

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Petr Šedo

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**ŘÍDICÍ JEDNOTKA MODELU BALL AND BEAM**

Petr Šedo

Diplomová práce

2020

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla / uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Šedo**  
Osobní číslo: **I17195**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Téma práce: **Řídicí jednotka modelu Bull and beam**  
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

### Zásady pro vypracování

Cíl:

Mechanickou část modelu doplnit o další měření polohy kuličky, ovládací panel s LCD zobrazovačem a řídicí jednotku na bázi Arduina. Vytvořit programové vybavení obsahující regulátor polohy kuličky typu PID s funkcí autotuning, zobrazování a komunikaci přes sériovou linku.

Teoretická část:

hardwarové a softwarové možnosti platformy Arduino  
měření vzdálenosti ultrazvukovými a optickými čidly  
diskrétní PSD regulátor  
automatické nastavení parametrů PID regulátoru (autotuning)

Praktická část:

vybrat desku z platformy Arduino a vhodný způsob měření polohy kuličky  
navrhnout a realizovat konstrukční řešení včetně ovládacího panelu  
vytvořit programové vybavení řídicí jednotky

Rozsah pracovní zprávy: **40-50 stran**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004, 663 s. ISBN 80-730-0148-9.  
ASTROM, Karl J. a Tore HAGGLUND. PID controllers. 2nd ed. Research Triangle Park, N.C.: International Society for Measurement and Control, c1995. ISBN 1-55617-516-7.  
ARDUINO. Getting Started with Arduino [online]. 2018 [cit. 2018-08-28]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. František Dušek, CSc.**  
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2018**  
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**



L.S.

---

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Daniel Honc, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 6. listopadu 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Bc. Petr Šedo

### **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Františku Duškovi, CSc. za odborné vedení mojí diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem ostatním pedagogům, kteří se podělili o své drahocenné znalosti. Děkuji také své rodině, která mě podporovala po celý průběh studia.

V Pardubicích dne

Bc. Petr Šedo

## **ANOTACE**

*Tato práce se zabývá rekonstrukcí Ball and Beam jako ukázkového materiálu pro dny otevřených dveří a jako učební pomůcky. Nalezení vhodnějšího způsobu určování polohy kuličky a přidání autotuningu.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

PID, regulátor, Arduino, měření polohy

## **TITLE**

*CONTROL UNIT OF BALL AND BEAM*

## **ANNOTATION**

*This work deals with the reconstruction of Ball and Beam as a sample material for open days and as teaching aids. Finding a more convenient way to determine the position of the ball and add autotuning.*

## **KEYWORDS**

*PID, Regulator, Arduino, Position measurement*

## OBSAH

Seznam zkratk a značek.....	10
Seznam ilustrací .....	11
Seznam tabulek.....	13
ÚVOD .....	14
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	16
1.1 Výběr nové metody měření polohy .....	16
1.1.1 Snímání polohy pomocí kamery.....	16
1.1.2 Snímání polohy pomocí ultrazvuku .....	17
1.1.3 Snímání polohy pomocí laseru.....	19
1.1.4 Snímání polohy pomocí vodivého laku.....	22
1.1.5 Snímání polohy pomocí vodivé gumy.....	22
1.2 Řídící elektronika .....	22
1.3 Arduino.....	23
1.3.1 Desky.....	23
1.3.2 Shieldy a periferie .....	25
1.4 Servomotor a servo signál .....	27
1.5 Nový software .....	29
1.6 PID.....	29
1.7 PSD.....	30
1.8 Nastavování PID – autotuning .....	33
1.8.1 Odhad parametrů z přechodové funkce.....	34
1.8.2 Relé ve zpětné vazbě .....	36
1.8.3 Výpočet parametrů metodou Zieglera a Nicholse.....	38
1.8.4 Implementace .....	39
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	40



2.1	Výběr procesoru a periférií.....	40
2.2	Popis programu.....	41
2.3	Návrhy DPS.....	43
2.4	Modelování a tisk 3D komponent .....	44
2.5	Elektrické zapojení .....	47
2.6	Komunikace.....	47
2.7	Ovládání .....	48
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	50
3.1	Laserové snímače .....	50
3.2	Odporová dráha .....	51
3.3	Vodivé laky .....	51
3.4	Vodivá guma .....	51
3.5	Naměřené hodnoty .....	52
3.6	Nastavení a testování PID regulátoru .....	54
3.7	Autotuning – Relé ve zpětné vazbě.....	54
3.7.1	Odporová dráha .....	54
3.7.2	Vodivá guma .....	56
4	ZÁVĚR.....	57
	LITERATURA.....	58
	PŘÍLOHY.....	10

## **SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK**

DPS	Deska plošného spoje
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
PID	proportional–integral–derivative controller
PWM	Pulse-width modulation

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 - Původní řešení zařízení – boční pohled .....	14
Obrázek 1.2 - Současné řešení zařízení – vrchní pohled .....	14
Obrázek 1.3 - Přepravní box na zařízení .....	15
Obrázek 1.4 - Blokové schéma s kamerou .....	17
Obrázek 1.5 - Princip ultrazvukového snímače .....	18
Obrázek 1.6 - Ultrazvukový detektor .....	19
Obrázek 1.7 - Princip laserového čidla .....	20
Obrázek 1.8 - Princip triangulačního čidla .....	21
Obrázek 1.9 - Blokové schéma zařízení .....	23
Obrázek 1.10 - Arduino Mini (ARDUINO, 2018) .....	24
Obrázek 1.11 - Arduino UNO (ARDUINO, 2018) .....	24
Obrázek 1.12 - Arduino MEGA a Arduino Due (ARDUINO, 2018) .....	25
Obrázek 1.13 - Arduino Multifunctional Expansion Board Shield (ARDUINO, 2018)....	26
Obrázek 1.14 – LCD displej (ARDUINO, 2018) .....	27
Obrázek 1.15 - Servomotor Futaba FP-S148 (OSCAR, 2013).....	28
Obrázek 1.16- Natáčení modelářského serva pomocí servo signálem (OSCAR, 2013) ...	28
Obrázek 1.17 - Blokové schéma PID (LAZARIDIS, 2011) .....	29
Obrázek 1.18 - Blokové schéma PSD regulátoru (LAZARIDIS, 2011) .....	33
Obrázek 1.19 - Přechodová charakteristika soustavy prvního řádu (LAZARIDIS, 2011).	35
Obrázek 1.20 - Přechodová charakteristika soustavy druhého řádu (LAZARIDIS, 2011)	35
Obrázek 1.21- Relé ve zpětné vazbě (LAZARIDIS, 2011) .....	37
Obrázek 1.22 - Průběhy relé ve zpětné vazbě (LAZARIDIS, 2011) .....	37
Obrázek 2.1 - GP2Y0E02A (SHARP CORPORATION,2011) .....	40
Obrázek 2.2 - Výstupní signál GP2Y0E02A (SHARP CORPORATION, 2011) .....	41
Obrázek 2.3 - Vývojový diagram programu .....	42

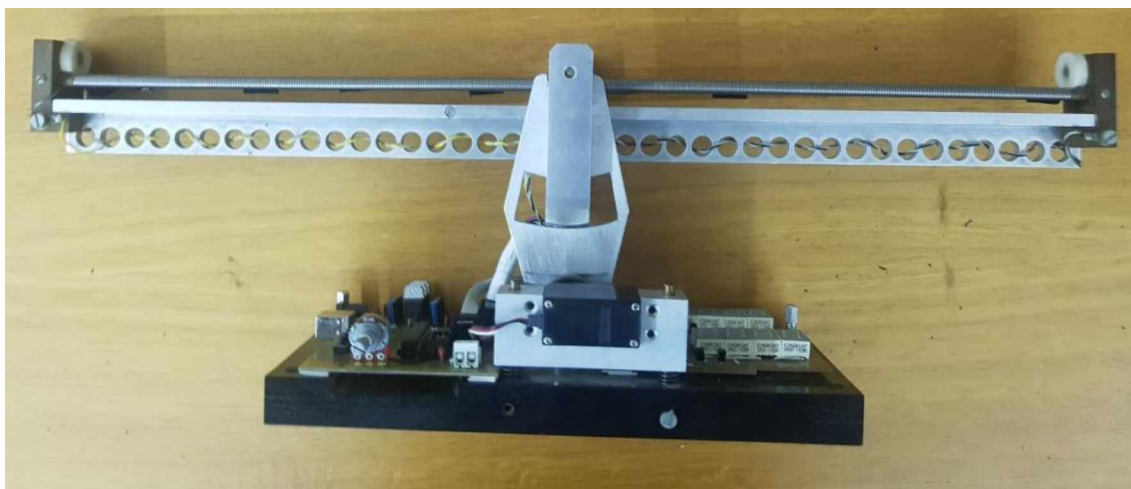
Obrázek 2.4 - 3D model DPS – podstavec .....	43
Obrázek 2.5 - 3D model DPS – ovladač .....	44
Obrázek 2.6 - Dozaz lineárního vedení .....	45
Obrázek 2.7 - Vrchní část ovladače .....	46
Obrázek 2.8 - Spodní část ovladače .....	46
Obrázek 2.9 - Schéma zapojení .....	47
Obrázek 2.10 - Popis ovladače .....	49
Obrázek 3.1 - Odraz laseru od kuličky .....	50
Obrázek 3.2 - Podpora vedení vodivé gumy .....	52
Obrázek 3.3 - Měření velké kuličky .....	53
Obrázek 3.4 - Měření malé kuličky .....	54
Obrázek 3.5 - Prohnutí lineárního vedení .....	55
Obrázek 3.6 - Relé ve zpětné vazbě na odporovém drátu .....	55
Obrázek 3.7 - Relé ve zpětné vazbě na vodivé gumě .....	56

## SEZNAM TABULEK

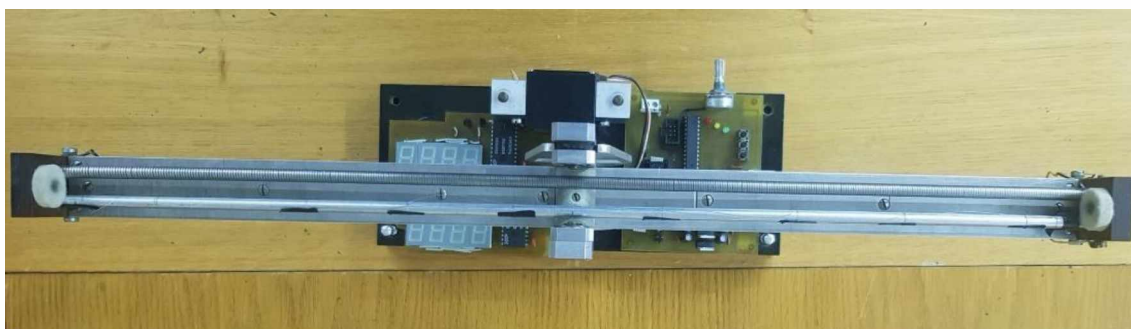
Tabulka 1.1 - Výpočet konstant PID regulátoru pomocí Zieglera a Nicholse z přechodové charakteristiky .....	38
Tabulka 1.2 - Výpočet konstant PID regulátoru pomocí Zieglera a Nicholse pro kritické zesílení a periodu .....	39
Tabulka 2.1 - soupis odesílaných informací .....	48
Tabulka 2.2 - soupis přijímaných instrukcí .....	48

## ÚVOD

Současné řešení laboratorního zařízení Ball and Beam bylo realizováno pomocí starší elektroniky, od které již není žádná dokumentace. Jakákoliv úprava z hlediska software tedy není možná. Zařízení již ani nepracuje správně a tím je jeho používání nemožné. Měření polohy železné kuličky se provádělo pomocí odporového drátu, který je namotán po celé délce jedné z kolejnic lineárního vedení. Druhá kolejnice je z vodivého materiálu a kulička, která se kutálí mezi těmito dvěma kolejnicemi, slouží jako jezdec a tím mění poměr odporů. Jedná se vlastně o napěťový dělič. S lineárním vedením, které je uchyceno v konstrukci na dvou ložiskách, pohybovalo modelářské servo. Zobrazování některých údajů bylo realizováno pomocí segmentového displeje. Na obrázku 1.1 a na obrázku 1.2 si můžeme prohlédnout stav zařízení před rekonstrukcí.



Obrázek 1.1 - Původní řešení zařízení – boční pohled



Obrázek 1.2 - Současné řešení zařízení – vrchní pohled

Důvodem modifikace zařízení je umožnit jeho využití jak pro výuku měření a řízení, tak i jako demonstrační zařízení pro propagaci automatizace např. na dnech otevřených dveří. Z tohoto důvodu řídicí jednotka bude muset umožňovat nastavování parametrů regulace, aby bylo možné si na této soustavě procvičit nastavování PID regulátoru. O zobrazování informací by se měl starat přehledný displej, který dovolí uživateli přehledně obsluhovat celé zařízení. V rámci pohodlného používání by ovládací prvek měl být samostatný, nikoliv pevně ukotven na konstrukci zařízení. Další modifikace má spočívat v prozkoumání nového způsobu měření polohy, které by se přidalo k současné odporové dráze. Důležitý parametr modifikace je zachování současných rozměrů z důvodu přepravního boxu, do kterého se musí celé zařízení bez složité montáže a demontáže jednoduše složit, popřípadě rozložit. Přepravní box je vidět na obrázku 1.3. Jako další modifikace je příprava sériového rozhraní a určení protokolu pro případnou komunikaci s počítačem.



Obrázek 1.3 - Přepravní box na zařízení

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 VÝBĚR NOVÉ METODY MĚŘENÍ POLOHY

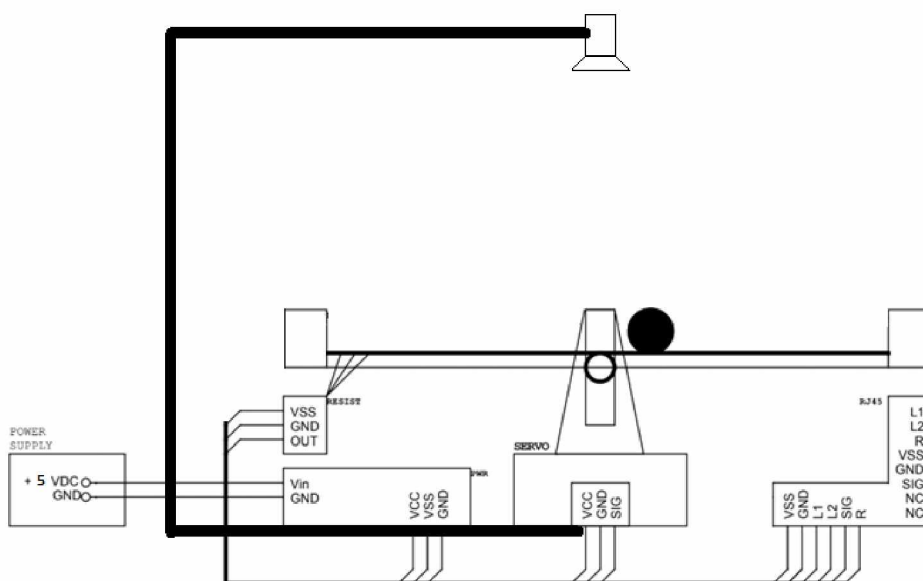
Vzhledem k nepříliš spolehlivému měření polohy kuličky pomocí odporové dráhy byly zjišťovány další možnosti měření polohy. Pro dané zařízení byly vytipovány tři možné typy měření.

### 1.1.1 Snímání polohy pomocí kamery

Vzhledem k tvaru a vlastnostem soustavy by bylo zapotřebí umístit kameru nad lineární vedení a umožnit pohled na kuličku shora. Umístění kamery by tak muselo být realizováno pomocí podpůrného rámu, který by držel kameru na předem definovaném místě. Konstrukce rámu a jeho přeprava by byla složitá, stejně jako vyhodnocování obrazového záznamu. Kovová kulička má podobnou barvu jako celý rám a splývala by s konstrukcí. Obrázek 1.4 naznačuje potřebnou polohu kamery a z ní potřebný držák, který by byl složitý a nemožný lehce přepravovat v původním boxu. Obarvení kuličky kontrastní barvou není možné z důvodu ztráty vodivosti a tím zamezení původního měření odporovou drahou, která má zůstat zachována. Výpočetní výkon, potřebný k vyhodnocování obrazového záznamu je taky mnohem vyšší a pravděpodobně by si mikroprocesor s touto aplikací neporadil. Bylo by zapotřebí použít jiný hardware jako například Raspberry Pi.

Z těchto důvodů se měření polohy pomocí kamery zdá pro tuto aplikaci nevhodné, a proto nebude použito.





Obrázek 1.4 - Blokové schéma s kamerou

### 1.1.2 Snímání polohy pomocí ultrazvuku

Ultrazvukový senzor funguje na měření rozdílu časů mezi odeslaným akustickým signálem a přijmutím jeho odrazu. Vzdálenost je vyjádřena vztahem

$$l = \frac{t_2 - t_1}{2 \cdot v_z}, \quad (1.1)$$

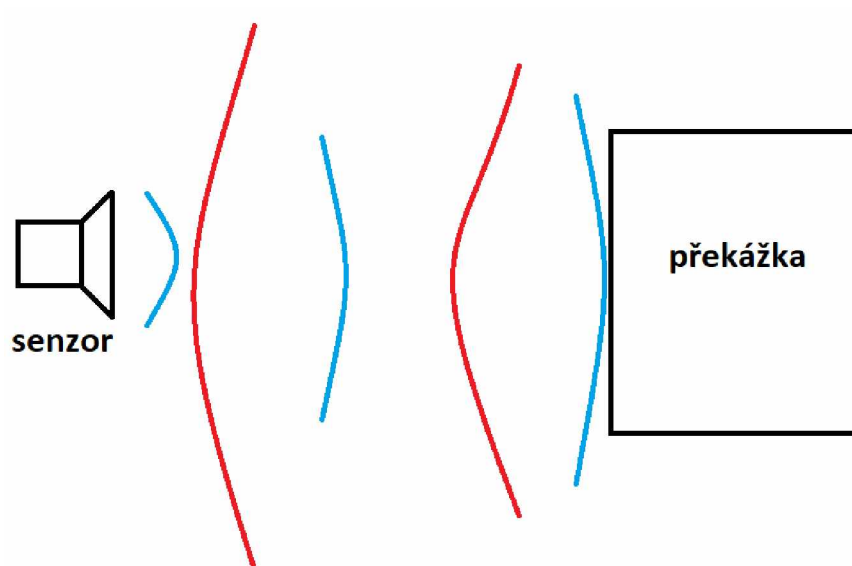
kde  $l$  – vzdálenost od čidla, m,

$t_1$  – čas vyslání akustického signálu, s,

$t_2$  – čas příchodu odraženého akustického signálu, s,

$v_z$  – rychlost zvuku,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Rychlost šíření akustické vlny je zhruba  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Měření vzdálenosti 1 cm tedy trvá zhruba 6 ms. To je čas, se kterým je schopný mikroprocesor počítat. Na obrázku 1.5 je znázorněna jeho funkční podstata. Vzdálenosti pod 1 cm mají ultrazvukové snímače problém měřit, z důvodu krátkého rozdílu časů odchodu a příchodu akustické vlny.



Obrázek 1.5 - Princip ultrazvukového snímače

Ultrazvukový detektor by bylo vhodné umístit na konec dráhy do osy kuličky. Problém ultrazvukového senzoru je v jeho velkém vyzařovacím úhlu, který je kolem  $30^\circ$ . Konstrukce v prostřední části má vyvýšená místa, kde jsou zapuštěna ložiska. Od těchto míst by se mohl signál odrážet. Maximální vyzařovací úhel čidla, které je schopné měřit mezi touto konstrukcí, se spočítá pomocí rovnice

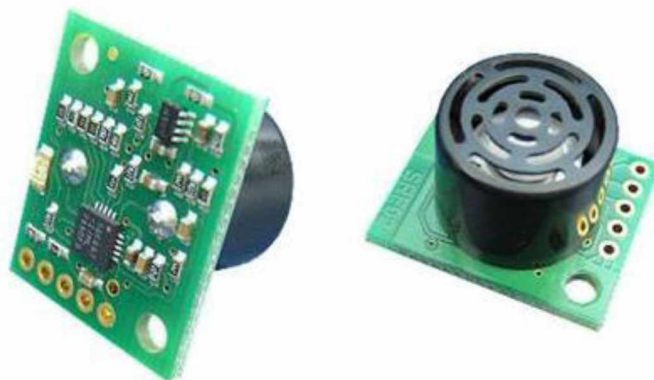
$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{d}{l}\right), \quad (1.2)$$

kde  $\beta$  – maximální vyzařovací úhel,  $^\circ$ ,

$d$  – velikost mezery mezi konstrukcí, m,

$l$  – vzdálenost čidla od mezery v konstrukci, m.

Dosažením do této rovnice zjistíme, že maximální vyzařovací úhel může být přibližně  $6,5^\circ$ , aby akustický signál prošel mezerou v konstrukci. Z toho vyplývá, že ultrazvukový detektor nebude možné pro tuto aplikaci použít. Ukázka ultrazvukového detektoru je na obrázku 1.6.



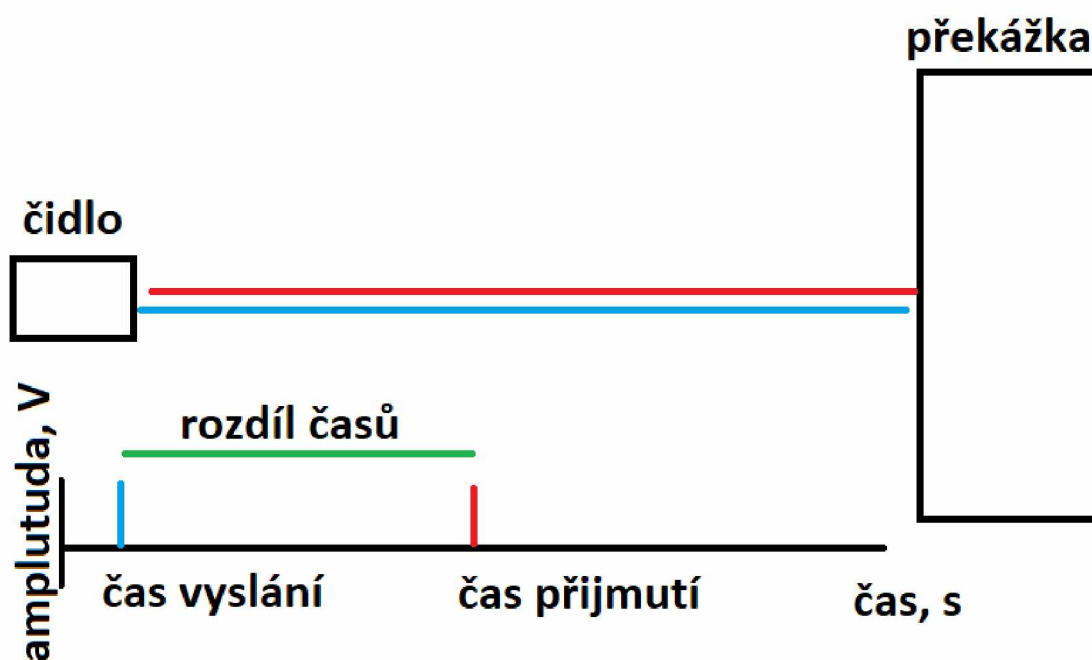
Obrázek 1.6 - Ultrazvukový detektor

### 1.1.3 Snímání polohy pomocí laseru

Laserové měřiče vzdálenosti mají vyzařovací úhel od jednotek až po desítky stupňů. Pro tuto aplikaci je zapotřebí maximální vyzařovací úhel přibližně  $6,5^\circ$ . Laserové měření vzdálenosti se dá rozdělit na dva základní typy:

- měření rozdílu časů vyslání a přijmutí odraženého světelného signálu
- triangulační metodou

Měření rozdílu časů vyslání a přijmutí odraženého světelného signálu funguje na stejném principu jako ultrazvukový senzor. Hlavní rozdíl je v měřeném signálu. V tomto případě neměříme akustickou vlnu, ale světelný paprsek. Problém nastává při malých vzdálenostech, jelikož rychlost světla je zhruba  $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z toho vyplývá, že rozdíl časů vyslaného a odraženého světelného paprsku na vzdálenosti 1 cm je přibližně 7 ps. Tento čas není žádným standardním procesorem měřitelný, těmto časům odpovídá kmitočet kolem 150 GHz. Tento princip je vidět na obrázku 1.7.



Obrázek 1.7 - Princip laserového čidla

Výsledná vzdálenost je dána vztahem

$$l = \frac{t_2 - t_1}{2 \cdot v_s}, \quad (1.3)$$

kde  $l$  – vzdálenost od čidla, m,

$t_1$  – čas vyslání optického signálu, s,

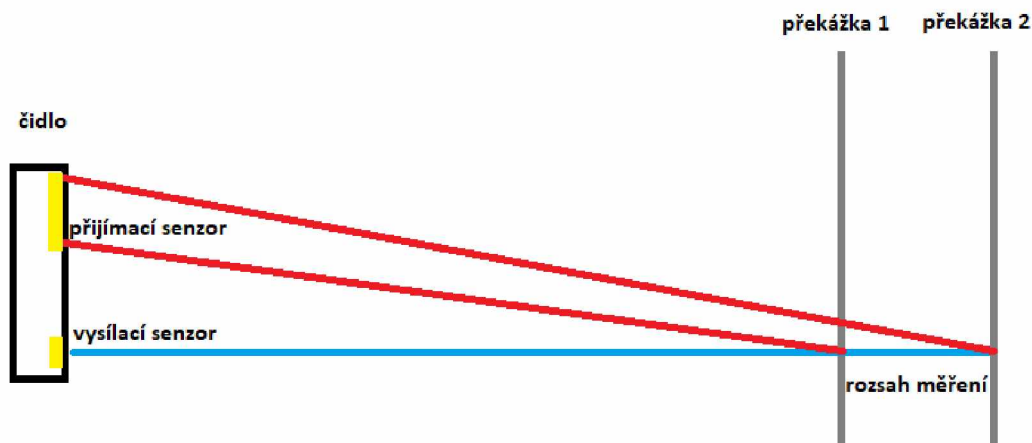
$t_2$  – čas příchodu odraženého optického signálu, s,

$v_s$  – rychlost světla,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Triangulační metoda funguje na principu měření místa dopadu odraženého světelného paprsku. Příjemací čidlo je rozděleno na intervaly a podle místa dopadu se určuje vzdálenost. Princip čidla je znázorněn na obrázku 1.8. Výhoda tohoto měření je, že čidlo nemá velké nároky na výpočetní rychlost. Nevýhodou tohoto měření je omezený rozsah měřené vzdálenosti. Takto konstruovaná čidla mají pevně dané rozsahy jako například:

- 2 – 100 mm
- 10 – 250 mm
- 0,1 – 10 m
- 0,5 – 18 m

Pro tuto aplikaci je zapotřebí měřit takřka od nulové vzdálenosti až po cca 0,5 m. Žádný z dostupných senzorů tento rozsah nenabízí. Z tohoto důvodu je vhodné využít 2 senzory naproti sobě, které dokážou měřit od malé vzdálenosti, a nedostatečný rozsah čidla kompenzuje čidlo na druhé straně.



Obrázek 1.8 - Princip triangulačního čidla

Tento princip se také využívá k měření tloušťky opticky průhledných nebo poloprůhledných materiálů. Při průchodu rozhraním se část paprsku odrazí a část projde do materiálu. Tím se na senzor vrátí z jednoho měření dva výsledky. Jedná se o začátek a konec měřeného materiálu. Po jejich odečtení získáme tloušťku měřeného opticky průhledného materiálu.

#### **1.1.4 Snímání polohy pomocí vodivého laku**

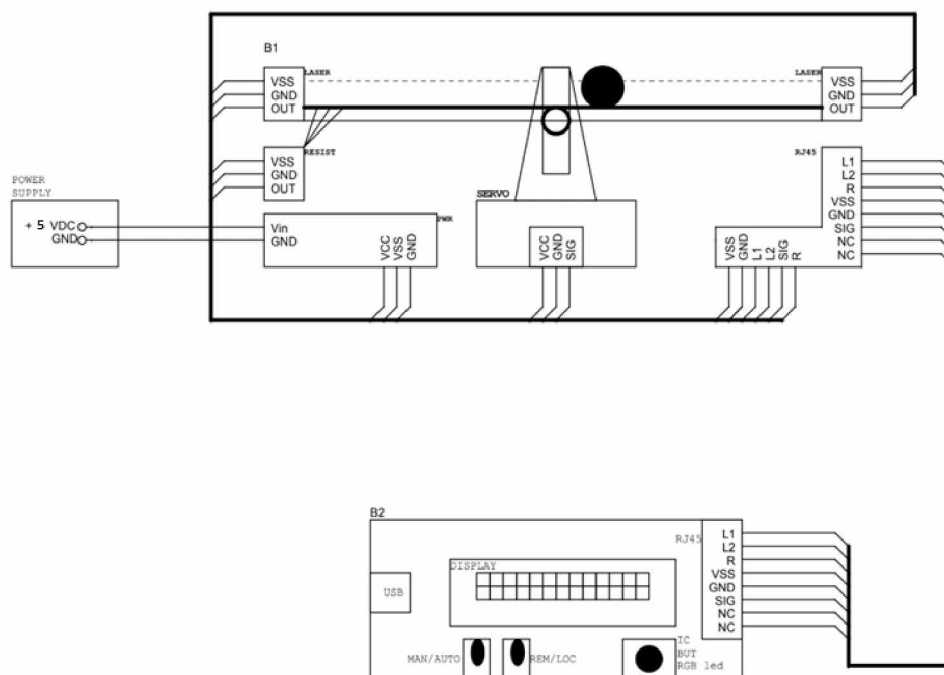
Obdoba stávající metody měření polohy, tedy pomocí děliče napětí. Výhodou této metody je rovnoměrnost a spojitost povrchu. Vodivý lak se nastříká na hladký nevodivý materiál. Vodivé laky však mohou být náchylné na opotřebování.

#### **1.1.5 Snímání polohy pomocí vodivé gumy**

Stejně tak je možné použít nevodivý materiál, na který se natáhne vodivá guma. Princip měření je tak stejný jako u stávající odporové dráhy. Výhoda je jako u vodivého laku v celosti vedení, a kulička se tedy nemá kde zasekávat.

### **1.2 ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA**

Elektronika, která se bude o řízení a ovládání zařízení starat, by měla být co nejjednodušší z důvodu bezporuchovosti a spolehlivosti. O přívod elektrické energie se bude starat konvenční napájecí zdroj, který bude připojen do konstrukce zařízení. Propojení s ovládacím panelem bude realizováno pomocí konektorů RJ45 a síťového kabelu. Důvodem použití je v případě potřeby jednoduchá výměna delšího nebo nového kabelu. Další měření polohy bude realizováno pomocí dvou laserových čidel, které budou umístěny na krajích lineární dráhy. Tato čidla se budou doplňovat v situacích, kdy se kulička dostane mimo oblast měření jednoho z čidel. Toto místo bude bezprostředně u čidla, jelikož laserové čidlo nedokáže měřit velmi krátké vzdálenosti. V ten okamžik bude mít druhé čidlo stále informaci o poloze a chod soustavy tak nebude ohrožen. Pro zobrazování informací bude použit LCD displej, na kterém bude mnoho možností a prostoru pro případné modifikace a vylepšení. Pro ovládání zařízení budou na ovladači dvě tlačítka a inkrementální čidlo. Tato kombinace je vhodná i pro sestavení menu a mnoha možností zadávání parametrů a dalších potenciálních vylepšení. Na obrázku 1.9 je znázorněno blokové schéma zařízení.

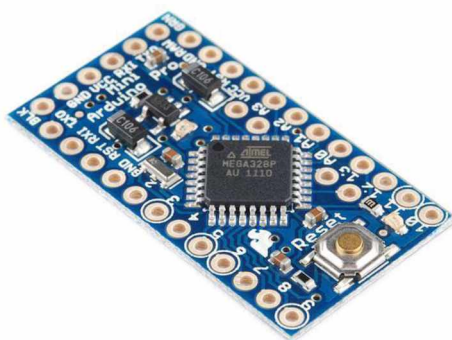


Obrázek 1.934 - Blokové schéma zařízení

## 1.3 ARDUINO

### 1.3.1 Desky

Arduino je platforma, která umožňuje jednoduché programování mikroprocesorů a jejich obsluhu. Nejčastěji se využívají osmibitové procesory ATmega od společnosti Microchip (dříve od společnosti Atmel). Arduino je projekt, který má lidem přiblížit programování a zaujmout nové lidi. Programovací jazyk Wiring, v kterém se arduino programuje, je mnohem jednodušší než jazyk C nebo C++. Důvodem je, že složité nastavování registrů procesoru je sepsáno v metodách, takže uživatel si pouze zapamatuje jednoduchou syntaxi. Technicky vzato se programovací jazyk Wiring dá považovat za propracovanou knihovnu jazyka C++. Platforma Arduino má mnoho variant. Od malých procesorů, jako je třeba na obrázku 1.10 Arduino Mini, které se hodí na jednoduché aplikace vyžadující kompaktní rozměry. Arduino Mini je osazováno procesory ATmega168P nebo ATmega328P. Tyto procesory jsou stejné až na dvojnásobnou paměť u procesoru ATmega328P, která tvoří 2 kB paměti RAM a 1 kB EEPROM. DPS procesoru není osazena USB a k programování je zapotřebí další deska, která převádí USB na sériovou linku.



Obrázek 1.10 - Arduino Mini (Arduino, 2018)

Větší deska, která již má programovací USB zabudováno v sobě, je například Arduino UNO, které je také osazeno nejčastěji procesorem firmy Microchip ATmega328P. Vývojová deska Arduino UNO má standardizovaný tvar, který umožňuje připojení velkého množství periférií, čidel ovládacích prvků a mnoho dalšího. Arduino UNO je na obrázku 1.11.

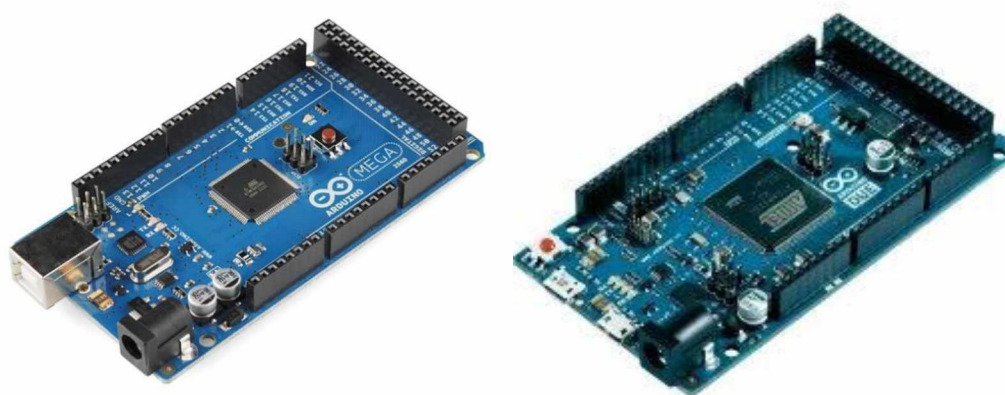


Obrázek 1.11 - Arduino UNO (Arduino, 2018)

Pro složitější aplikace, kde je zapotřebí více paměti nebo větší počet pinů, je určeno Arduino MEGA, které je osazeno procesorem Microchip ATmega2560. ATmega2560 má 256 kB flash programové paměti na program, do které se vejde i mnoho konstant, tabulek či map. Všechny tyto 8-bitové procesory pracují na frekvenci 16 MHz. Pro výpočetně složitě aplikace je vhodnější 32-bitový procesor ARM ARM® Cortex®-M3 RISC, který je osazen



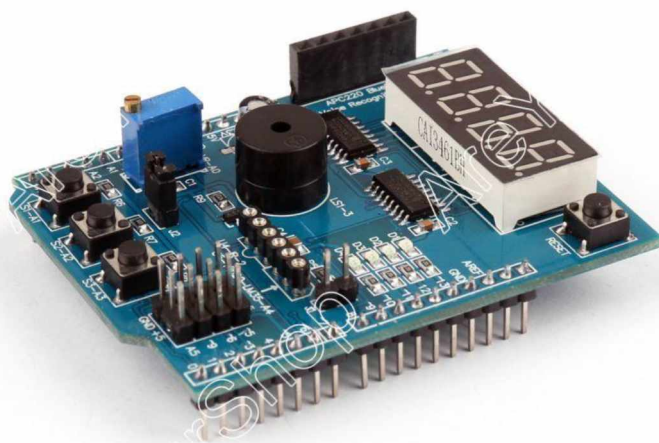
na desce Arduino Due. Jedná se o zcela jinou architekturu procesoru, která je mnohem složitější, propracovanější a obecně modernější. Oproti procesoru ATmega2560 má Cortex®-M3 mnoho nových funkcí, jako například zabudovaný DAC nebo piny pro čtení dotykového potenciálu pro logické řízení pomocí dotyku prstu. 32-bitový procesor ARM ARM® Cortex®-M3 RISC také pracuje na značně vyšší kmitočtu a to 84 MHz. Desky Arduino MEGA a Arduino Due jsou vidět na obrázku 1.12 (Šedo, 2016).



Obrázek 1.12 - Arduino MEGA a Arduino Due (Arduino, 2018)

### 1.3.2 Shieldy a periferie

Arduino má též k dispozici mnoho periférií a shieldů, které se dají připojit přímo do desek. Ohromná výhoda tohoto jednoduchého zapojování je v prototypovém testování. Některé shieldy dovolují připojení dalších shieldů a tím lze k jednomu arduinu připojit mnoho periférií. Příkladem může být Multifunctional Expansion Board Shield, který je vidět na obrázku 1.13. Jeho předností je to, že na sobě má tlačítka, diody, bzučák a další periferie, čímž se výborně hodí pro základní učení s Arduinem, ale i pro hledání chyb v programech.



Obrázek 1.13 - Arduino Multifunctional Expansion Board Shield (Arduino, 2018)

Pro zobrazování je vhodný LCD displej, který se dá připojit pomocí I<sup>2</sup>C, což je sériová sběrnice, která je používána pro připojení periférií k mikroprocesoru. Skládá se z jednoho řídicího prvku zvaného jako „Master“ a jednoho nebo více řízených prvků zvaných jako „Slave“. Master řídí celou komunikaci a posílá příkazy jednotlivým zařízením. Sběrnice umožňuje propojit až 128 zařízení do vzdálenosti desítek centimetrů. Jedná se tedy o komunikaci na krátké vzdálenosti. Názorná ukázka LCD s ovládacím obvodem pomocí I<sup>2</sup>C je vidět na obrázku 1.14 (Šedo, 2016).



Obrázek 1.14 – LCD displej (Arduino, 2018)

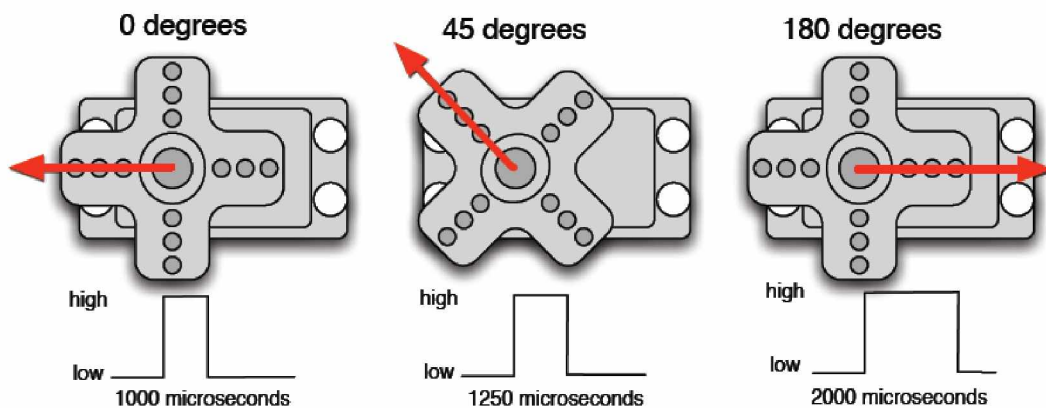
## 1.4 SERVOMOTOR A SERVO SIGNÁL

O natáčení lineárního vedení se stará modelářský servomotor. Servomotor je zařízení pro silové ovládání. Jedná se o elektromotor se zpětnou vazbou o poloze. Informace o poloze může být spojitá nebo diskrétní. Spojitá díky zpětné vazbě potenciometrem nebo inkrementálním čidlem. Diskrétní v případě využití koncových spínačů. Ukázka použitého servomotoru Futaba FP-S148 je vidět na obrázku 1.15.



Obrázek 1.15 - Servomotor Futaba FP-S148 (Oscar, 2013)

Modelářské servomotory se řídí pomocí délky pulzu. Délka pulzu, která udává požadované natočení servomotoru, se pohybuje mezi 1 až 2 ms. Nový puls by neměl následovat častěji než po 20 ms. Servomotor vyhodnotí signál a na jeho základě se nastaví do požadovaného úhlu natočení. Ilustrace natočení v závislosti na délce pulzu servo signálu je vidět na obrázku 1.16. Nevýhodou modelářského serva je, že neposkytuje informaci o skutečném natočení, a nevíme tak, jestli opravdu došlo k natočení, nebo se z důvodu zaseknutí nebo přetížení servo nenatočilo do požadovaného úhlu. Když by byla potřeba znát skutečná poloha serva, muselo by se servo doplnit o externí měření polohy (Oscar, 2013).



Obrázek 1.16- Natačení modelářského serva pomocí servo signálem (Oscar, 2013)

## 1.5 NOVÝ SOFTWARE

Software řídicí jednotky musí zajišťovat realizaci měření a řízení s požadovanou frekvencí a obsluhu uživatelského rozhraní s akceptovatelnou odezvou. V hlavní smyčce programu se bude nacházet kontrola časů, které budou spouštět metody pro měření polohy, výpočet regulátoru a zobrazování displeje. Příjem sériové linky, vyhodnocování tlačítek a enkodéru se bude obsluhovat přes přerušení procesoru.

## 1.6 PID

PID regulátor je vidět na obrázku 1.17. Celá rovnice PID regulátoru je

$$u(t) = K_p * \left( e(t) + \frac{1}{T_i} * \int_0^t e(t) dt + T_d * \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1.4)$$

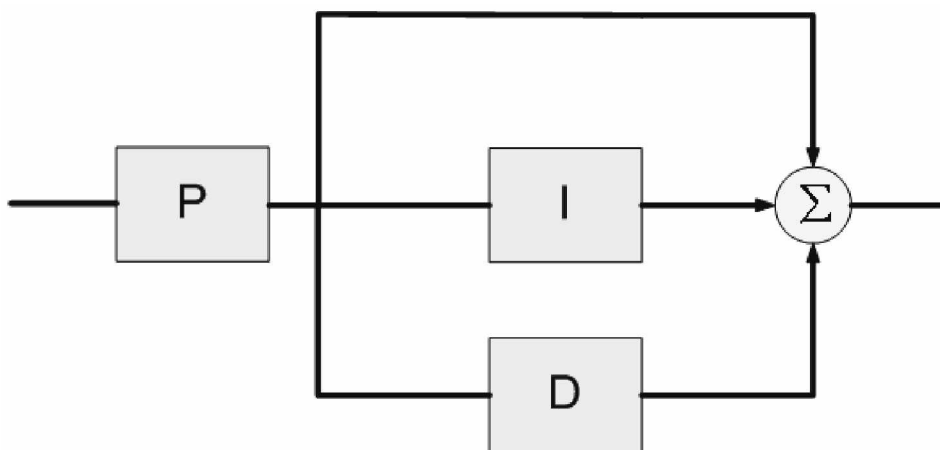
kde  $u(t)$  – akční veličina,

$e(t)$  – regulační odchylka,

$K_p$  – zesilovací konstanta proporciální složky,

$K_i$  – zesilovací konstanta integrační složky,

$K_d$  – zesilovací konstanta derivační složky.



Obrázek 1.17 - Blokové schéma PID (Lazaridis, 2011)

## 1.7 PSD

Nejpoužívanějším typem regulátorů v praxi je klasický spojitý regulátor PID. Jeho diskretní verze se označuje PSD regulátor. I složka je nahrazena sumací a D složka diferencí. V současnosti je PSD regulátor ve většině řídicích systémů. Při převedení rovnice spojitého regulátoru do diskretního tvaru nahradíme integrace a derivace numerickou aproximační metodou. Používají se dvě metody. První metoda je lichoběžníková. V lichoběžníkové metodě se integrál nahradí sumou

$$S = T \sum_{j=0}^{k-1} \frac{e(j) + e(j+1)}{2} = T \left[ \frac{e(0) + e(k)}{2} + \sum_{j=1}^{k-1} e(j) \right], \quad (1.5)$$

kde  $S$  – složka sumace v PSD regulátoru,

$T$  – perioda vzorkování, s,

$e(0)$  – počáteční regulační odchylka,

$e(k)$  – aktuální regulační odchylka.

Derivace se nahradí diferencí

$$D = \frac{e(k) - e(k-1)}{T}, \quad (1.6)$$

kde  $D$  – složka difference v PSD regulátoru,

$T$  – perioda vzorkování, s,

$e(k)$  – aktuální regulační odchylka,

$e(k-1)$  – regulační odchylka v minulém vzorku.

Náhradou v rovnici PID regulátoru pak dostaneme výslednou rovnici PSD regulátoru ve tvaru

$$u(k) = r_0 \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \left[ \frac{e(0) + e(k)}{2} + \sum_{j=1}^{k-1} e(j) \right] + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}, \quad (1.7)$$

kde  $u(k)$  – akční zásah,

$r_0$  – zesílení,

$T_i$  – integrační konstanta, s,

$T_d$  – derivační konstanta, s,

$T$  – perioda vzorkování, s,

$e(0)$  – počáteční regulační odchylka,

$e(k)$  – aktuální regulační odchylka,

$e(k-1)$  – regulační odchylka v minulém vzorku.

U tohoto regulátoru je nevýhodou, že obsahuje sumu všech předchozích odchylek. Nazýváme ho polohový regulátor. Výhodnějším tvarem je přírůstkový, který můžeme odvodit z posunutí o jeden interval vzorkování. Rovnice poté vypadá

$$u(k-1) = r_0 \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \left[ \frac{e(0) + e(k-1)}{2} + \sum_{j=1}^{k-2} e(j) \right] + \frac{T_d}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\}, \quad (1.8)$$

kde  $u(k-1)$  – akční zásah v minulém vzorku,

$r_0$  – zesílení,

$T_i$  – integrační konstanta, s,

$T_d$  – derivační konstanta, s,

$T$  – perioda vzorkování, s,

$e(0)$  – počáteční regulační odchylka,

$e(k-1)$  – regulační odchylka v minulém vzorku,

$e(k-2)$  – regulační odchylka v předminulém vzorku.

Když následně odečteme obě rovnice, dostaneme rovnici v přírůstkovém tvaru ve tvaru

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (1.9)$$

kde  $u(k)$  – akční zásah,

$u(k-1)$  – akční zásah v minulém vzorku,

$e(k)$  – aktuální regulační odchylka,

$e(k-1)$  – regulační odchylka v minulém vzorku,

$e(k-2)$  – regulační odchylka v předminulém vzorku,

$q_0, q_1, q_2$  – parametry diferenční rovnice.

Přepočítání parametrů spojitého regulátoru na parametry diferenční rovnice

$$q_0 = r_0 \left( 1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right), \quad (1.10)$$

kde  $q_0$  – parametr diferenční rovnice,

$r_0$  – zesílení,

$T_i$  – integrační konstanta, s,

$T_d$  – derivační konstanta, s,

$T$  – perioda vzorkování, s,

$$q_1 = -r_0 \left( 1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{2T_d}{T} \right), \quad (1.11)$$

kde  $q_1$  – parametr diferenční rovnice,

$r_0$  – zesílení,



$T_i$  – integrační konstanta, s,

$T_d$  – derivační konstanta, s,

$T$  – perioda vzorkování, s,

a

$$q_2 = r_0 \frac{T_d}{T}, \quad (1.12)$$

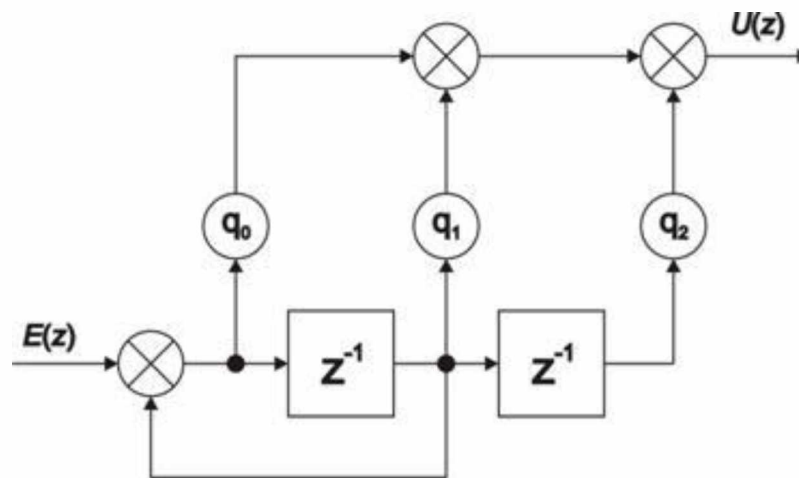
kde  $q_2$  – parametr diferenční rovnice,

$r_0$  – zesílení,

$T_d$  – derivační konstanta, s,

$T$  – perioda vzorkování, s.

Blokové schéma PSD regulátoru je vidět na obrázku 1.18 (LAZARIDIS, 2011).



Obrázek 1.18 - Blokové schéma PSD regulátoru (Lazaridis, 2011)

## 1.8 NASTAVOVÁNÍ PID – AUTOTUNING

Autotuning, neboli jednorázové automatické nastavení parametrů PID regulátoru, je vhodné pro prvotní návrh parametrů, které se potom manuálně doladí. Toto je vhodné, když člověk

nemá vůbec představu o soustavě. Nastavování PID parametrů se dá dělat různými způsoby. Většina vychází z aproximativního matematického modelu řízeného procesu.

### 1.8.1 Odhad parametrů z přechodové funkce

Odhad parametrů pomocí aproximace přechodové charakteristiky je možné použít za předpokladu, kdy je šum na výstupu měřené soustavy zanedbatelný. První možností je aproximace proporciální soustavou se setrvačností prvního řádu. Je dána soustava prvního řádu

$$G(s) = \frac{K}{T_1 s + 1}, \quad (1.13)$$

kde  $G(s)$  – přenos soustavy,

$T_1$  – časová konstanta, s,

$K$  – zesílení soustavy.

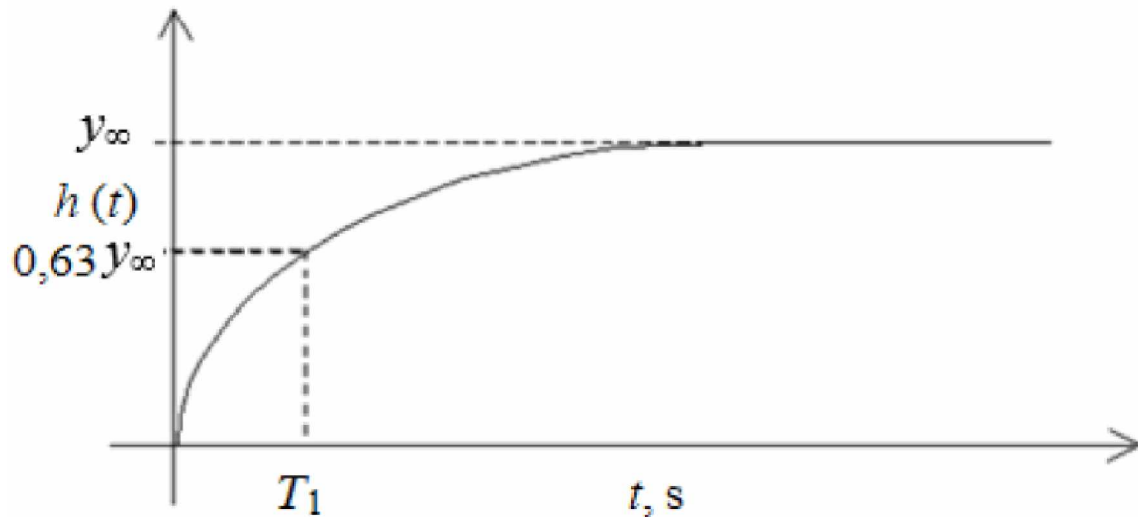
Přechodová charakteristika soustavy prvního řádu je vidět na obrázku 1.19. Poměrem výstupní a vstupní veličiny v ustáleném stavu získáme zesílení soustavy  $K$ . Časová konstanta  $T_1$  odpovídá 0,63násobku  $y_\infty$ .

$$K = \frac{y_\infty}{u_\infty}, \quad (1.14)$$

kde  $K$  – zesílení soustavy

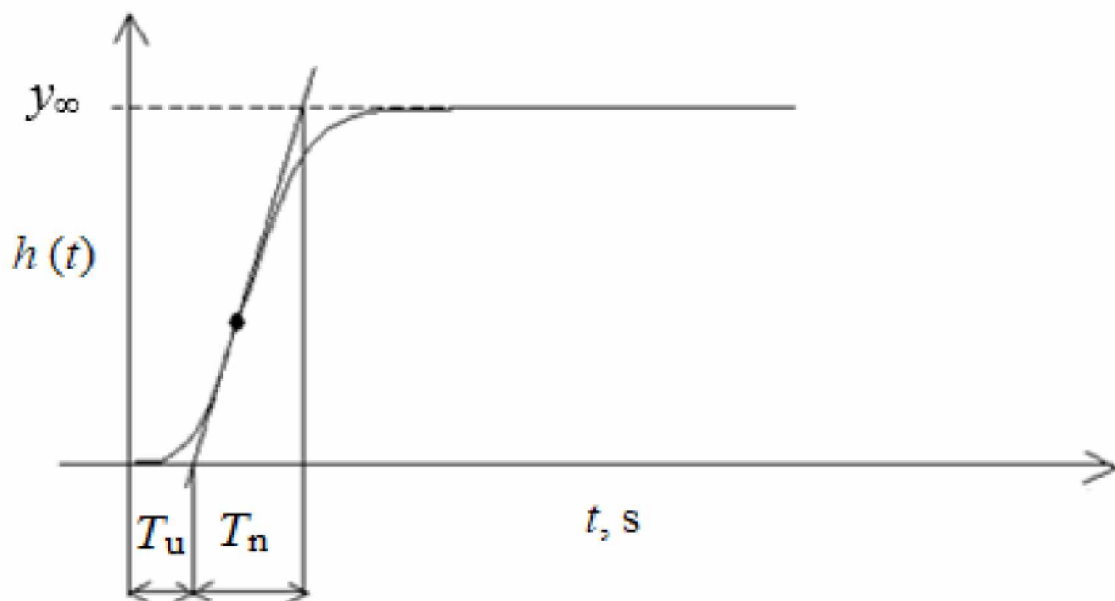
$y_\infty$  – ustálená hodnota výstupní veličiny,

$u_\infty$  – ustálená hodnota vstupní veličiny



Obrázek 1.19 - Přejchodová charakteristika soustavy prvního řádu (Lazaridis, 2011)

Přejchodová charakteristika soustavy vyšších řádů se dá aproximovat pomocí proporciální soustavy druhého řádu s různě velkými časovými konstantami  $T_u$  a  $T_n$ , které jsou vidět na obrázku 1.20.



Obrázek 1.20 - Přejchodová charakteristika soustavy (Lazaridis, 2011)

Soustava se volí dle normalizovaného dopravního zpoždění  $\tau$ , které je dáno poměrem  $T_u$  a  $T_n$ .

$$K\tau = \frac{T_u}{T_n}, \quad (1.15)$$

kde  $\tau$  – normalizovaná hodnota dopravního zpoždění,

$T_u$  – doba průtahu, s,

$T_n$  – doba náběhu, s.

Za předpokladu, že  $\tau < 0,1$ , se volí přenos s rozdílnými časovými konstantami

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (1.16)$$

kde  $G(s)$  – přenos soustavy,

$T_1$  – časová konstanta, s,

$T_2$  – časová konstanta, s,

$K$  – zesílení soustavy.

V případě, že  $\tau \geq 0,1$ , se volí aproximace se stejnou časovou konstantou

$$G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n}, \quad (1.17)$$

kde  $G(s)$  – přenos soustavy,

$T$  – časová konstanta, s,

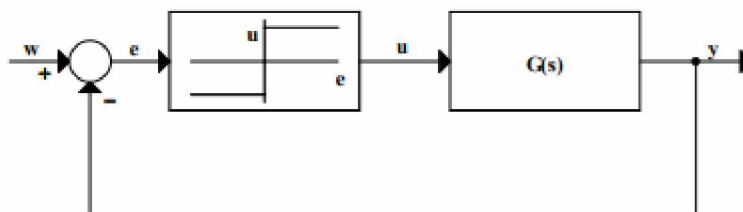
$K$  – zesílení soustavy,

$n$  – řád soustavy.

### 1.8.2 Relé ve zpětné vazbě

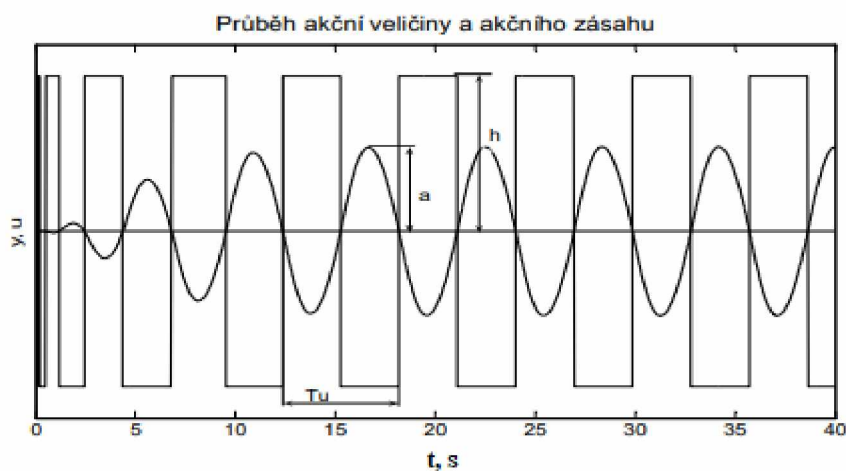
Pomocí relé ve zpětné vazbě zjišťujeme kritické zesílení a kritickou periodu. Jedná se o P regulátor s nekonečným zesílením a limitací, který nám rozkmitá soustavu na kritické

periodě. Amplituda výsledných kmitů závisí na amplitudě akčního zásahu relé. Zapojení relé ve zpětné vazbě je vidět na obrázku 1.21.



Obrázek 1.21- Relé ve zpětné vazbě (Lazaridis, 2011),

Vhodnou volbou amplitudy se může soustava pohybovat pouze v určitém rozsahu a tím lze využít lineární část nebo jinak posouvat experiment. V případě regulace kuličky se musí amplituda akčního zásahu relé volit tak, aby kulička nenarážela na dorazy. Příklad průběhů ve zpětné vazbě je na obrázku 1.22.



Obrázek 1.2278 - Průběhy relé ve zpětné vazbě (Lazaridis, 2011)

Amplitudu kmitu „a“ v ustáleném stavu můžeme přepočítat na kritické zesílení metodou Zieglera a Nicholse. Kritická perioda kmitání je zde stejná. Přepočet je dán vztahem

$$r_k = \frac{4h}{\pi a}, \quad (1.18)$$

kde  $r_k$  – kritické zesílení soustavy,  
 $h$  – amplituda akčního zásahu relé,  
 $a$  – amplituda kmitu soustavy.

Tato metoda bude nejvhodnější pro implementaci pro tuto soustavu.

### 1.8.3 Výpočet parametrů metodou Zieglera a Nicholse

Metoda ZN umožňuje určení parametrů různých variant PID regulátoru ve tvaru buď na základě vyhodnocení přechodové charakteristiky, tj. ze znalosti zesílení soustavy, doby náběhu a doby průtahu, nebo z kritických hodnot řízené soustavy.

Ze znalosti zesílení, doby náběhu a průtahu se pak dají vypočítat parametry  $a$  a  $L$ , které slouží pro určení parametrů PID regulátoru pomocí tabulky 1.1 (LAZARIDIS, 2011).

$$a = \frac{KT_u}{T_n}, \quad (1.19)$$

kde  $K$  – zesílení soustavy,  
 $T_u$  – doba průtahu, s,  
 $T_n$  – doba náběhu, s.

Tabulka 1.1 - Výpočet konstant PID regulátoru pomocí Zieglera a Nicholse z přechodové charakteristiky

regulátor	$r_0$	$T_i$	$T_d$
P	1/a		
I	0,9/a	3 $T_u$	
D	1,2/a	2 $T_u$	0,5 $T_u$

Pro získání parametrů PID regulátoru z kritického zesílení a periody použijeme tabulku 1.2.

Tabulka 1.2 - Výpočet konstant PID regulátoru pomocí Zieglera a Nicholse pro kritické zesílení a periodu

regulátor	$r_0$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5r_k$		
PI	$0,45r_k$	$0,83T_k$	
PD	$0,4r_k$		$0,05r_k$
PID	$0,6r_k$	$0,5T_k$	$0,12r_k$

#### 1.8.4 Implementace

Pro tuto soustavu bude nejvhodnější použít relé ve zpětné vazbě, kterým se zjistí kritické zesílení a perioda. Následně se pomocí ZN metody vypočítají parametry regulátoru. Soustava má integrační charakter, a proto je nejvhodnější využití PD regulátoru. Implementace programu bude probíhat v měření krajních hodnot na jedné straně lineárního vedení. Perioda ustálených kmitů se určí z po sobě jdoucích maxim měření polohy kuličky a amplituda kmitů z rozdílů maxima a minima měřené polohy. Provede se například 10 měření. Z měření se pak udělá průměr, který by měl zpřesnit měření. Kritická perioda bude okolo 5 – 10 s. Celé měření tedy bude trvat i s ustálením déle než 2 minuty. Průměrování se bude týkat také amplitudy kmitu.

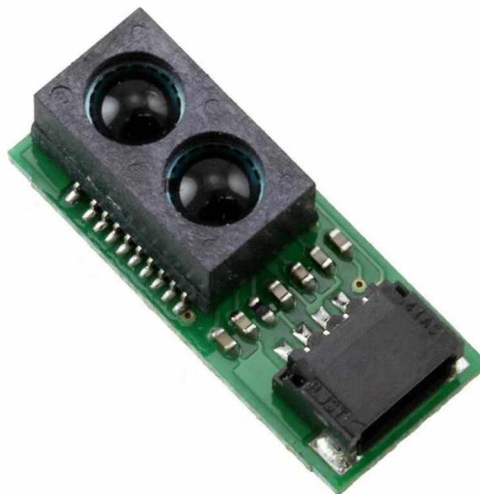
## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 VÝBĚR PROCESORU A PERIFERIÍ

Pro tuto aplikaci je zapotřebí ovládat displej, zjišťovat polohu pomocí nejméně tří čidel, vypočítávat regulační akce a komunikovat s počítačem. Deska, která by na vše měla stačit, je Arduino Mega, která byla vybrána.

Do ovládacího panelu bylo zapotřebí vybrat vhodný LCD displej, který bude umožňovat zobrazování všech potřebných údajů. Jako nejvhodnější a dostupný byl zvolen LCD displej 4×20 znaků doplněný o převodník signálů na sběrnici I2C.

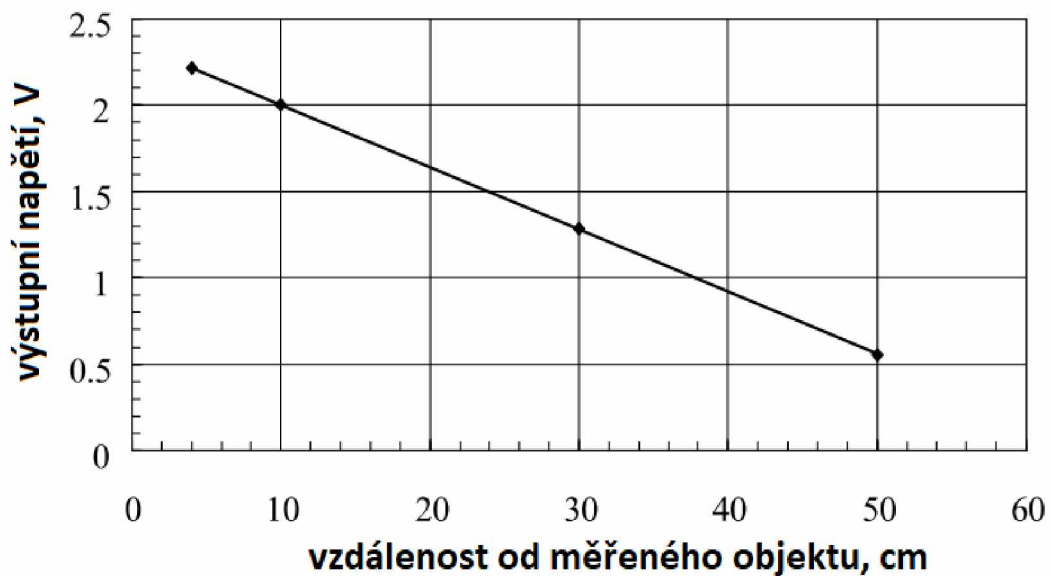
Pro rozšiřující měření polohy kuličky bylo vybráno laserové čidlo GP2Y0E02A, které je vidět na obrázku 2.1 od firmy SHARP/Socle Technology, které je jak malé, tak lehké, s úzkým paprskem a je cenově dostupné.



Obrázek 2.1 - GP2Y0E02A (*Sharp corporation,2011*)

Toto čidlo má vyzařovací úhel přibližně 4°. Dokáže měřit vzdálenost od 4 do 50 cm. Svou velikostí 18,9 mm na délku, 8 mm na šířku a 5,2 mm na hloubku umožňuje vestavbu do koncové zářázky lineárního vedení. Jelikož čidlo měří od 4 cm, pro konstrukci se využijí 2 čidla, která budou navzájem hlídat mrtvá místa druhého čidla, a spolu budou poskytovat přesnější informaci o poloze kuličky. Čidlo samo měří a vyhodnocuje vzdálenost. Výstupní signál čidla je analogové napětí, které se mění v závislosti na vzdálenosti od měřeného objektu. Tento průběh znázorňuje obrázek 2.2.



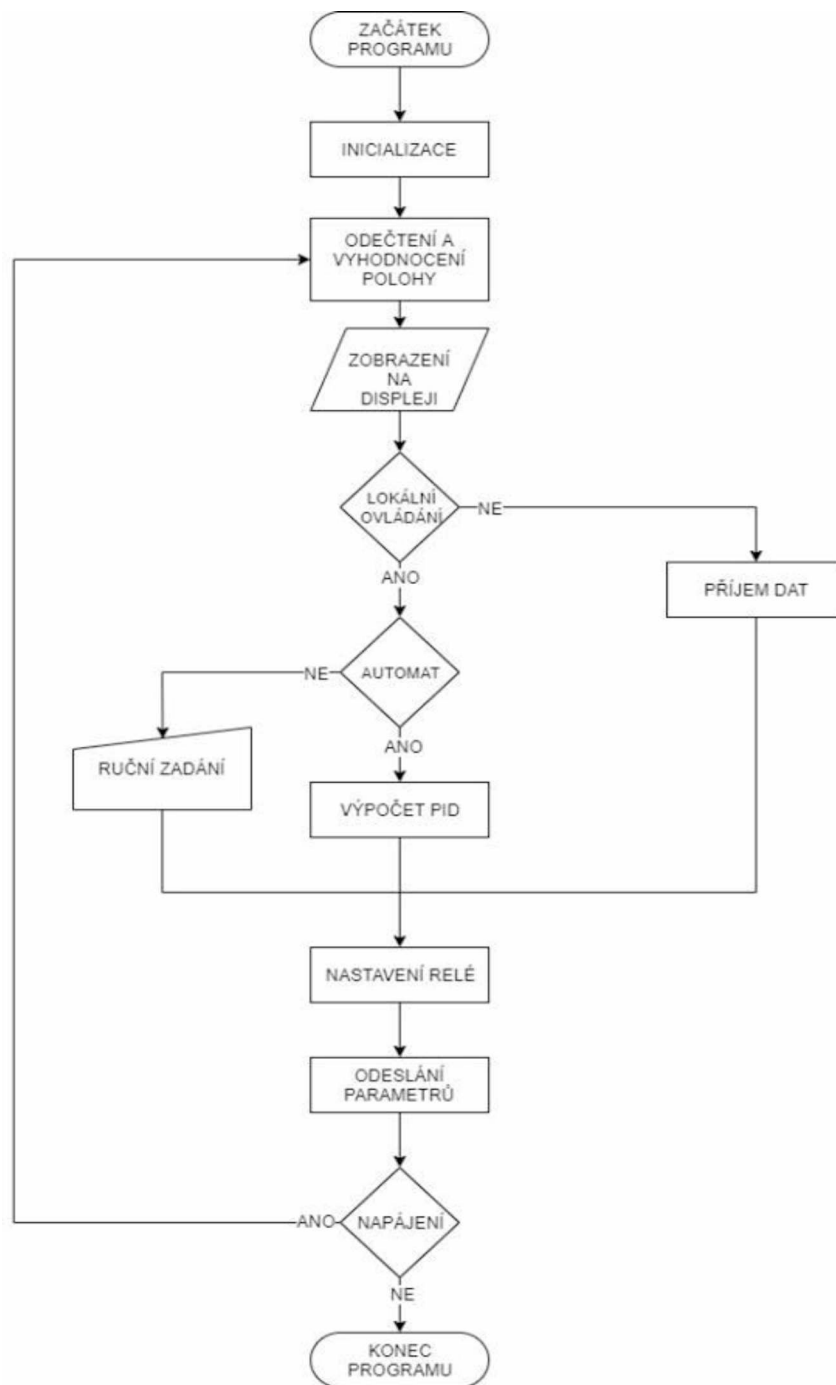


Obrázek 2.2 - Výstupní signál GP2Y0E02A (*Sharp corporation*, 2011)

Propojení ovladače a základny bude pomocí síťového kabelu UTP. Proto budou realizovány nové DPS, které budou sloužit jako držák pro konektor RJ45 a další konektory pro propojení. DPS na konstrukci se zároveň bude starat o distribuci elektrické energie pro servomotor a procesor s displejem. Do desky se také zapojí napájecí zdroj, který bude muset mít výstupní napětí 5 V. Zdroj bude přímo napájet servomotor a pomocí lineárního stabilizátoru se bude snižovat napětí na 3,3 V pro procesor, čidla a měřicí dráhu. Výkon napájecího zdroje by měl být nejméně 10 W, tedy proud alespoň 2 A. Servomotor při rozjezdu má velký špičkový odběr.

## 2.2 POPIS PROGRAMU

Po zapnutí zařízení se inicializují všechny periferie a nastaví se dráha do vodorovné polohy. Poté začíná samotný běh programu, který v nekonečné smyčce nejdříve změří polohu kuličky, a výsledky zobrazí na displej. Dále podle nastavení přijme data z PC nebo vypočte akční zásah sám. Poté se nastaví relé a celý postup se opakuje. Na obrázku 2.3 je zobrazen vývojový diagram programu.

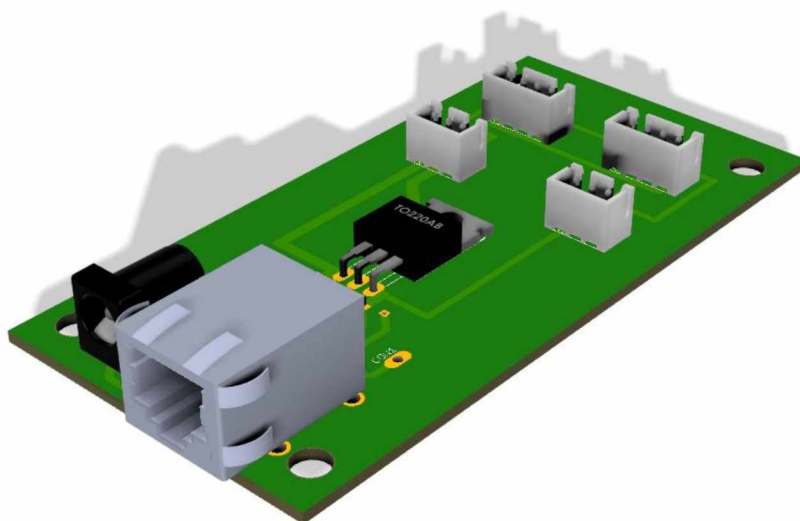


Obrázek 2.3 - Vývojový diagram programu

## 2.3 NÁVRHY DPS

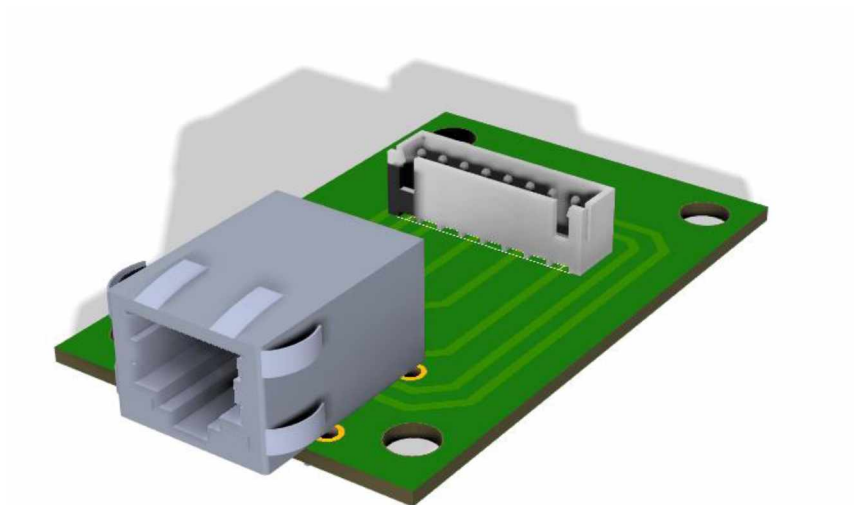
Velikost desky plošných spojů, která bude přidělena na konstrukci zařízení, bude odpovídat výřezu v konstrukci. Deska bude mnohem větší, než by mohla být, ale celkový estetický pohled na konstrukci se tímlepší. 3D model DPS je vidět na obrázku 2.4. Tato deska plošných spojů bude obsahovat konektor RJ45, stabilizátor napětí z 5 V na 3,3 V, napájecí konektor pro adaptér a 4 konektory

- konektor na odporovou dráhu,
- konektor na laserové čidlo 1,
- konektor na laserové čidlo 2,
- konektor na servomotor.



Obrázek 2.4 - 3D model DPS – podstavec

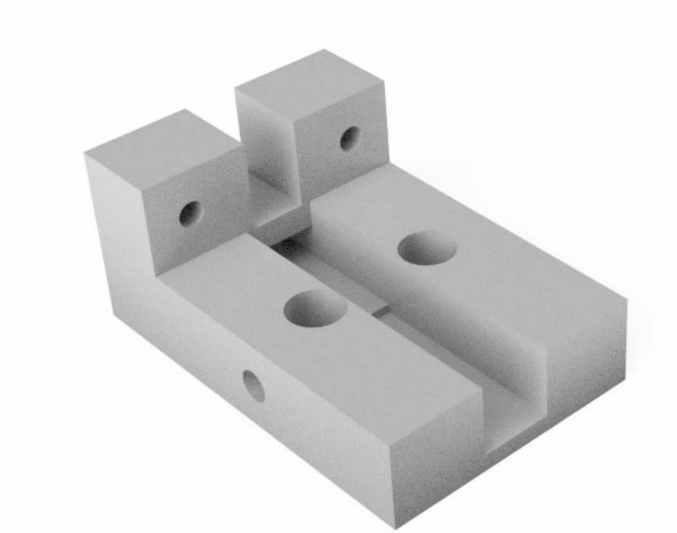
Vrchní deska plošných spojů bude sloužit pouze jako držák konektoru RJ45 a přechod na jiný konektor. Tato deska bude také větší rozměrů z důvodu rozložení sil na plastové tělo ovladače, ve kterém bude. 3D model je vyobrazen na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 - 3D model DPS – ovladač

## 2.4 MODELOVÁNÍ A TISK 3D KOMPONENT

Pro uchycení laserových čidel je zapotřebí upravit konce lineárního vedení. V dnešní době je pro jednodušovou výrobu nejvhodnější použít 3D tisk, když to okolnosti dovolují. Tento díl bude v sobě kombinovat funkci držáku laserového čidla, držáku lineárního vedení a dorazu kuličky. Celý 3D model vychází z originálního ukončení lineárního vedení, avšak je upraveno právě pro laserové čidlo. 3D model držáku je vidět na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6 - Držák lineárního vedení

Vrchní část ovladače bude připravena na LCD displej 4×20 znaků. Dále zde bude příprava pro 2 tlačítka a jeden inkrementální enkodér. Spojení se spodní částí bude pomocí 4 šroubků po stranách. Celá konstrukce nebude vlivem tenkých stěn příliš pevná. Konstrukce se ale díky přišroubovanému displeji a desky Arduino zpevní. Obrázek 2.7 ukazuje 3D model vrchní části ovladače.



Obrázek 2.7 - Vrchní část ovladače

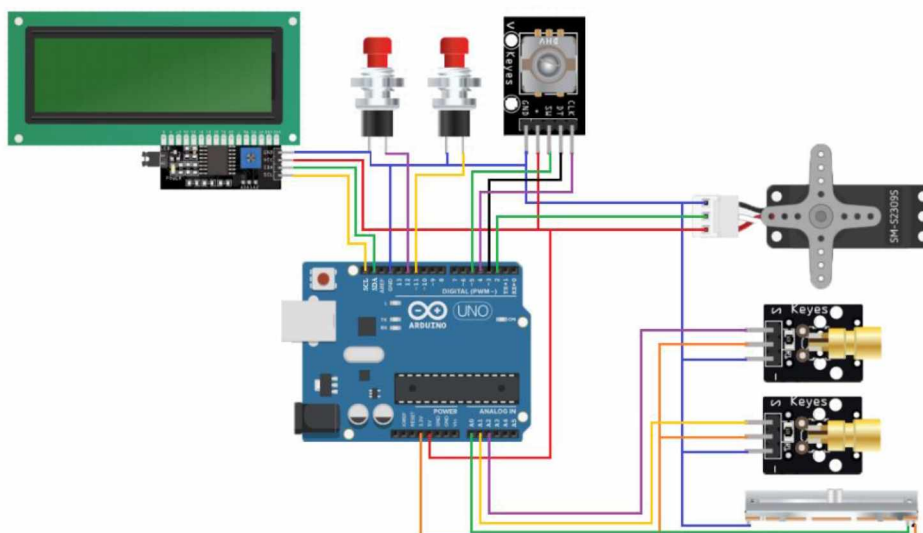
Spodní část ovladače bude sloužit jako držák desky plošných spojů s konektorem RJ45 a držák desky Arduino Mega. Pro jednoduché programování je zde otvor na USB-B. Tímto konektorem se celá deska Arduino Mega programuje. Obrázek 2.8 ukazuje 3D model spodní části ovladače.



Obrázek 2.8 - Spodní část ovladače

## 2.5 ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ

Zapojení celého zařízení je vidět na blokovém schématu na obrázku 2.9. K Arduino jsou zapojeny dva laserové měřiče na piny A1 a A2. Dále výstup z odporového měření je přiveden na vstup A0. Stisk tlačítek uzemňují piny 53 a 52. Výstupní signál pro servo je na pinu 2. Enkodér je zapojen na piny 3, 4 a 5. Displej je připojen pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C na piny SCL a SDA.



Obrázek 2.9 - Schéma zapojení

## 2.6 KOMUNIKACE

Řídicí jednotka odesílá přes sériovou linku rychlostí 56000 Bd informace o stavu celé soustavy ve formě zpráv obsahujících ASCII znaky. Informace je zakódována pomocí 1 znaku (velké písmeno), který udává druh informace a následných číslic, které již nese samotnou informaci. Za číslicemi následuje znak LF. V tabulce 2.1 je vidět výpis všech posílaných zpráv, které zařízení odesílá přes sériovou linku. Zprávy jsou odesílané každých 100 ms.

Tabulka 2.1 - Soupis odesílaných informací

význam	znak	číslo
žádaná	W	0-180
aktuální	Y	0-180
akční	U	0-180
P složka	P	0-9,99
I složka	I	0-9,99
D složka	D	0-9,99
odporová dráha	R	0-100
laser 1	L	0-100
laser 2	K	0-100

Zařízení se dá pomocí sériové linky také ovládat, když se přepne do režimu REMOTE, což je indikováno v pravém spodním rohu displeje písmenkem R. Příkazy se odesílají vždy znak a číslo. Znak určuje příkaz a číslo informaci. Soupis příkazů je vidět v tabulce 2.2.

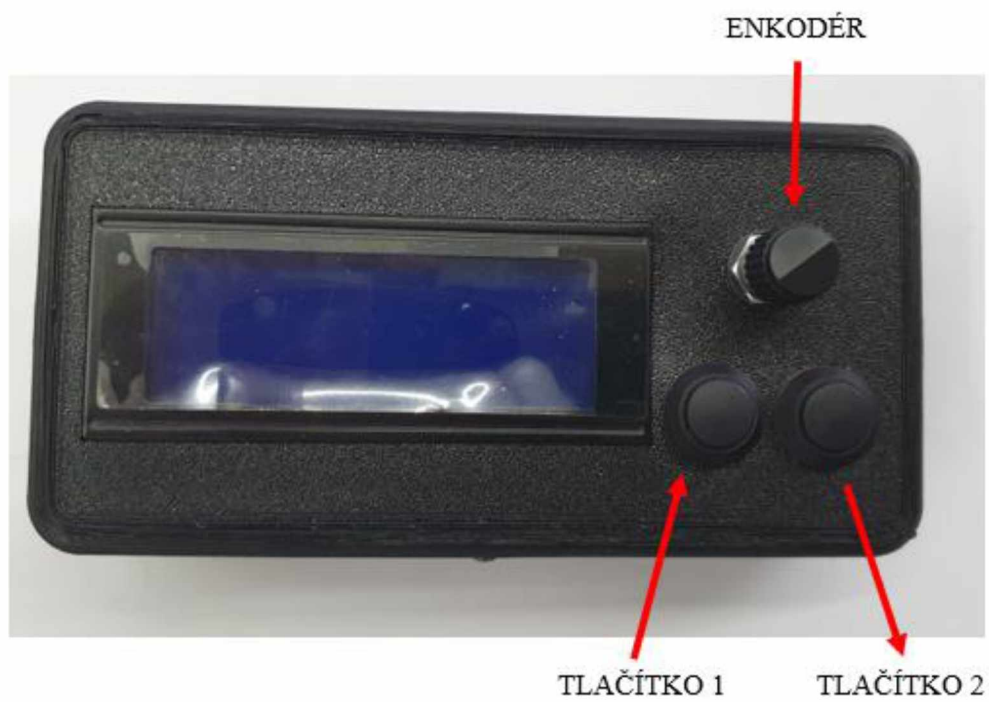
Tabulka 2.2 - Soupis přijímaných instrukcí

význam	znak	číslo
manual	M	0-1
žádaná	W	0-180
akční	U	0-180
P složka	P	0-9,99
I složka	I	0-9,99
D složka	D	0-9,99

## 2.7 OVLÁDÁNÍ

Zařízení se po zapnutí přepne do lokálního, manuálního režimu. V tomto režimu je možno nastavovat parametry PID regulátoru, nastavovat žádanou hodnotu nebo obsluhovat akční veličinu ručně, tedy natáčet servo. Stiskem enkodéru se volí parametr a jeho otočením hodnota parametru. Stiskem tlačítka 1 se přepíná mezi režimem LOCAL, který je indikován písmenkem L, a REMOTE, který je indikován písmenkem R. Stiskem tlačítka 2 se přepíná mezi režimem MANUAL, který je indikován písmenkem M, a AUTOMAT, který je indikován písmenkem A. Při stisku tlačítka 2 delším než 3 s se spustí autotuning PID regulátoru. Tato písmenka jsou umístěna v pravém spodním rohu displeje. Jednotlivé ovládací prvky jsou vidět na obrázku 2.10.



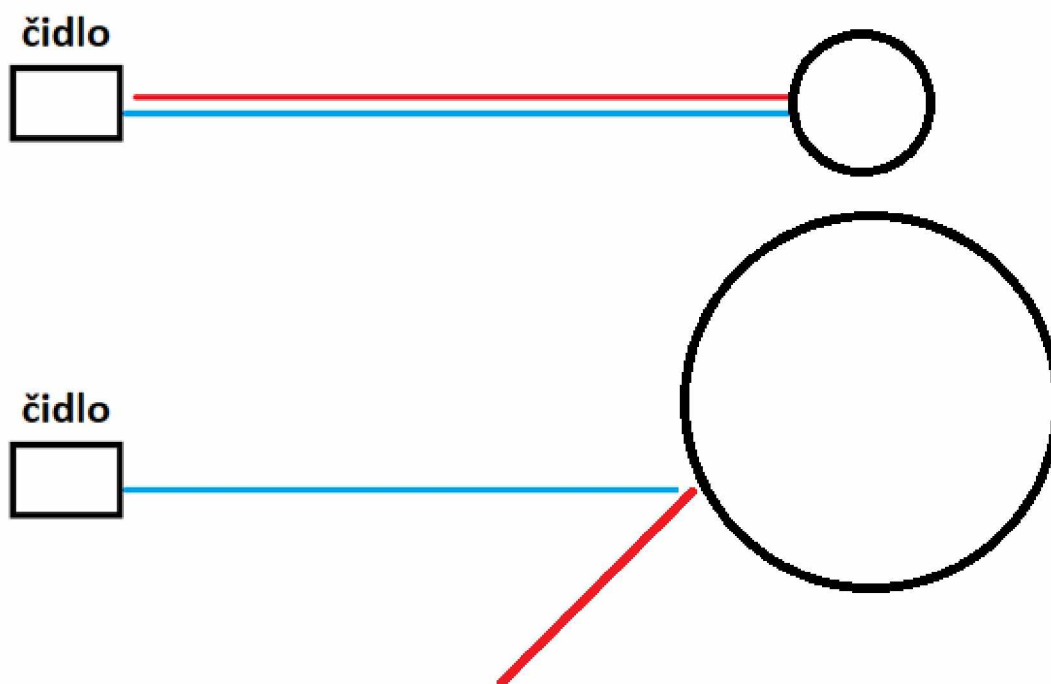


Obrázek 2.10 - Popis ovladače

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 LASEROVÉ SNÍMAČE

Laserové snímače, které mají sloužit jako druhý způsob měření polohy, fungují výborně proti zdi i jiným plochám. Problém nastal při seřizování senzoru na kuličku. Laserový snímač se podařilo seřídít vždy na část lineárního vedení, avšak nikdy na celou dráhu. Vznikají tak slepá místa. Tato místa budou velmi pravděpodobně způsobena odrazem laserového paprsku od kulaté plochy. Problém nastane vždy, když senzor míří jinam než na přesný střed kuličky. Střed kuličky je potřeba zaměřit přesně ve vertikální i horizontální ose. Vedení není úplně rovné a pro tento druh senzoru je to podstatné. Další špatné odrazy nastávají s různě velkými kuličkami. Když se čidlo nastaví na malou kuličku, nemíří na střed velké a naopak. Z tohoto důvodu je toto měření nevhodné. Tento problém je vyobrazen na obrázku 3.1. Chybovost a slepá místa jsou tak častá, že ani zapojením dvou čidel naproti sobě nejde vyhodnotit polohu kuličky.



Obrázek 3.1 - Odraz laseru od kuličky

### 3.2 ODPOROVÁ DRÁHA

Měření polohy pomocí odporového děliče také není nejvhodnější. Odporový drát navinutý na kulatině z pertinaxu dělá nerovný povrch. Kulička se v záhybech zasekne a až větší náklon jí donutí se pohnout. Občas také kulička nadskočí nebo jinak ztratí kontakt s odporovou dráhou a procesor nedostává validní informace o poloze. Z toho důvodu byla zařazena do zpracování polohy exponenciální filtrace. Tato filtrace pomáhá odstranit odlehlé body a získaná data vyhladit. Vzorec exponenciální filtrace

$$y = (1 - \alpha) \cdot y_i + \alpha \cdot y_{i-1}, \quad (2.1)$$

kde  $y$  – aktuální vyfiltrovaná poloha,

$y_i$  – aktuální změřená poloha,

$y_{i-1}$  – vyfiltrovaná poloha z minulého výpočtu

$\alpha$  – koeficient filtrace.

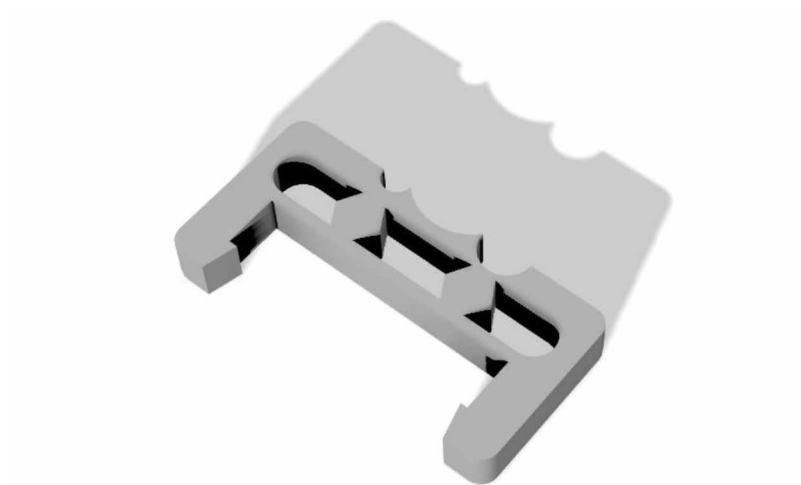
Koeficient filtrace se nastavuje od 0 do 1. Pro 0 filtr nefiltruje a pro 1 použije předchozí vzorek. Když se číslo pohybuje mezi 0 a 1, filtr v poměru kombinuje předchozí a současný vzorek. Touto filtrací se čtení polohy hodně zlepšilo. Nastal zde problém, že filtr zvyšuje dynamiku řízeného systému, což komplikuje regulaci.

### 3.3 VODIVÉ LAKY

Vodivé laky se pro tuto aplikaci nedají použít. Důvodem je nestabilita signálu. Kulička při pohybu po vedení ztrácí kontakt s lineární dráhou a není tak možné určit polohu kuličky.

### 3.4 VODIVÁ GUMA

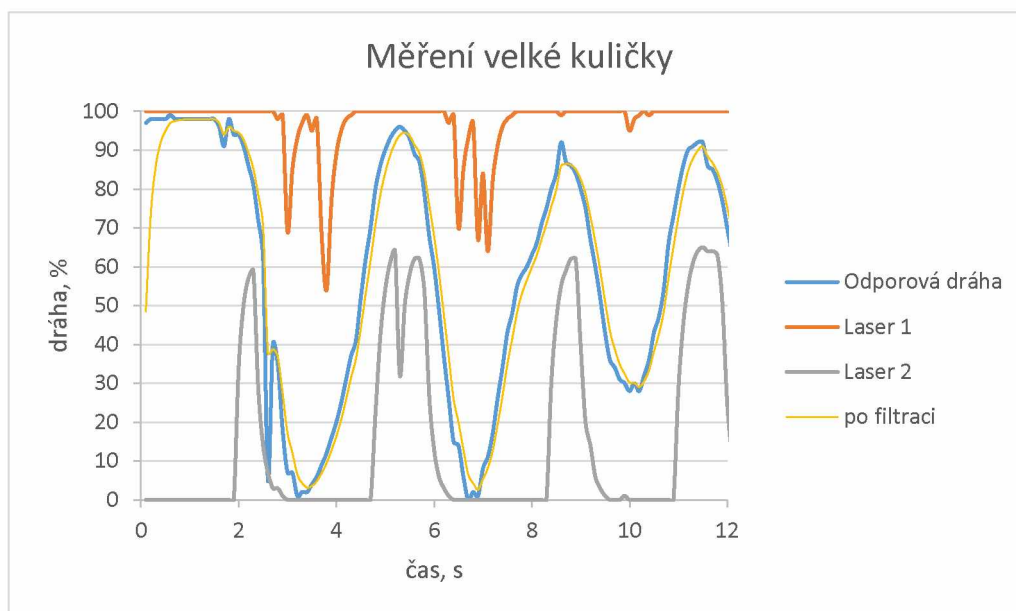
Pro využití vodivé gumy bylo zapotřebí vytvořit podpěry lineárního vedení. Tenký nerezový drát, na kterém je navléknuta hadička z vodivé gumy o průměru 4 mm, není dostatečně pevný, aby se neohýbal. Tento drát byl také nalakován, aby nebyl povrch vodivý a umožnil tak měření. Podpěra lineárního vedení je vidět na obrázku 3.2. Jeho tvar je vytvořen podle kolejnice, na kterou se dá jednoduše nacvaknout.



Obrázek 3.2 - Podpora vedení vodivé gumy

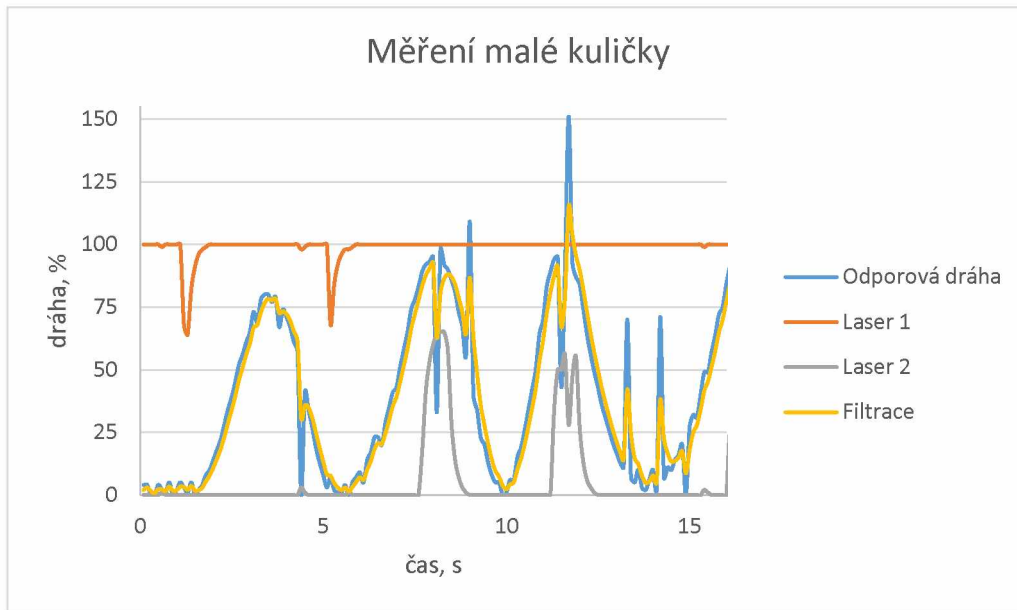
### **3.5 NAMĚŘENÉ HODNOTY**

Předešlé závěry vyšly z měření, které je vidět na obrázku 3.3 pro velkou kuličku a na obrázku 3.4 pro malou kuličku. Je vidět, že laserová čidla si s měřením vzdálenosti kuličky neporadí. Čidla jsou konstruovaná na odraz od plochy a jejich použití na malé kulaté ploše není možné. Občasný výpadek měřené hodnoty exponenciální filtr zvládá dobře vyfiltrovat. Pro určení polohy se používá pouze odporová dráha.



Obrázek 3.3 - Měření velké kuličky

Měření polohy malé kuličky je mnohem složitější. Laserová čidla jí občas nevidí vůbec. Měření na odporové dráze (odporový drát) je složitější z důvodu horšího kontaktu. Menší kulička je lehčí. Z toho důvodu nemá tak velký přítlak na odporové dráze, a proto se občas ztratí kontakt a jsou zde odlehlé body. Exponenciální filtr hodně pomohl, ale výsledek není pro regulaci vhodný.



Obrázek 3.4 - Měření malé kuličky

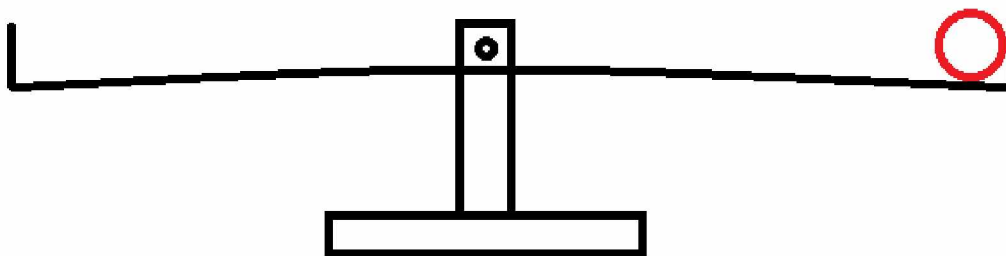
### 3.6 NASTAVENÍ A TESTOVÁNÍ PID REGULÁTORU

Nastavení PID regulátoru proběhlo bez větších komplikací. Jedná se o soustavu s integračním charakterem, kde se I složka regulátoru nepoužívá. Pro nastavení PD regulátoru se postupovalo nejdříve odhadem a vyzkoušením parametru P, poté parametru D. Regulátor dokáže soustavu uregulovat dobře. Problém nastává pouze v určování polohy kuličky. Občas se stane, že ztratí kontakt s plochou, a informace o poloze je i přes použitý filtr špatná. V tu chvíli derivační složka regulátoru s kuličkou výrazně pohne. Po získání nové polohy se regulátor brzo dostane zase na žádanou hodnotu.

### 3.7 AUTOTUNING – RELÉ VE ZPĚTNÉ VAZBĚ

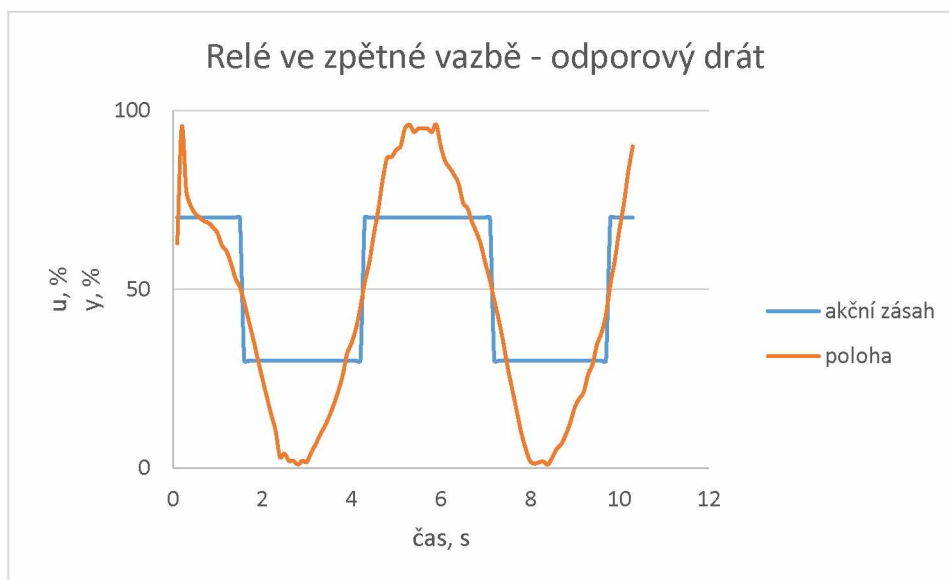
#### 3.7.1 Odporová dráha

Relé ve zpětné vazbě se nejprve zkoušelo s velkou kuličkou. Problém nastal s nemožností dodržení podmínek. Dráha lineárního vedení je lehce prohnutá, jak ukazuje obrázek 3.5. Z toho důvodu byl zapotřebí větší akční zásah, aby se kulička rozpohybovala opačným směrem. Její setrvačnost byla tak velká, že narazila do dorazu vedení na druhé straně. Při spuštění z prostředku kulička dokázala jeden kmit, ale poté již narážela o dorazy.



Obrázek 3.5 - Prohnutí lineárního vedení

Při pokusu s malou kuličkou se situace zlepšila. Malá kulička má menší setrvačnost, a proto jsou její kmity menší. Velikost amplitudy pro relé byla stanovena na nejmenší možnou, aby zařízení bylo schopno kuličku překlopit. Naměřená data jsou vidět na obrázku 3.6. Na průběhu polohy kuličky jsou vidět nárazy, které jsou reprezentované oříznutím (limitací) sinusového průběhu sinusovky.



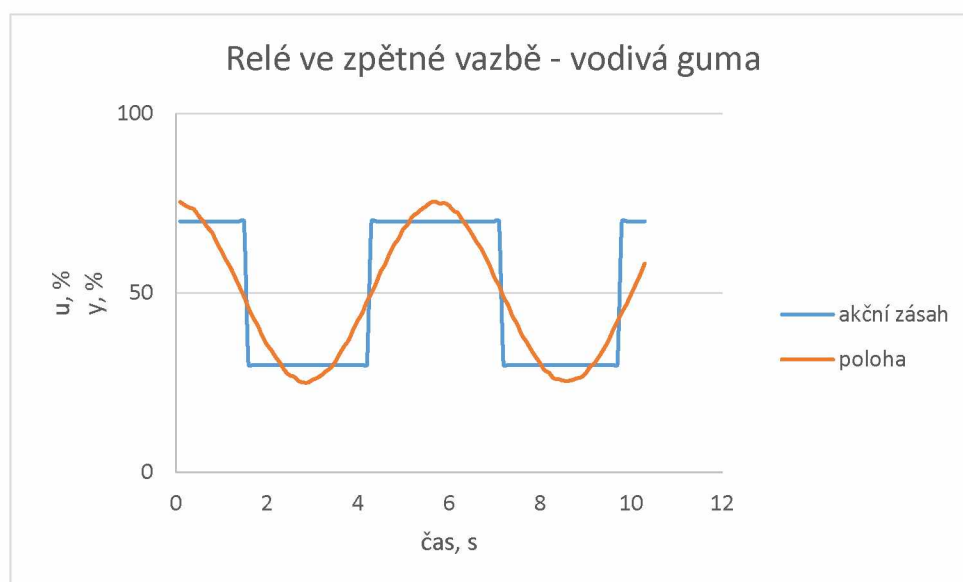
Obrázek 3.6 - Relé ve zpětné vazbě na odporovém drátu

Z tohoto důvodu není možné využít metodu relé ve zpětné vazbě, a tím určit kritické zesílení a periodu pro výpočet parametrů PID regulátoru. Vyřešit tuto situaci by mohlo delší vedení, které by poskytlo kuličkám větší prostor, nebo menší kulička. S menší kuličkou by byl

problém s určováním polohy, jelikož by kontakt s lineární dráhou a odporovým povrchem byl horší.

### 3.7.2 Vodivá guma

Pokus o relé ve zpětné vazbě se opakoval s vodivou gumou. Výsledky byly lepší než v předešlém případě s odporovou dráhou. Zařízení se podařilo za určitých počátečních podmínek ustálit do stálých kmitů. Důležité je kuličku dát na střed dráhy a nechat ji rozkmitat pomocí akčních zásahů z relé. Tím se změřila amplituda a kritická perioda. Z těchto dat se vypočítá pomocí ZN metody složky PID regulátoru.



Obrázek 3.7 - Relé ve zpětné vazbě na vodivé gumě



## 4 ZÁVĚR

Mechanická část modelu byla doplněna o nejvhodnější způsob polohy a měření pomocí malých laserových snímačů na konce vedení. Naneštěstí se ukázalo, že vyboulení dráhy a nutnost seřadit čidla přesně do osy kuličky jsou tak mechanicky náročná, že naprosto znemožňují jejich použití. Veškeré vodiče zařízení se vyměnily, udělala se deska plošných spojů, pro připojení čidel, servomotoru a propojení ovladače. Ovladač byl realizován s LCD displejem, tlačítky a enkodérem, které slouží pro ovládání zařízení. Deska, která se stará o výpočetní výkon, byla zvolena Arduino Mega. Pro měření polohy byl použit způsob pomocí vodivé gumy. Využitím exponenciálního filtru bylo docíleno zlepšení snímání polohy. Byl definován protokol přes sériovou linku, který slouží pro odesílání dat do jiného zařízení, které může dále data vyhodnocovat či vykreslovat. Dále je možné zařízení po přepnutí do vzdálené správy ovládat pomocí příkazů přes sériovou linku. Může se využít regulátor přímo v zařízení nebo externím výpočtem zpracovávat data a posílat do zařízení pouze akční veličinu. Je tedy možné vyzkoušet i jiné regulátory nebo metody regulace. Metodou relé ve zpětné vazbě se podařilo nastavit konstanty regulátoru tak, že regulátor byl schopný zařízení regulovat. Ručním nastavením konstant PID regulátoru se podařilo docílit lepší regulace než z jednorázového automatického nastavení.

## LITERATURA

ARDUINO, 2018. Getting Started with Arduino [online]. [cit. 2018-08-28]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>

LAZARIDIS, G. 2011 PID Theory [online]. Einhausen: New York, 2011 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: [http://www.pcbheaven.com/wikipages/PID\\_Theory/](http://www.pcbheaven.com/wikipages/PID_Theory/)

OSCAR, A. Servo Motor [online]. 2013 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <http://sweb.cityu.edu.hk/sm2608/styled-6/>

SHARP CORPORATION. GP2Y0E02A [online]. 2011 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: [https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0e02a\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0e02a_e.pdf)

ŠEDO, P. Multikoptéra [online]. Pardubice, 2016 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: [https://portal.upce.cz/StagPortletsJSR168/PagesDispatcherServlet?pp\\_destElement=%23ssSouboryStudentuDivId\\_511&pp\\_locale=cs&pp\\_reqType=render&pp\\_portlet=souboryStudentuPagesPortlet&pp\\_page=souboryStudentuDownloadPage&pp\\_nameSpace=G5776&soubidno=49841](https://portal.upce.cz/StagPortletsJSR168/PagesDispatcherServlet?pp_destElement=%23ssSouboryStudentuDivId_511&pp_locale=cs&pp_reqType=render&pp_portlet=souboryStudentuPagesPortlet&pp_page=souboryStudentuDownloadPage&pp_nameSpace=G5776&soubidno=49841).

HAYKIN, S. 1999. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation. Second Edition*. New Jersey: Prentice Hall. 842 p. ISBN 0-13-273350-1.

# **PŘÍLOHY**

**A – CD**

**Příloha k diplomové práci**  
Řídicí jednotka modelu Ball and beam  
Petr Šedo

**CD**

## **Obsah**

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF.
- 2 Úplný zdrojový kód aplikace.
- 3 3D modely vytvořených komponent.
- 4 Úplná schémata.
- 5 Vodivé obrazce DPS.