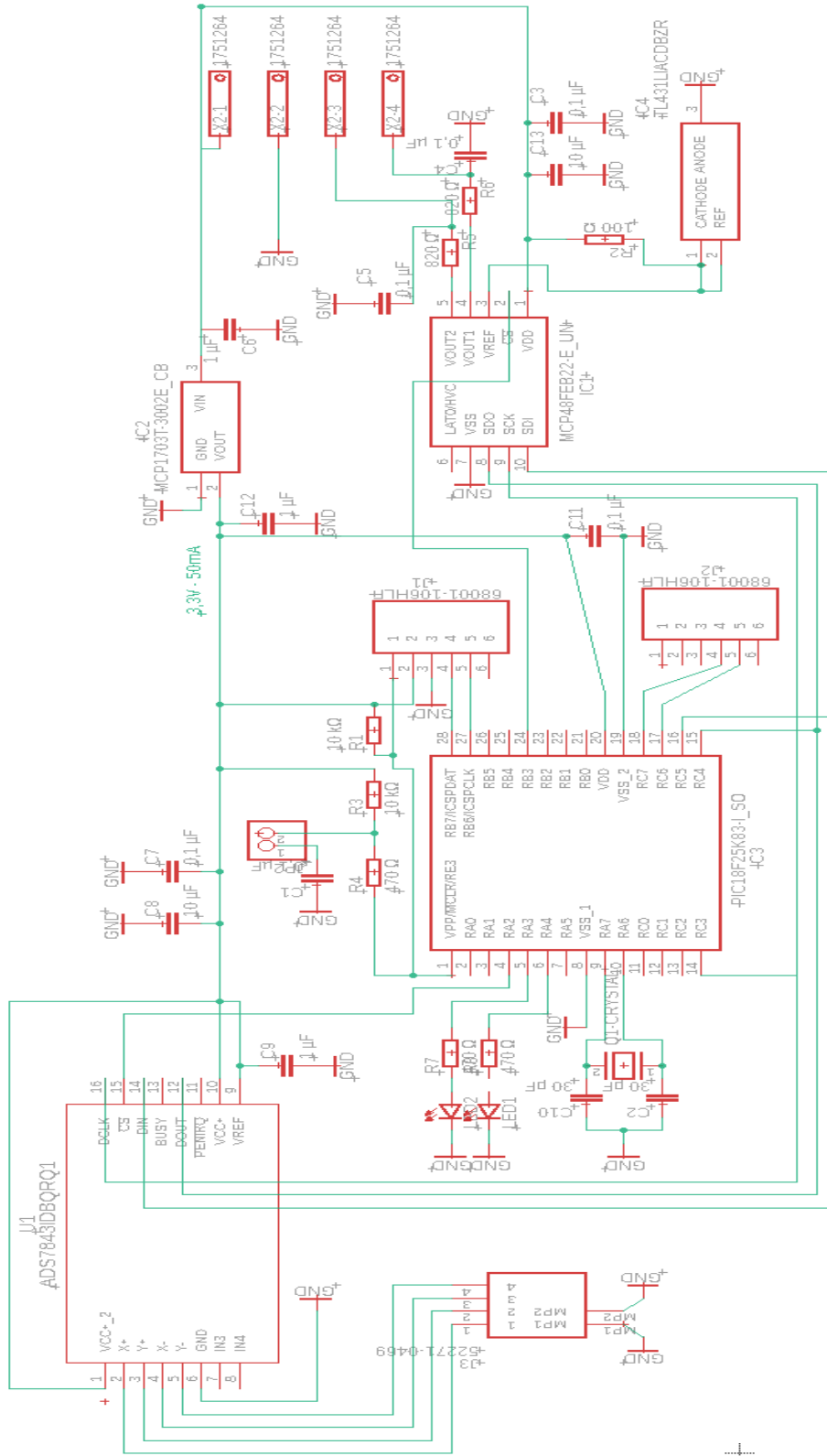
Graf 1 Lineárna závislosť senzora .....	27
Graf 2 Rozloženie šumu pre nezaťažovaný stav senzora .....	28
Graf 3 Rozloženie šumu pre minimálnu zaťažovaciu hmotnosť .....	28
Graf 4 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 1 .....	29
Graf 5 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 1 .....	29
Graf 6 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 1 .....	30
Graf 7 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 2 .....	30
Graf 8 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 2 .....	31
Graf 9 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 2 .....	31
Graf 10 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 3 .....	32
Graf 11 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 3 .....	32
Graf 12 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 3 .....	33
Graf 13 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 4 .....	33
Graf 14 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 4 .....	34
Graf 15 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 4 .....	34
Graf 16 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 53 g v polohe 5 .....	35
Graf 17 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 80 g v polohe 5 .....	35
Graf 18 Rozloženie šumu pre zaťažovaciu hmotnosť 110 g v polohe 5 .....	36

## 8 Zoznam elektronických príloh

- Zoznam vyhľadaných senzorov
- Obrázok schémy ovládacej jednotky
- Obrázok schémy plošných spojov
- Technické dokumentácie EAGLE ovládacej jednotky
- Funkcia v programe MPLAB pre spracovanie nameraných dát
- Namerané dáta záverečných testov

# Príloha 1

Schéma zapojenia ovládacej jednotky



## Príloha 2

Program z aplikácie MATLAB pre spracovanie nameraných dát

```
Editor - C:\Users\Brisu\Desktop\Bakalarka\Prilohy\MATLAB\Spracovanie_dat.m
Spracovanie_dat.m x +
1 - close all, clear all, clc
2
3 - data = importdata ('110g_pol3.txt');
4 - dl = length (data) - 1;
5 - X = zeros (2,1);
6 - Y = zeros (2,1);
7 - ix = 1;
8 - iy = 1;
9 - Vx = 0;
10 - Vy = 0;
11 - pocet_x = 0;
12 - pocet_y = 0;
13 - msg = 'Error';
14 - for riadok = 1:dl
15
16 -     if data(riadok,5) == 1
17 -         Vy = Vy + data(riadok,3);
18 -         Vx = Vx + data(riadok,2);
19 -         pocet_x = pocet_x + 1 ;
20 -         pocet_y = pocet_y + 1;
21 -         if data(riadok + 1,4) < data(riadok,4)
22 -             Y(iy,1) = Vy / pocet_y;
23 -             iy = iy + 1;
24 -             pocet_y = 0;
25 -             Vy = 0;
26 -         end
27
28 -     elseif data(riadok,5) == 0
29 -         Vx = Vx + data(riadok,2);
30 -         Vy = Vy + data(riadok,3);
31 -         pocet_x = pocet_x + 1;
32 -         pocet_y = pocet_y + 1;
33 -         if data(riadok + 1,4) < data(riadok,4)
34 -             X(ix,1) = Vx / pocet_x;
35 -             ix = ix + 1;
36 -             pocet_x = 0;
37 -             Vx = 0;
38 -         end
39
40 -     else
41 -         error (msg)
42 -     end
43
44 - end
45 - figure1 = figure;
46 - subplot(2,1,1);
47 - His1 = histogram(X,...
48 -     'Parent',figure1,...
49 -     'NumBins',23,...
50 -     'EdgeColor',[1 0 0],...
51 -     'FaceColor',[0 1 0]);
52 - xlabel('Napätie [V]');
53 - ylabel('Početnosť hodnôt');
54 - legend('X');
55 - hold on;
56 - grid on;
57 - subplot(2,1,2);
58 - His2 = histogram(Y,...
59 -     'Parent',figure1,...
60 -     'NumBins',23,...
61 -     'EdgeColor',[0 1 0],...
62 -     'FaceColor',[1 0 0]);
63 - xlabel('Napätie [V]');
64 - ylabel('Početnosť hodnôt');
65 - legend('Y');
66 - grid on;
67
68 - saveas(figure1,'110g_pol3.jpg');
```

