

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ LABORATORNÍHO MODELU  
KULIČKA NA TYČI**

**Bc. Filip Svoboda**

**Diplomová práce**

**2024**

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Svoboda**  
Osobní číslo: **I22194**  
Studijní program: **N0714A150005 Automatické řízení**  
Téma práce: **Konstrukce a řízení laboratorního modelu kulička na tyči**  
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a konstrukce mechanického laboratorního modelu kulička na tyči. Při jeho konstrukci bude u některých částí využita technologie 3D tisku. Řídicí systém modelu založený na zvoleném řídicím algoritmu bude realizován s využitím vhodného typu mikrokontroléru ve vybraném programovacím prostředí.

**Teoretická část:** Rešerše zadaného tématu a podrobný popis technického řešení konstrukce laboratorního modelu. Popis vybraného řídicího algoritmu. Popis problematiky návrhu vestavěných řídicích systémů s využitím mikrokontrolerů, vč. možností jejich programování.

**Implementační část:** Podrobný postup návrhu vlastní konstrukce laboratorního modelu. Vývoj software pro ovládání a diagnostiku činnosti modelu ve zvoleném vývojovém prostředí. Ověření funkce modelu v laboratorních podmínkách.

Rozsah pracovní zprávy: **cca 60 stran**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

DORF, Richard C.; Robert H. Bishop, 2017. *Modern Control Systems*. 13 vyd. Boston: Pearson. ISBN 978-0-13-440762-3.

PINKER, Jiří, 2008. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-110-0.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Kupka, Ph.D.**  
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **8. listopadu 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2024**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.** v.r.  
děkan

L.S.

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

V Pardubicích dne 14. listopadu 2023

## **Prohlášení autora**

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 20.05.2025

Bc. Filip Svoboda

## **Poděkování**

Zde bych chtěl poděkovat své rodině za finanční i psychickou podporu a taky za to, že mě podporovali a dali mi šanci vystudovat vysokou školu v těchto těžkých dobách. (Při válce na Ukrajině, Covidové krize a napadení Izraele hnutím Hamás.) Velmi bych chtěl také poděkovat vedoucímu mojí práce panu Ing. Kupkovi, Ph.D za zapůjčený materiál a za cenné rady ohledně mé práce.

V Pardubicích dne 20.05.2025

Bc. Filip Svoboda

## **ANOTACE**

*Cílem této práce je návrh a realizace mechanického laboratorního modelu „kulička na tyči“. Práce se zabývá možnostmi mechanické konstrukce tohoto modelu a jeho realizací. V dalších částech je popsán postup tvorby modelu a způsob jeho řízení.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*kulička na tyči, měření polohy, ATmega, LCD displej, automatizace*

## **TITLE**

***DESIGN AND CONTROL OF BALL AND BEAM LABORATORY MODEL***

## **ANNOTATION**

*The aim of this thesis is the design and implementation of a mechanical laboratory model of the "ball and beam" system. The thesis discusses the possibilities of the mechanical construction of the model and its practical realization. Subsequent sections describe the process of model development and the method of its control.*

## **KEYWORDS**

*ball and beam, position measurement, ATmega, LCD display, automation*

# OBSAH

	Seznam použitých zkratk a značek .....	9
	Seznam symbolů veličin a funkcí .....	11
	Seznam ilustrací .....	12
	Seznam tabulek .....	13
	Úvod .....	15
1	Literární řešerše.....	15
2	Popis modelu kulička na tyči .....	16
3	Principy modelování a regulace .....	17
3.1	Důležité parametry .....	17
3.1.1	Gravitační síla .....	17
3.1.2	Doba ustálení.....	17
3.1.3	Zanedbané síly .....	17
3.2	Model systému .....	18
3.2.1	Soustava .....	18
3.2.2	Regulace soustavy .....	18
4	Popis technického řešení modelu .....	24
4.1	Napájecí zdroj .....	24
4.2	Vývojový kit .....	25
4.2.1	Procesor.....	25
4.2.2	Displej .....	28
4.3	Rameno .....	30
4.3.1	Náklon ramene .....	30
4.3.2	Ovládání ramene .....	33
4.3.3	Měření polohy ramene .....	34
4.4	Realizace modelu .....	40
5	Popis vybraného řídicího algoritmu .....	41
5.1	Implementace PID algoritmu .....	41
6	Praktická část práce.....	43
6.1	Propojovací tabulka pinů .....	44
6.2	Výsledné konstrukční řešení .....	45
6.3	Napájení a výběr napájecího zdroje .....	45
6.4	Servomotor a jeho ovládání .....	46

6.5	Program mikropočítače .....	49
6.6	Praktické měření .....	51
7	Závěr .....	53
	Použitá literatura .....	54
	Přílohy .....	55

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ZNAČEK

3D	Three Dimensional – Třetí dimenze
3MF	3D Manufacturing Format
A	Anode – Anoda
A/D	Analog-to-Digital
ADC	Analog-to-Digital Converter
OCR1A	Output Compare Register 1 A
CAD	Computer-Aided Design – Počítačem podporovaný design
D	Derivační složka regulátoru
DPS	Deska Plošného Spoje
E	Enable – Aktivovat
EvB	Evaluation Board – Hodnoticí deska
G-code	Geometric Code – formát souboru v PC
GND	Ground – Zem
HW	Hardware
I	Integrační složka regulátoru
K	Cathode – Katoda
LCD	Liquid Crystal Display – Displej z tekutých krystalů
LED	Light-Emitting Diode – Elektroluminiscenční dioda
LQR	Linear Quadratic Regulator
MPC	Model Predictive Control – Model prediktivního řízení
NC	Not Connected – Nepřipojeno
ORO	Otevřený Regulační Obvod
P	Proporcionální složka regulátoru
PET-G	Polyethylene Terephthalate Glycol – Polyethylentereftalát
PID	Proportional–Integral–Derivative controller – Proporčně-Integrálně-Derivační regulátor
PLC	Programmable Logic Controller – Programovatelný logický automat
PWM	Pulse Width Modulation – Pulzně šířková modulace
RS	Register Select – Register Vybrat
RW	Read/Write – Čtení/zápis
SMC	Sliding Mode Control
SW	Software

UPS	Univerzální Plošný Spoj
URO	Uzavřený Regulační Obvod
USB	Universal Serial Bus – Univerzální sériová sběrnice
VCC	Voltage Common Collector – Společný kolektor napětí

## SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

$d(t)$	poruchové veličiny
$e(t)$	regulační odchylka
$f$	frekvence, Hz
$F_g$	gravitační síla, N
$g$	gravitační zrychlení, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
$I$	elektrický proud, A
$m$	hmotnost, kg
$R$	elektrický odpor, $\Omega$
$T$	perioda, s
$U$	elektrické napětí, V
$u(t)$	akční veličina
$w(t)$	žádaná veličina
$y(t)$	výstupní veličina

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Ukázka modelu (Taifour; Ahmed; Almahdi; Usama; Naseraldeen, 2017) .....	15
Obr. 2.1 – Zjednodušený model (Institut pro testování a certifikaci, 2018).....	16
Obr. 3.1 – Zpětnovazební řízení .....	19
Obr. 3.2 – Regulátor PID .....	20
Obr. 3.3 – Příklad regulace teploty regulátoru on/off (Dixell.cz).....	21
Obr. 4.1 – Napájení schéma (zadní část s konektory a vypínačem) .....	24
Obr. 4.2 – Vývojový kit EvB 5.1 v5.....	25
Obr. 4.3 – Schéma mikroprocesoru na EvB 5.1 .....	26
Obr. 4.4 – Mikroprocesor a jeho vstupy/výstupy (Lokhande, 2024).....	28
Obr. 4.5 – Zapnutý LCD display .....	28
Obr. 4.6 – LCD Displej schéma zapojení .....	29
Obr. 4.7 – Použitý servomotor.....	31
Obr. 4.8 – První typ modelu (Amjad; Kashif; Abdullah; Shareef, 2010).....	32
Obr. 4.9 – Druhý typ modelu (ASTI Automation SRL).....	32
Obr. 4.10 – Třetí typ modelu (University of Michigan, 2012) .....	33
Obr. 4.11 – PWM signál z PORT B4 (Svoboda, 2021).....	34
Obr. 4.12 – Potenciometr na stejném principu odp. snímače polohy (Schmid; kol., 2005).....	35
Obr. 4.13 – Indukční snímač polohy (Robu.in, 2020) .....	36
Obr. 4.14 – Kapacitní snímač polohy (ifm efector; Inc.).....	37
Obr. 4.15 – Optický snímač polohy (Celera Motion; Novanta Company).....	38
Obr. 4.16 – Schéma principu činnosti (EEEGUIDE.COM).....	39
Obr. 6.1 – Blokové schéma modelu.....	43
Obr. 6.2 – Celkové konstrukční řešení .....	45
Obr. 6.3 – Servomotor (Zapojení pinů) .....	47
Obr. 6.4 – Potenciometr (Pro ovládání PWM) .....	47
Obr. 6.5 – Odporový senzor.....	48
Obr. 6.6 – Vývojový diagram programu.....	49
Obr. 6.7 – Reakce systému pomocí metody pokus-omyl .....	51
Obr. 6.8 – Reakce systému na změnu žádané hodnoty s použitím PID regulace.....	52

## SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 – Piny Mikroprocesoru .....	27
Tab. 4.2 – Pinů LCD displeje .....	30
Tab. 4.3 – Významu pinů servomotoru .....	31
Tab. 6.1 – Zapojení všech vývodů pomocí propojovacích kabelů .....	44
Tab. 6.1 – Výsledné parametry PID .....	50

## ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá rekonstrukcí laboratorního modelu „kulička na tyči“. Model již existoval v základní mechanické podobě, a nebylo tedy cílem navrhovat nebo vyrábět jeho mechanickou část. Hlavním cílem práce je návrh a realizace nového řídicího systému, který umožní přesné řízení polohy kuličky na základě zpětné vazby a vybraného regulačního algoritmu. Přičemž výstupní data budou uložena nebo zobrazena. Součástí této práce je řešení na senzory měření polohy.

Řešení spočívá v implementaci mikrořadiče ATmega32A, který zajišťuje generování PWM signálu pro řízení servomotoru a zároveň zpracovává data z odporového snímače polohy. Na základě těchto dat je realizována regulace polohy kuličky na tyči, a to prostřednictvím PID algoritmu. Výstupy systému jsou zobrazeny na LCD displeji a zároveň lze sledovat odezvu systému v reálném čase.

Lze tuto práci využít pro pochopení měření polohy a jeho měření. Další možnosti využití jsou pochopení základního 3D tisku, odporového měření polohy či pochopení informací z dodaných příloh.

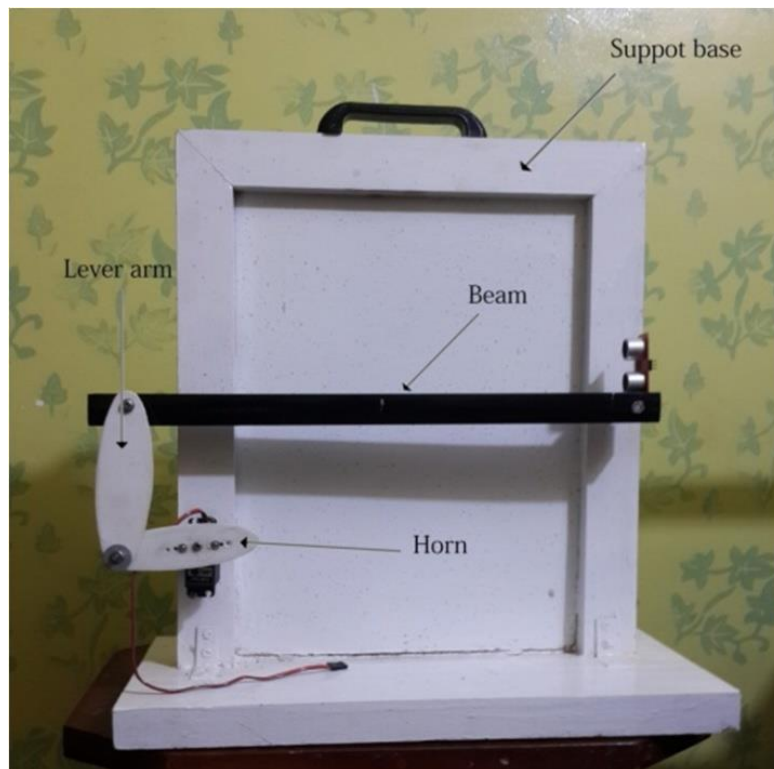
# 1 LITERÁRNÍ REŠERŠE

Téma "Konstrukce a řízení laboratorního modelu Kulička na tyči" je v oblasti automatického řízení a mechatroniky dobře známé.

Publikací, jenž se zabývají těmito pracemi a projekty je v oblasti řízení opravdu mnoho. Jeden podobný systém řešil Bc. Luboš Spaček (2016). Zabýval se dvourozměrným systémem navržený pro ovládání polohy a trajektorie míče na ploše.

Podobný model, jako je má diplomová práce je od pana Jakuba Křižana (2010), jenž řešil "Návrh a realizace výukového modelu Kulička na tyči"

Jedna z dalších publikací je realizována od několika autorů, kteří řešili model "Ball and Beam" (Kulička na tyči). Tento model byl řešen za pomoci ultrazvukového senzoru celý viditelný na Obr. 1.1.



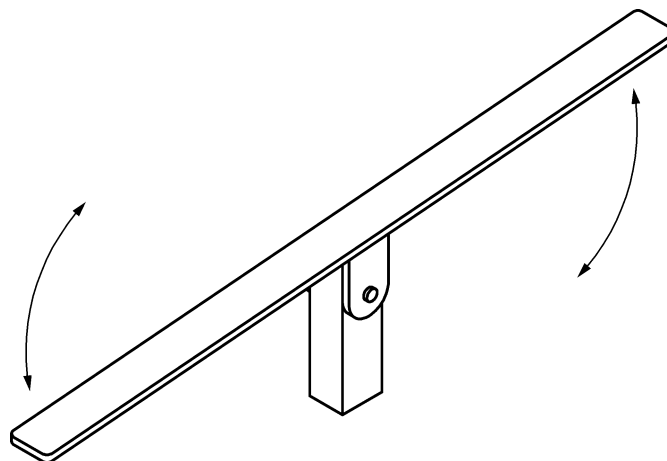
Obr. 1.1 – Ukázka modelu (Taifour; Ahmed; Almahdi; Usama; Naseraldeem, 2017)

Lze říci, že problematika konstrukce a řízení laboratorního modelu kuličky na tyči je nejen teoreticky zajímavá, ale také prakticky využitelná v oblasti automatického řízení a mechatroniky. Tento model slouží jako ideální experimentální platforma pro testování různých řídicích algoritmů a je široce využíván ve výuce i výzkumu.

## 2 POPIS MODELU KULIČKA NA TYČI

Jak již bylo zmíněno, tato práce se zaměřuje na model „kulička na tyči“. Tento model, jak napovídá samotný název, se skládá ze dvou hlavních prvků – kuličky a tyče. Tyto dvě klíčové součásti hrají zásadní roli při určování stability celého systému. Stabilita je definována jako stav, kdy tyč zůstává v požadované vodorovné poloze, zatímco kulička setrvává na určené žádané hodnotě (konkrétní poloze na tyči) s minimální, ideálně nulovou regulační odchylkou.

Model „kulička na tyči“ si můžeme představit jako balanční mechanismus podobný houpačce, přičemž kulička je umístěna na horní straně tyče (Obr. 2.1). Tento systém je klasickým příkladem problémů stabilizace a regulace, které se objevují v mnoha technických a přírodních procesech.



Obr. 2.1 – Zjednodušený model (Institut pro testování a certifikaci, 2018)

Stabilizační systémy, jako je tento, nacházejí široké uplatnění v různých oblastech. Příkladem může být lidská chůze, kdy tělo udržuje rovnováhu přirozeným přenosem váhy. Podobný princip funguje u jízdy na kole nebo na segwayi, kde jezdec neustále vyrovnává těžiště. Další aplikace zahrnují řízení dronů, které musí reagovat na změny směru a větrné podmínky, manipulaci s břemeny pomocí jeřábů, nebo zimní sporty, jako je snowboarding a lyžování, kde sportovec udržuje stabilitu při pohybu.

Z hlediska teorie řízení je model „kulička na tyči“ velmi užitečný jako ukázkový příklad pro analýzu stabilizačních algoritmů. Umožňuje testovat různé metody regulace, například proporcčně-integračně-derivační regulátory (PID), stavové regulátory či adaptivní řízení. Model je také vhodný pro simulaci a vývoj pokročilých algoritmů, jako jsou prediktivní regulátory (MPC) nebo metody využívající umělou inteligenci.

## 3 PRINCIPY MODELOVÁNÍ A REGULACE

Gravitace a dynamické síly jsou klíčovými faktory ovlivňujícími chování systému „kulička na tyči“. Tento model je klasickým příkladem dynamického systému s proměnlivou stabilitou, kde je nutné přesně měřit a analyzovat polohu, úhel natočení, dobu ustálení a další klíčové parametry. Pro lepší pochopení chování modelu je nezbytné zohlednit i síly, které na systém působí.

### 3.1 DŮLEŽITÉ PARAMETRY

#### 3.1.1 Gravitační síla

Gravitace na Zemi je určena gravitačním zrychlením  $g$ , které má průměrnou hodnotu

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}. \quad (3.1)$$

Tato síla působí na kuličku směrem k povrchu Země a je závislá na její hmotnosti  $m$ . Gravitační síla je vyjádřena vztahem

$$F_g = m \cdot g \text{ ; } N, \quad (3.2)$$

kde

$F_g$  – gravitační síla,

$m$  – hmotnost kuličky,

$g$  – gravitační zrychlení.

Gravitace hraje zásadní roli při určování dynamiky kuličky, protože ovlivňuje stabilitu a polohu systému při jeho vychýlení z rovnováhy.

#### 3.1.2 Doba ustálení

Doba ustálení je důležitým parametrem při hodnocení stability systému. V kontextu modelu „kulička na tyči“ se jedná o čas potřebný k tomu, aby kulička dosáhla žádané polohy na tyči a zůstala v ní s minimální regulační odchylkou. Tento čas se měří záznamem odezvy systému na vstupní změnu.

#### 3.1.3 Zanedbané síly

Při modelování systému je nutné provést zjednodušení, aby bylo možné systém efektivně řídit. Mezi síly, které jsou zanedbány je tření mezi kuličkou a povrchem tyče. Tření

je obvykle velmi malé, zejména pokud je povrch hladký nebo pokud je model navržen tak, aby minimalizoval kontakt.

V laboratorních podmínkách je proudění vzduchu zanedbatelné, protože model je obvykle chráněn před vnějšími vlivy, jako je vítr nebo turbulence.

Vliv teploty na model a jeho komponenty, jako je délka tyče nebo vlastnosti kuličky, se považuje za nevýznamný, pokud teplota zůstává v běžném rozmezí laboratorních podmínek.

## **3.2 MODEL SYSTÉMU**

Model systému je zjednodušený popis reálného systému, který slouží k pochopení, analýze nebo řízení jeho chování. Vytvoření modelu umožňuje zkoumat vlastnosti systému bez nutnosti pracovat přímo s reálným objektem. Model může mít různou podobu od slovního popisu přes matematické rovnice až po simulační schémata. V technické praxi se často využívají matematické modely, které popisují vztahy mezi vstupy, výstupy a stavovými veličinami systému.

Cílem modelování je získat nástroj, který věrně reprezentuje klíčové charakteristiky systému, a přitom zůstává dostatečně jednoduchý pro analýzu nebo simulaci.

### **3.2.1 Soustava**

Soustava je část reálného světa, kterou chceme řídit nebo analyzovat, přičemž se zaměřujeme na její vstupy, výstupy a dynamické chování. Může jít o mechanický, elektrický, tepelný, chemický nebo jiný technický systém, který reaguje na vnější podněty. Soustava může být pasivní nebo aktivní, přičemž její vlastnosti často určují volbu vhodného typu řízení. Při modelování soustavy se popisuje, jak se výstupy mění v závislosti na vstupech v čase, a to často pomocí diferenciálních rovnic nebo přenosových funkcí.

### **3.2.2 Regulace soustavy**

Regulátor je zařízení, jehož úkolem je řídit soustavu tak, aby výstup odpovídal požadované hodnotě. Toho dosahuje tím, že na základě měřeného výstupu a požadovaného stavu vypočítává vhodný řídicí zásah a aplikuje jej na vstup soustavy. Regulátory mohou být navrženy různými způsoby, přičemž nejběžnější je PID regulátor, který kombinuje rychlou reakci, eliminaci trvalé regulační odchylky a tlumení oscilací. Regulátory rozdělujeme do dvou typů. A to spojité a diskrétní.

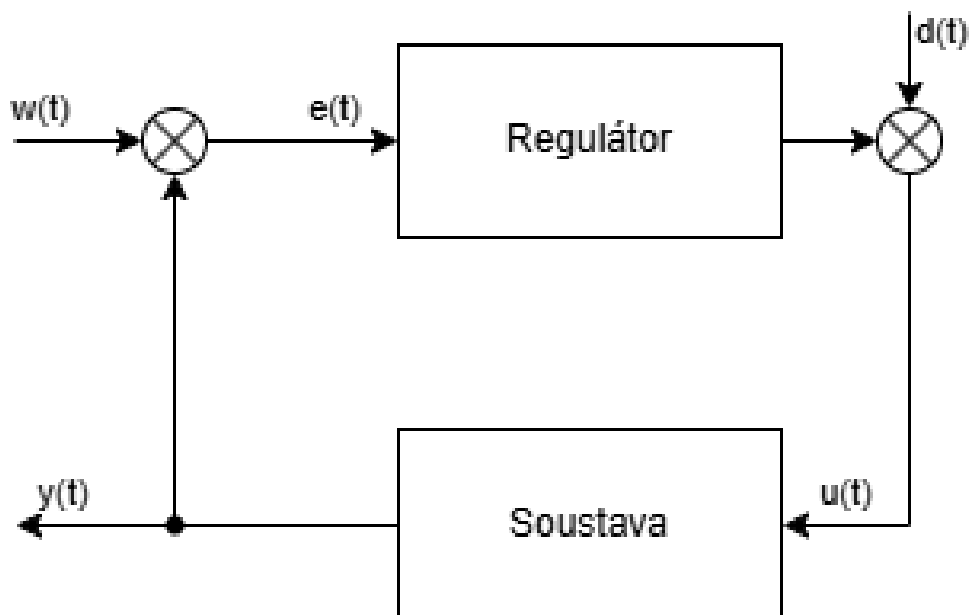
Spojité neboli analogové regulátory pracují s analogovými signály a jejich signál je spojitý. Zatím, co diskrétní neboli číslicové regulátory pracují s digitálním signálem a jejich signál je časově vzorkovaný signál (ve zvolených časových okamžicích).

Nejjednodušší regulovaný obvod je ORO neboli otevřený. Tento obvod je bez zpětné vazby, tím pádem není schopný reagovat na poruchy či vnější vlivy. Proto se nejčastěji používá URO neboli uzavřený, který tento problém řeší za pomoci regulační odchylky  $e(t)$ . Celý URO je vidět na Obr. 3.1 kde:

- $d(t)$  – poruchové veličiny (vnější vlivy),
- $e(t)$  – regulační odchylka,
- $u(t)$  – akční veličina,
- $w(t)$  – žádaná veličina,
- $y(t)$  – výstupní veličina.

Regulační odchylka je rozdíl mezi skutečnou polohou kuličky a žádanou hodnotou. V případě laboratorního modelu je žádoucí, aby tato odchylka byla co nejmenší, ideálně nulová. Výpočet regulační odchylky je klíčový pro hodnocení kvality řízení:

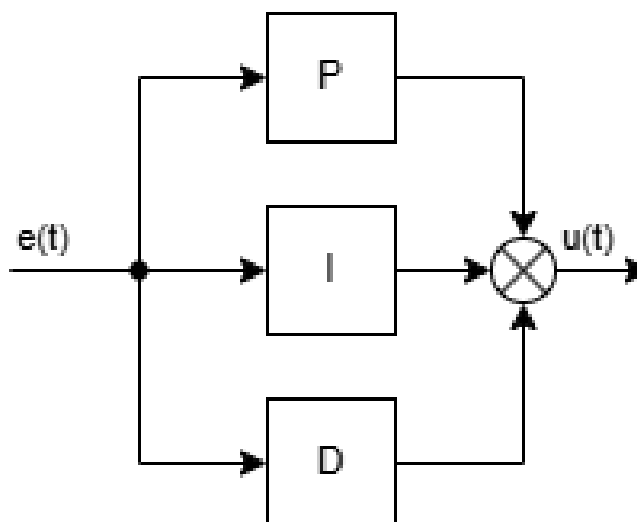
$$e(t) = w(t) - y(t); \quad (3.3)$$



Obr. 3.1 – Zpětnovazební řízení

## A. PID

Jak již bylo zmíněno, nejběžnějším typem regulátoru v oblasti automatizace a řízení je PID regulátor (Obr. 3.2). Každá z těchto složek má specifický vliv na chování řízeného systému a lze je podle potřeby kombinovat, nebo naopak některé vynechat.



Obr. 3.2 – Regulátor PID

Proporcionální zajišťuje základní reakci systému na regulační odchylku. Její úlohou je zesílit odchylku mezi žádanou a skutečnou hodnotou, čímž přímou úměrou ovlivňuje výstup regulátoru. Při vyšším zesílení však může dojít k rozkmitání nebo nestabilitě systému, proto je třeba volit tento parametr obezřetně.

Integrační slouží ke kompenzaci trvalé regulační odchylky, která může u samotné P regulace zůstat nenulová. Integrací odchylky v čase se výstup regulátoru postupně upravuje tak, aby se i malá, ale trvalá chyba v regulaci odstranila. Tato složka tak zvyšuje přesnost systému, ale zároveň může zpomalit jeho reakci a přispět k překmitům.

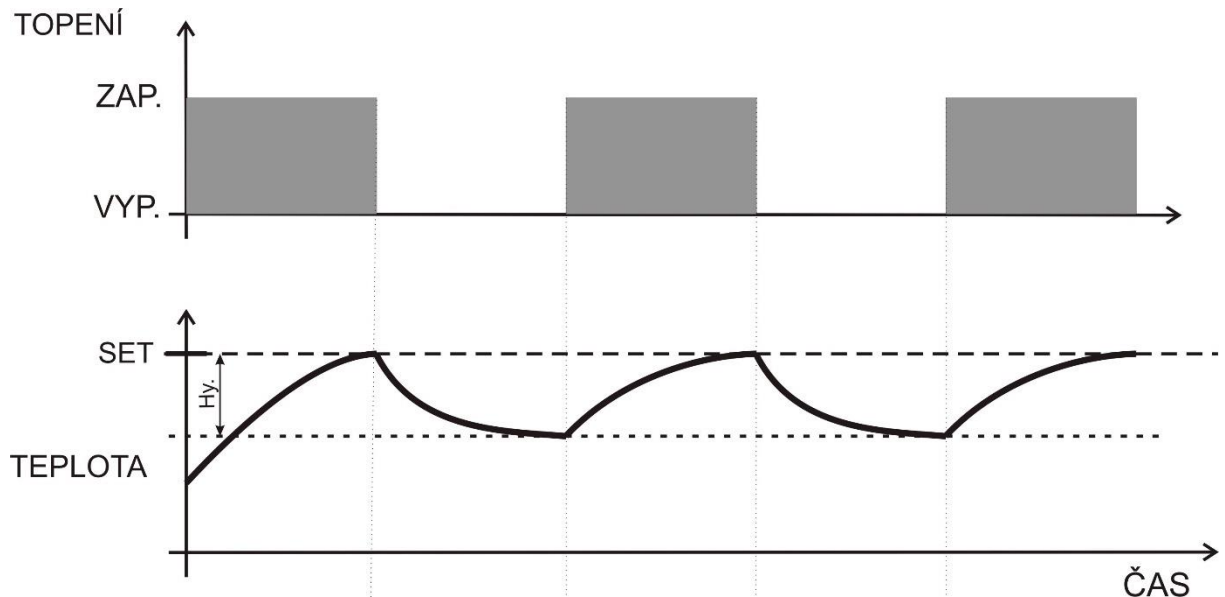
Derivační naopak reaguje na rychlost změny regulační odchylky. Její účel spočívá v predikci budoucího chování systému na základě aktuálního trendu změn. Tímto způsobem dokáže regulační zásah zpomalit či předběhnout, čímž se snižuje překmit a zvyšuje stabilita celého systému. Derivační složka, ale může být citlivá na šum v měřeném signálu, proto je nutné její použití pečlivě zvážit.

PID regulátor lze tedy použít jako P, I, D, PI, PD a PID. Přičemž ID regulátor se prakticky nepoužívá, protože jí chybí proporcionální složka. To vede k pomalejšímu nástupu reakce regulátoru, což je nežádoucí v drtivé většině praktických aplikací.

## B. ON/OFF REGULÁTOR

Jedná se o nejjednodušší typ regulace, taktéž nazývaná dvoupolohová regulace. Regulátor nepracuje s velikostí odchylky, ale pouze s tím, zda odchylka existuje a jakého je směru. Neprovádí žádný výpočet regulačního zásahu pouze přepíná mezi dvěma pevně danými výstupy.

Lze si to, tedy představit jako regulaci teploty topení na Obr. 3.3. Horní graf obrázku představuje zapínání a vypínání topení v čase. Přičemž spodní graf ukazuje vývoj teploty v čase. Pokud tedy teplota klesne pod dolní mez, regulátor zapne topení. To způsobí růst teploty, a když teplota přesáhne horní mez regulátor topení vypne. Tím teplota začne znovu klesat, a cyklus se opakuje.



Obr. 3.3 – Příklad regulace teploty regulátoru on/off (Dixell.cz)

V případě této práce je úkolem regulátoru řídit polohu kuličky, což je systém s poměrně plynulou dynamikou, u kterého může dvoupolohová regulace způsobovat oscilační chování a nižší přesnost řízení.

### C. STAVOVÝ REGULÁTOR

Stavový regulátor při řízení využívá stavový popis systému, tzv. stavový prostor. Tento popis vychází z modelování systému pomocí všech důležitých vnitřních proměnných (tzv. stavů), které ovlivňují jeho dynamické chování. Stavový popis bývá zpravidla vyjádřen ve tvaru soustavy lineárních diferenciálních rovnic:

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t), \quad (3.3)$$

$$y(t) = \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t), \quad (3.4)$$

kde:

- $x(t)$  – je stavový vektor,
- $u(t)$  – je vstupní vektor,
- $y(t)$  – je výstupní vektor,
- $\mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{C} \mathbf{D}$  – jsou matice systému popisující dynamiku, vstupní a výstupní vazby.

Tento popis samotný neobsahuje řídicí zákon – pouze modeluje chování systému. Regulace jako taková se realizuje až pomocí přidání zpětné vazby, ve tvaru:

$$u(t) = -\mathbf{K}x(t), \quad (3.5)$$

čímž vzniká stavová zpětnovazební regulace.

### D. DISKRÉTNÍ REGULÁTOR

Řízení probíhá v diskrétním čase. Tedy výpočty se provádějí v časových krocích (vzorkovací intervaly), nikoli spojitě. Používá se všude tam, kde je řízení realizováno mikroprocesorem, protože je číslicový.

Diskrétní regulace je často tvořena převodem spojitého modelu do diskrétní formy pomocí numerických metod (např. Z-transformace, Eulerova metoda apod.) a její návrh se přizpůsobuje vzorkovacím podmínkám.

## **E. DALŠÍ TYPY ŘÍZENÍ**

Existuje veliké množství způsobů regulace, tady jsou některé další:

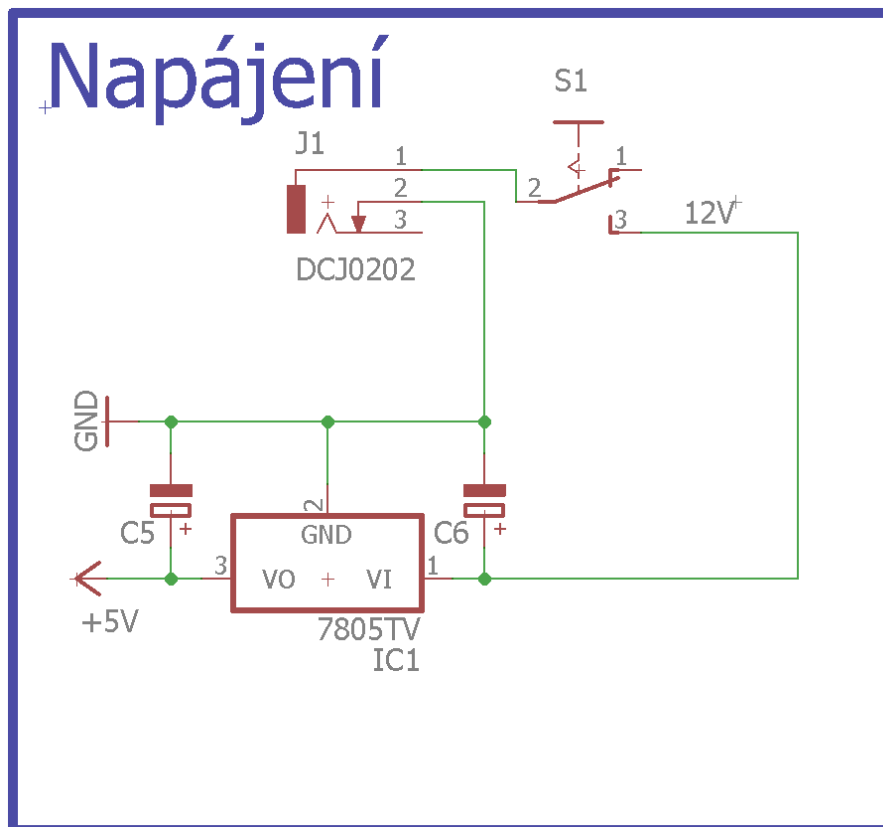
- fuzzy logika,
- adaptivní regulátor,
- neuronová síť,
- LQR,
- rozhodovací logika,
- SMC,
- robustní regulátor a spousta dalších.

## 4 POPIS TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ MODELU

### 4.1 NAPÁJECÍ ZDROJ

Pro napájení byl vybrán model Sunny SYS1546-3612-T2. Stejně jako v mojí bakalářské práci. Výstupní napětí zdroje je 12 V DC a jeho maximální proud je 3 A. Tento obvod je na Obr. 4.1, které slouží k napájení servomotoru.

Na Obr. 4.2 níže je možné vidět připojení přes USB. Slouží jednak k napájení kitu, ale také k jeho programování.

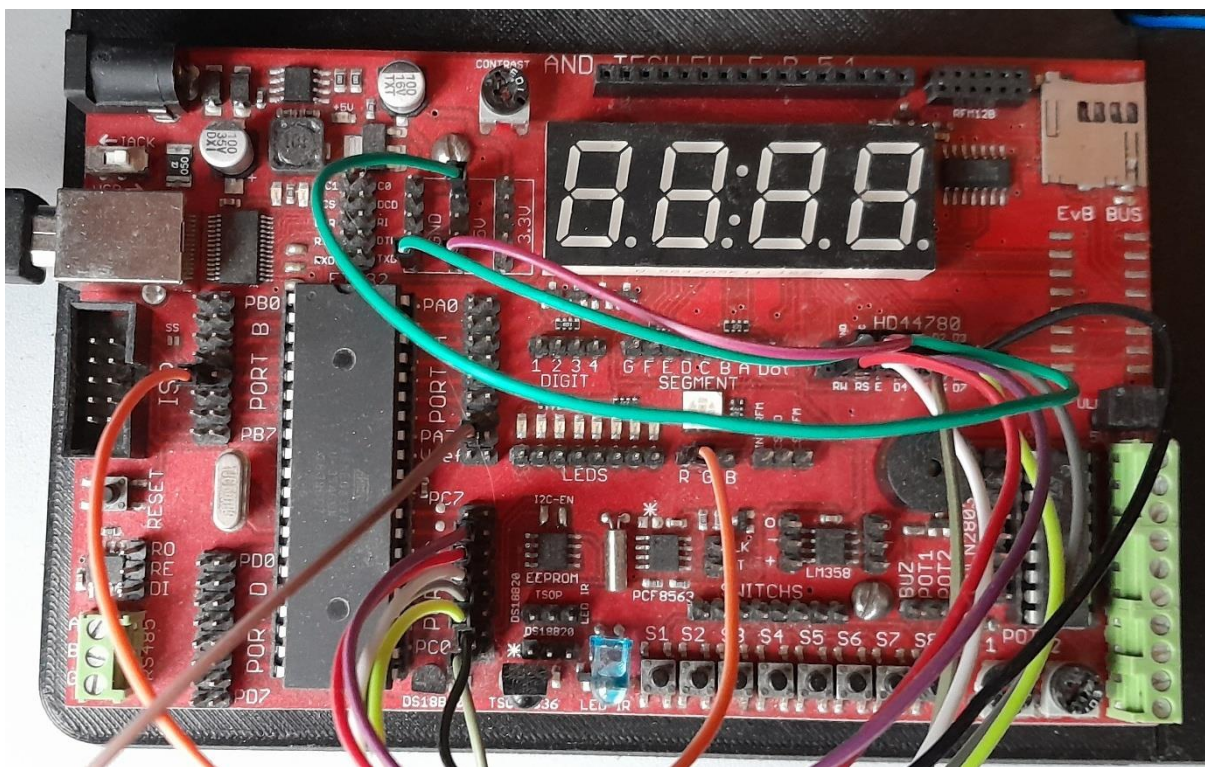


Obr. 4.1 – Napájení schéma (zadní část s konektory a vypínačem)

## 4.2 VÝVOJOVÝ KIT

Pro tuto práci stejně jako pro moji bakalářskou práci jsem použil vývojový kit EvB 5.1 v5. „Obsahuje procesor ATmega32 a spoustu dalších periférií na naprogramování. Například 7 LED display, tlačítka, bzučák, IR LED, EEPROM, infračervený snímač, 8 indikačních LED, jednu RGB diodu a další.“ (Bc. Svoboda, 2021)

Vše kromě LCD co je součástí kitu je možné vidět na Obr. 4.2.

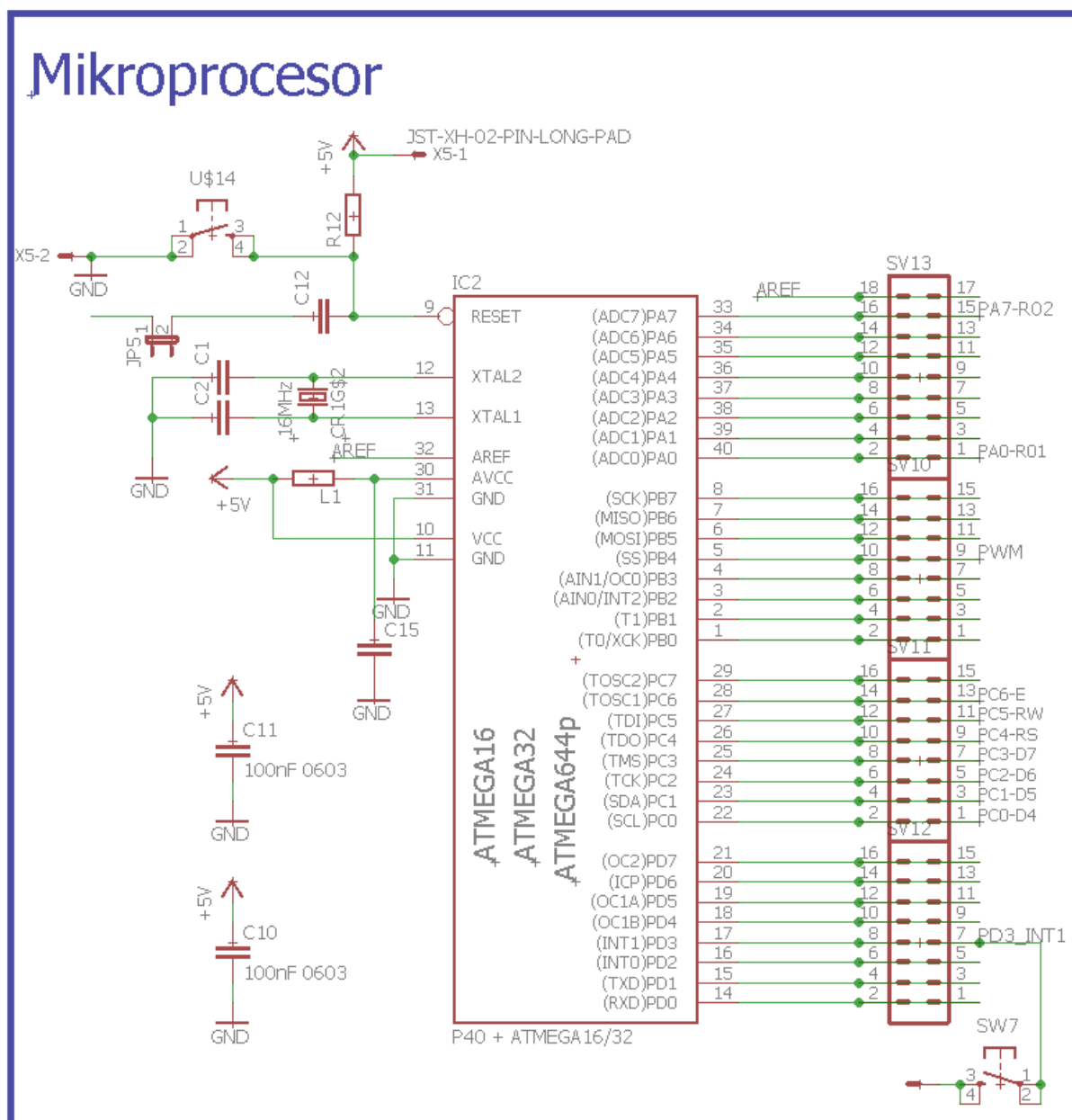


Obr. 4.2 – Vývojový kit EvB 5.1 v5

### 4.2.1 Procesor

Mikroprocesor je základní součást moderních elektronických zařízení, která slouží jako centrální výpočetní jednotka (CPU). Jde o integrovaný obvod obsahující miliony tranzistorů, které vykonávají aritmetické a logické operace na základě strojového kódu. V mém případě se jedná o typ ATmega32A.

Používají se v širokém spektru zařízení, od osobních počítačů a mobilních telefonů až po vestavěné systémy v automobilech, domácí elektronice nebo průmyslových automatech. Jejich hlavní funkcí je zpracování instrukcí z paměti, řízení dalších komponent systému a provádění výpočtů nezbytných pro správný chod zařízení.



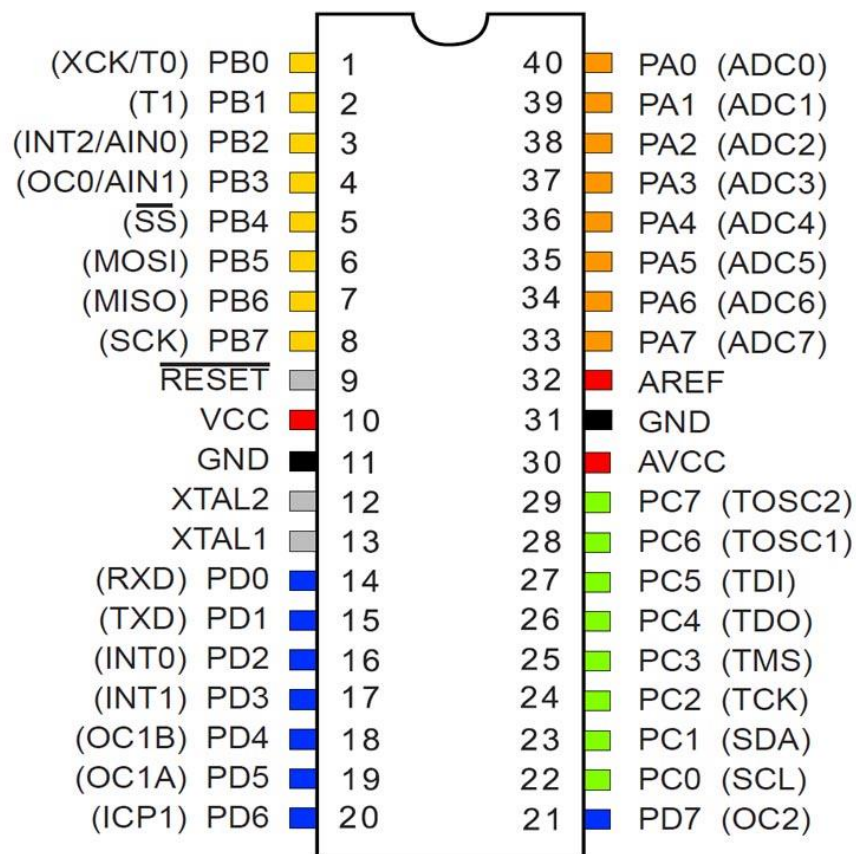
Obr. 4.3 – Schéma mikroprocesoru na EvB 5.1

Na dalším Obr. 4.3 je vidět samotné schéma zapojení mikroprocesoru ATmega32A. Tento obrázek představuje část DPS a jsou zde vidět programovatelné vývody z procesoru port A, port B, port C a port D, pro lepší představu znázorněn Obr. 4.4, které jsou vysvětleny v Tab. 4.1.

Na porty jsou napojeny různé komponenty, které jsou na vývodech portů na Obr. 4.3 označeny (Podobně jako PD3\_IN1, které je spojeno s tlačítkem). A v levé části obrázku je zobrazeno resetovací tlačítko, které se používá k resetování celého kitu.

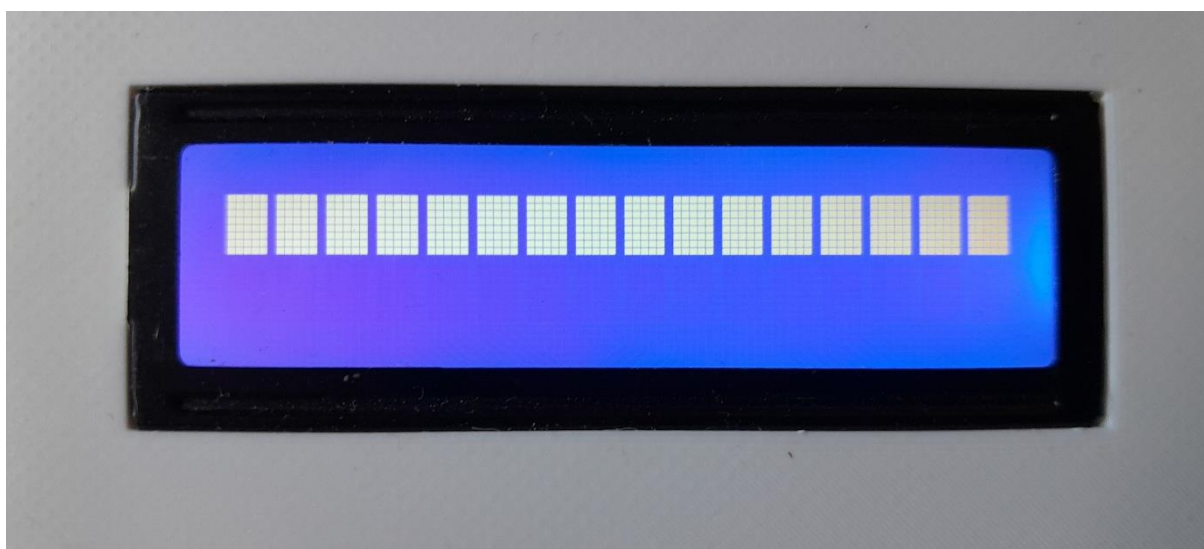
Tab. 4.1 – Piny Mikroprocesoru

PIN	Označení pinu	Význam pinů
1	PB0	T0 – externí vstup čítače Timer0 XCK – externí hodinový signál pro USART
2	PB1	T1 – externí vstup čítače Timer1
3	PB2	AIN0 – kladný vstup analogového komparátoru INT2 – externí přerušení 2
4	PB3	AIN1 – záporný vstup analogového komparátoru OC0 – výstup komparační jednotky Timer0
5	PB4	SS – výběr SPI slave zařízení (Slave Select)
6	PB5	MOSI – výstup SPI (Master Out Slave In)
7	PB6	MISO – vstup SPI (Master In Slave Out)
8	PB7	SCK – hodinový signál SPI sběrnice
9	RESET	Vstupní pin pro resetování mikrokontroléru (aktivní v logické 0)
10	VCC	Napájecí napětí (+5V)
11	GND	Zem
12	XTAL2	Výstup oscilátoru
13	XTAL1	Vstup oscilátoru
14	PD0	RXD – přijímací pin USART (sériová komunikace)
15	PD1	TXD – vysílací pin USART (sériová komunikace)
16	PD2	INT0 – externí přerušení 0
17	PD3	INT1 – externí přerušení 1
18-19	PD4-5	OC1B/OC1A – výstupy PWM kanálů Timer1
20	PD6	ICP1 – vstup pro zachycení hodnoty čítače Timer1
21	PD7	OC2 – výstup komparační jednotky Timer2
22-23	PC0-1	SDA/SCL – piny pro TWI/PC rozhraní
24-27	PC2-5	Piny rozhraní JTAG (pro ladění a programování)
28-29	PC6-7	TOSC1/TOSC2 – vstupy oscilátoru pro Timer
30	AVCC	Napájení pro analogový obvod (A/D převodník)
31	GND	Druhý zemní pin (pro A/D sekci)
32	AREF	Referenční napětí pro A/D převodník
33-40	PA7-0	I/O port A – většinou využité jako analogové vstupy



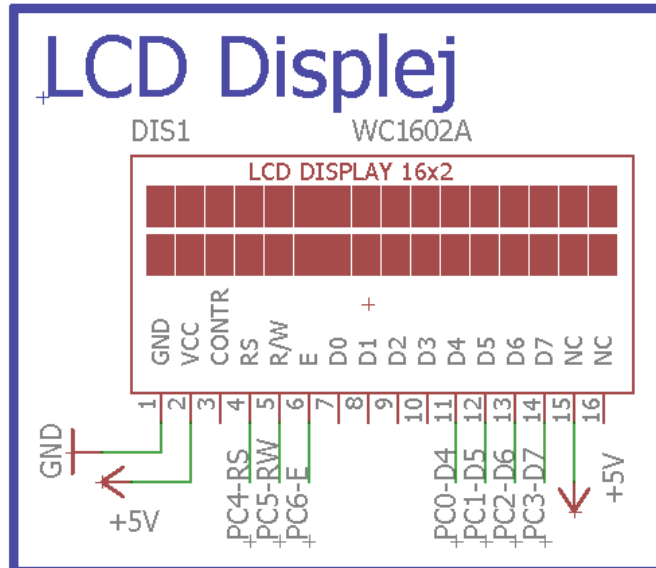
Obr. 4.4 – Mikroprocesor a jeho vstupy/výstupy (Lokhande, 2024)

#### 4.2.2 Displej



Obr. 4.5 – Zapnutý LCD display

Displej byl zvolen originální součástí EvB kitu. Jedná se o LCD display se standartním řadičem HD44780 v konfiguraci  $2 \times 16$  znaků. Na Obr. 4.5 je možné vidět první řádek s 16 nenastavenými znaky (segmenty) pro zobrazení. Každý segment má  $5 \times 8$  pixelů.



Obr. 4.6 – LCD Displej schéma zapojení

Pro připojení LCD je dobré znát jednotlivé piny displeje a co dělají. Podrobný popis je v tabulce Tab. 4.2 a taktéž je zobrazen na Obr. 4.6.

Tab. 4.2 – Pinů LCD displeje

PIN	Označení pinu	Význam pinů
1	VSS	Uzemnění (GND)
2	VDD	Napájení (+5 V)
3	V0 or VE	Kontrast displeje (Contrast)
4	RS	Určuje, zda se jedná o data nebo instrukce pro řadič (Register Select)
5	R/W or RW	Rozlišuje a čte data z LCD (Read/write)
6	E	Řídí vzorkování (Enable signal)
7	D0	Datový bit 0 (používá se v 8bitovém režimu).
8	D1	Datový bit 1 (používá se v 8bitovém režimu).
9	D2	Datový bit 2 (používá se v 8bitovém režimu).
10	D3	Datový bit 3 (používá se v 8bitovém režimu).
11	D4	Datový bit 4 (používá se v 4bitovém i 8bitovém režimu).
12	D5	Datový bit 5 (používá se v 4bitovém i 8bitovém režimu).
13	D6	Datový bit 6 (používá se v 4bitovém i 8bitovém režimu).
14	D7	Datový bit 7 (používá se v 4bitovém i 8bitovém režimu).
15	A or NC	Anoda podsvícení (+5 V)
16	K or NC	Katoda podsvícení (GND)

U některých typů displejů není 15 a 16 pin, protože u všech typů není podsvícení, proto se také někdy označují NC. Displej lze také připojit dvěma hlavními způsoby ve dvou režimech datové komunikace, a to 8bitovém nebo 4bitovém režimu.

### 4.3 RAMENO

Rameno je hlavní částí modelu s drážkou, ve které se pohybuje kulička. Její poloha na rameni se dá určit několika snímači polohy. Proto bylo dobré si dobře rozmyslet jaký snímač a typ náklonu bude použit. V mém případě je to však odporový snímač na bázi potenciometru.

#### 4.3.1 Náklon ramene

Nejdůležitější částí modelu je samotný náklon ramene neboli to, co tento náklon bude vykonávat. Proto bylo potřeba nejdříve vyřešit akční člen modelu. Samotný náklon se dal řešit několika neúnosnými způsoby. Ovšem tyto metody by nevedly k nulové regulační odchylce. A

proto se v dnešní době používají na tyto operace motory, které mohou zůstat a držet v jedné poloze.

Tento typ motorů se nazývá servomotor. Je schopný natočit rotor na přesnou polohu osy a tím zajistit stabilitu systému (pokud je to potřeba).

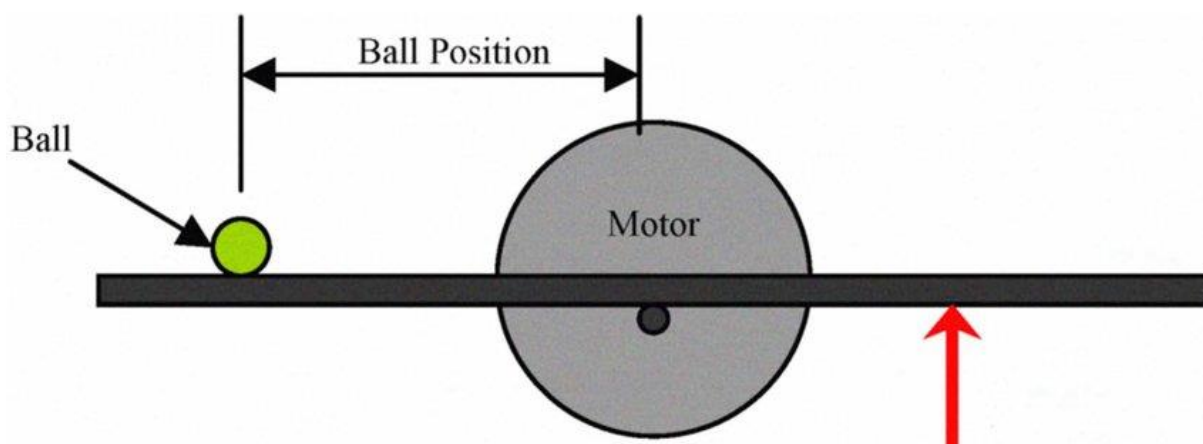


Obr. 4.7 – Použitý servomotor

Tab. 4.3 – Významu pinů servomotoru

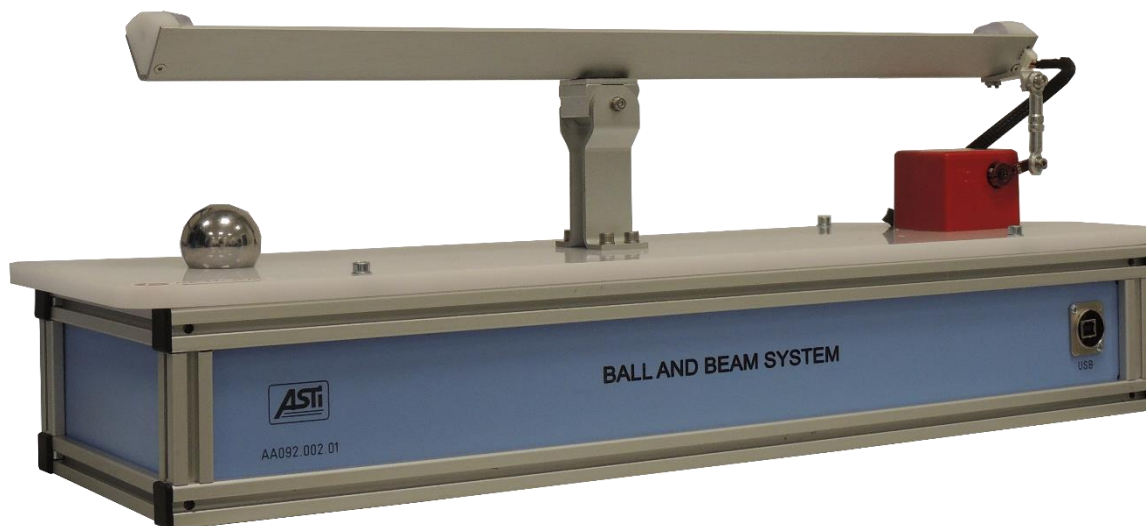
PIN	Označení pinu	Význam pinů	Barva	Odstín
1	GND	Uzemnění servomotoru	Černá	Black
2	5 V	Napájení servomotoru	Červená	Red
3	CONTROL	Ovládání servomotoru	Žlutá	Yellow

Umístění akčního členu v modelu lze udělat několika způsoby. Záleží i na umístění osy ramene (rotoru) podle, které se rameno houpe.



Obr. 4.8 – První typ modelu (Amjad; Kashif; Abdullah; Shareef, 2010)

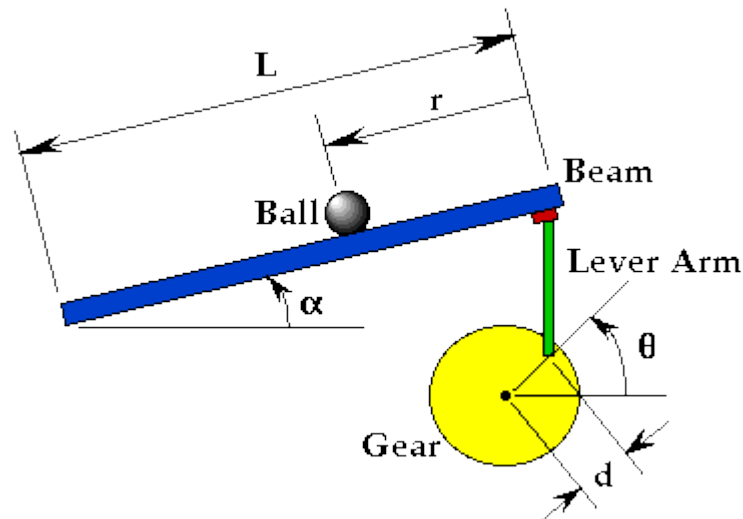
Nejjednodušší způsob, který lze vymyslet, je umístit motor přímo s osou (Obr. 4.8 neboli osa modelu a rotor jsou jedním). Tímto způsobem zajistíme jednoduchý náklon stejně jako na dětské houpačce. Ovšem čím větší rameno a náklon bude, tím těžší bude zvednout váhu na konci ramene. Díky tomu bude potřeba u tohoto typu motor s velkým momentem a velkou přesností úhlu natočení. Taktéž je nevýhoda, že pokud by došlo k poškození motoru a rotor by nebyl mechanicky oddělitelný od osy tyče modelu. Muselo by se v takovém případě rozdělat celé rameno modelu, aby bylo možné motor vyměnit.



Obr. 4.9 – Druhý typ modelu (ASTI Automation SRL)

Dalším způsobem, který jsem použil i já, je samozřejmě vložit akční člen na konec jedné části ramene a osa zůstane na stejném místě jako předtím. (Obr. 4.9) V tomto případě motor

jednou tlačí na rameno a v druhém tahá. A to, ať už motor vložíme pod rameno nebo, ho umístíme nad něj.



Obr. 4.10 – Třetí typ modelu (University of Michigan, 2012)

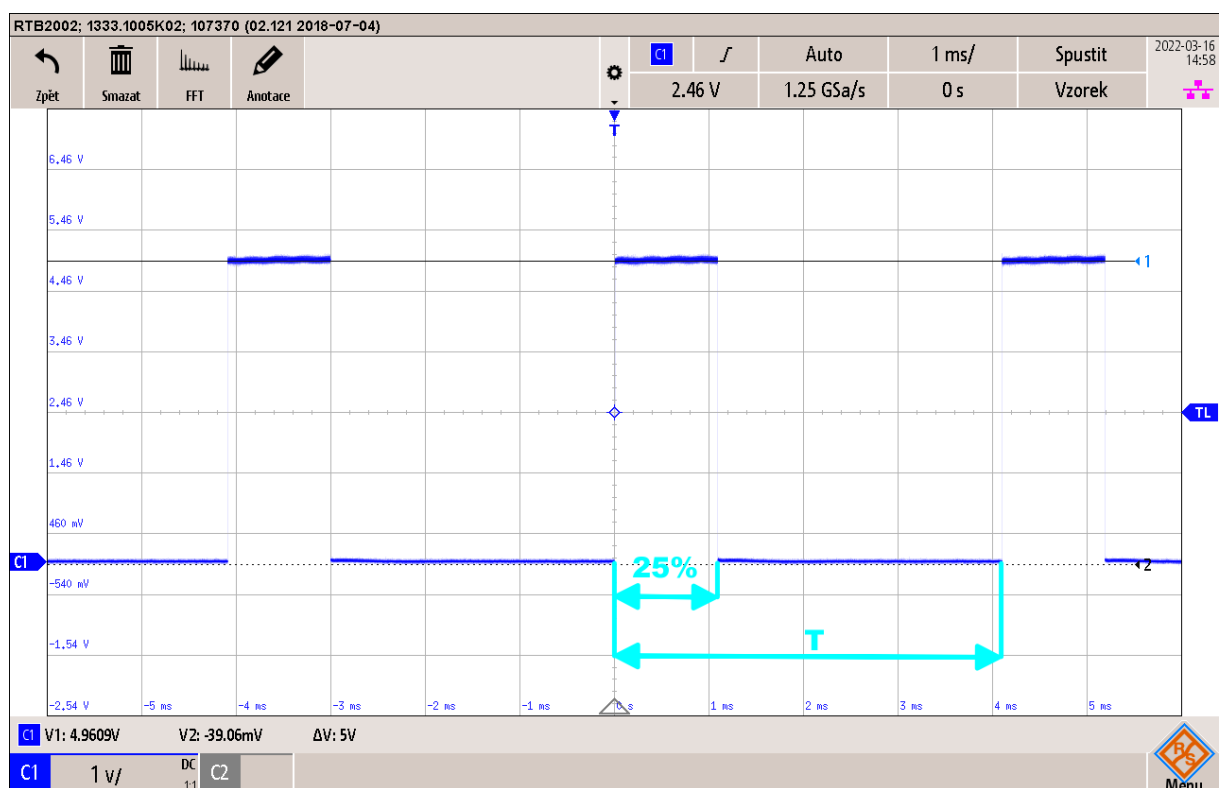
A posledním typem, který jsem vyzkoušel (pokud nevkládáme do modelu více akčních členů) je stejný jako předchozí, ovšem osu natočení ramene vložíme na opačnou stranu, co akční člen (Obr. 4.10). To způsobí, že úhel náklonu je větší oproti ose a tím kulička reaguje rychleji. To bohužel hodně ovlivní stabilitu. Čím tedy kulička bude dále od motoru, tím těžší ji bude stabilizovat (kromě koncových bodů).

#### 4.3.2 Ovládání ramene

Protože už bylo řečeno, že bude použit servomotor, bylo na místě to, aby bylo možné ho správně ovládat. A přesto, že je možné použít PLC, jsem se rozhodl jít cestou nejnižšího odporu jako proud a použít PWM signál. A to hlavně proto, že ATmega32A tento signál umožňuje.

Tento signál pro řízení výkonu elektrických zařízení funguje pomocí rychlého přepínání mezi zapnutým a vypnutým stavem. Základním principem je změna střídy signálu, tedy poměru mezi dobou, kdy je signál aktivní (logická 1), a dobou, kdy je neaktivní (logická 0), během jednoho cyklu. PWM je hojně využíván v elektronice a automatizaci, protože umožňuje energeticky efektivní řízení výkonových zařízení bez výrazných ztrát tepla, které by vznikaly při analogové regulaci napětí.

Signál PWM je zvláště vhodný pro řízení servomotorů, protože umožňuje přesné nastavení jejich polohy. Servomotory používané v robotice nebo modelářství typicky přijímají řídicí signál ve formě PWM s pevnou frekvencí, kde šířka impulzu určuje požadovaný úhel natočení serva. Díky PWM lze servomotor přesně a opakovaně nastavit do požadovaného úhlu s minimálním energetickým odběrem, což z něj činí ideální součást pro aplikace, které vyžadují přesné mechanické pohyby, jako jsou robotické paže, řízení kormidel nebo průmyslové automatizované systémy. Ukázka tohoto signálu je zobrazena na Obr. 4.11, kde je patrný PWM signál s periodou  $T$ . Z grafu je zřejmé, že signál dosahuje logické úrovně 1 po dobu 25 % periody, zatímco po zbývajících 75 % je v logické úrovni 0.



Obr. 4.11 – PWM signál z PORT B4 (Svoboda, 2021)

### 4.3.3 Měření polohy ramene

#### A. Odporové snímače polohy

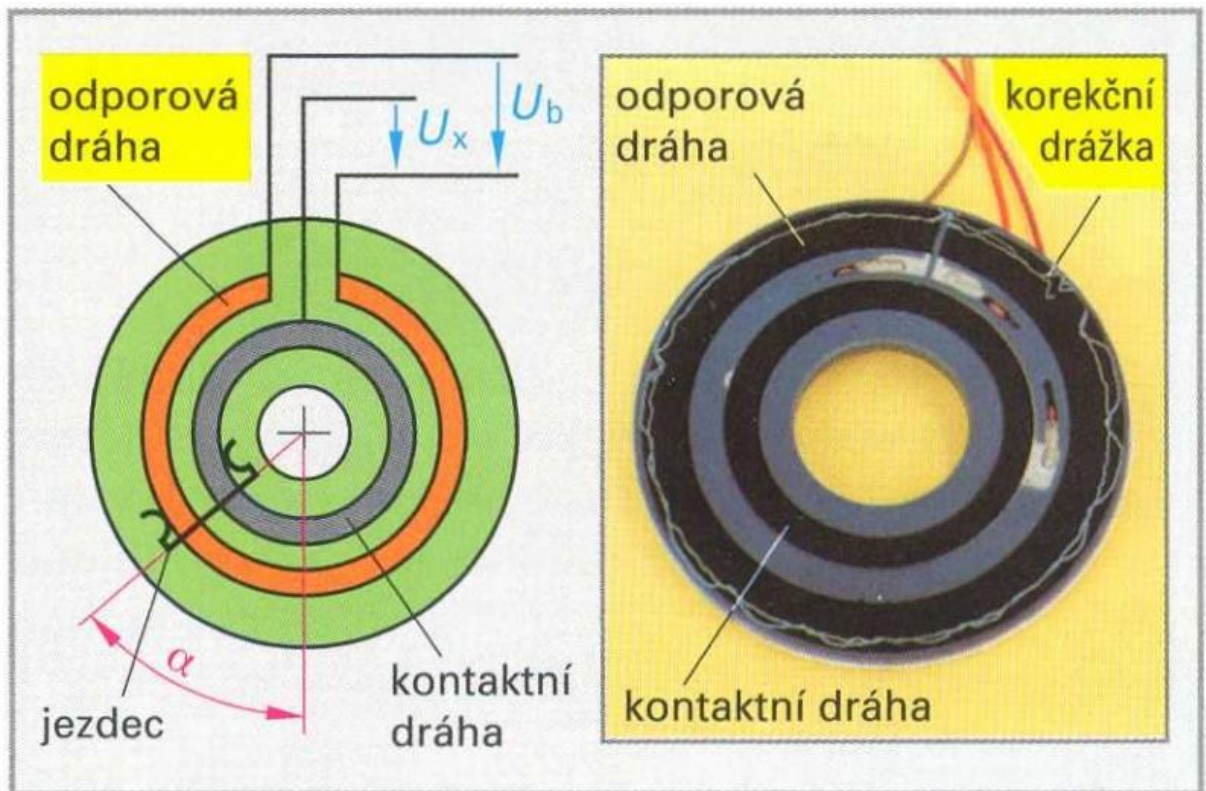
Odporové snímače polohy využívají princip změny elektrického odporu k měření polohy (Obr. 4.12). Odpor je fyzikální veličina, která udává, jak silně materiál brání průchodu elektrického proudu. Je měřen v ohmech a podle Ohmova zákona, který je vyjádřen rovnicí:

$$U = I \cdot R . \quad (4.1)$$

Platí, že při konstantním napětí  $U$  se proud  $I$  mění s ohledem na hodnotu odporu  $R$ . Vyšší odpor tedy znamená menší proud, což je zásadní při převodu mechanického pohybu na elektrický signál.

V případě spojitého měření se nejčastěji využívají lineární a otočné potenciometry. U těchto zařízení je odporová dráha vyrobena z vodivého plastu, který je odolný vůči opotřebení. Princip jejich činnosti spočívá v postupné změně délky kontaktu mezi pohyblivým jezdcem a odporovou dráhou. Jak jezdec mění svou polohu, mění se i celkový odpor obvodu, což umožňuje přesné určení aktuální polohy měřeného objektu.

Kromě kontinuálního měření se často pro indikaci polohy používají také koncové spínače. Tyto spínače přeměňují změnu polohy na mechanický pohyb kontaktu a signalizují tak dosažení určité krajní polohy, což je užitečné zejména pro bezpečnostní a referenční účely.

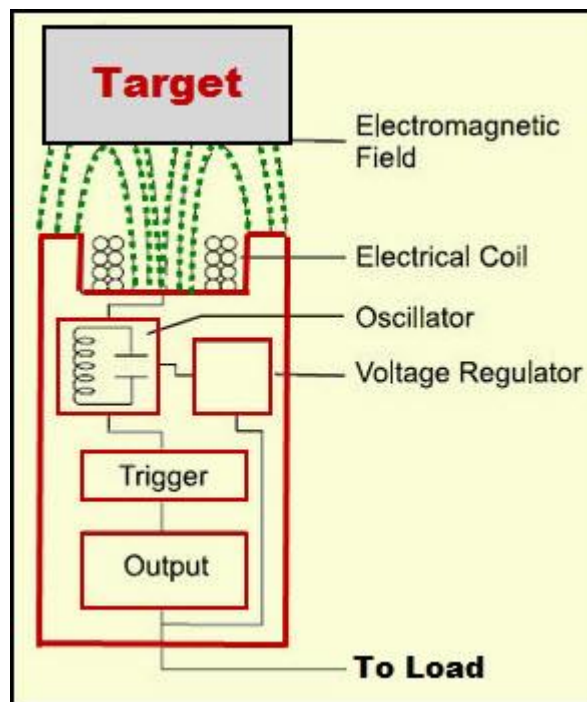


Obr. 4.12 – Potenciometr na stejném principu odp. snímače polohy (Schmid; kol., 2005)

## B. Indukční snímače polohy

Využívají princip elektromagnetické indukce ke stanovení polohy kovových objektů. Elektromagnetická indukce je fyzikální jev, při kterém se při změně magnetického pole v cívce vytváří indukované napětí. Tento princip je popsán Faradayovým zákonem, který říká, že změna magnetického pole v čase indukuje elektrické napětí, jehož velikost závisí na rychlosti této změny a konstrukci cívky.

V indukčních snímačích se obvykle používá vysílací cívka, která vytváří vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Jakmile se kovový terč nebo objekt přiblíží k senzoru, přítomnost kovu ovlivní toto pole, což vede ke změně indukčnosti v přijímací cívce. Tato změna je následně převedena na elektrický signál, který odpovídá poloze objektu (Obr. 4.13).

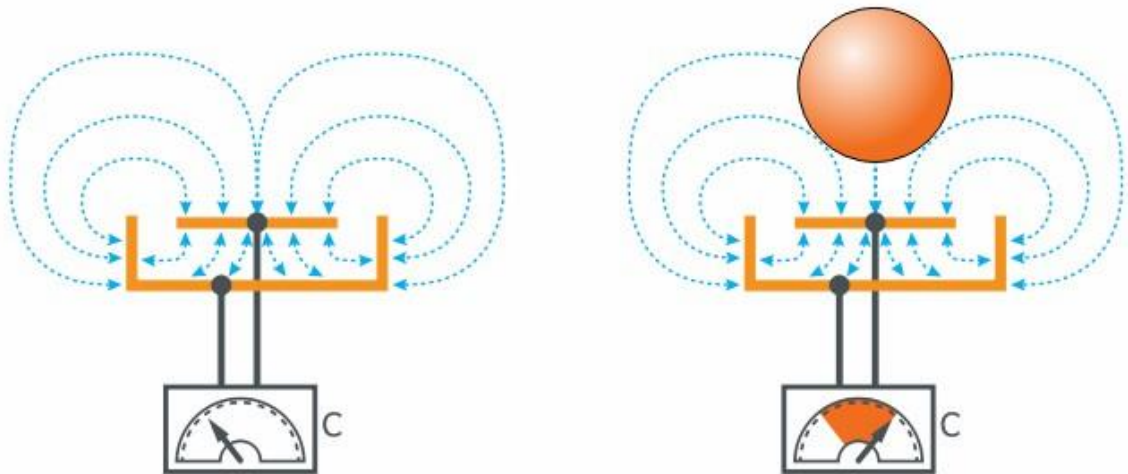


Obr. 4.13 – Indukční snímač polohy (Robu.in, 2020)

### C. Kapacitní snímače polohy

Kapacitní snímače polohy využívají princip měření kapacity kondenzátoru, což je fyzikální veličina udávající schopnost uchovávat elektrický náboj (Obr. 4.14). Kapacita se měří ve faradech a její hodnota závisí na geometrii elektrod, vzdálenosti mezi nimi a vlastnostech materiálu (dielektrika) vloženého mezi ně.

V praxi kapacitní snímače polohy pracují tak, že při pohybu měřeného objektu dochází ke změně vzdálenosti mezi elektrodami nebo ke změně vlastností materiálu mezi nimi. Tyto změny se projevují jako odchylky v kapacitě, které jsou následně elektronicky převedeny na signál odpovídající aktuální poloze objektu.

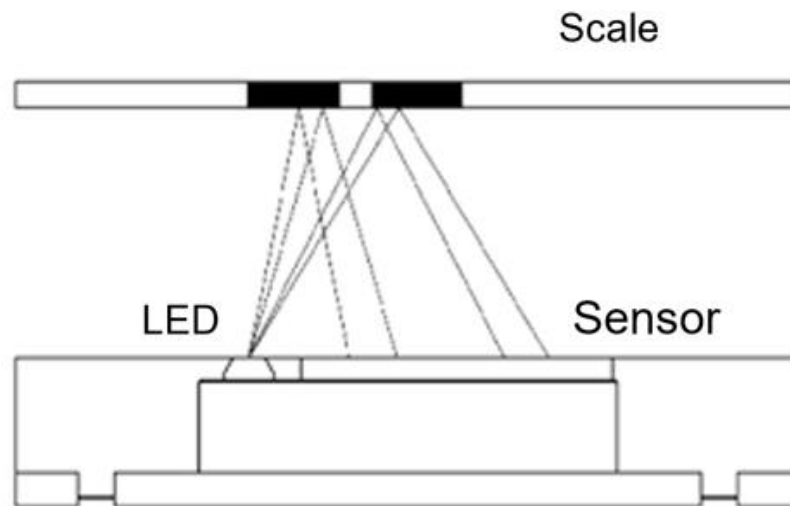


Obr. 4.14 – Kapacitní snímač polohy (ifm efector; Inc.)

#### D. Optické snímače polohy

Optické snímače polohy využívají principy světelné detekce k určení polohy měřeného objektu. Základním prvkem těchto snímačů je světelný zdroj (obvykle LED) a fotodetektor, který zachycuje buď přímo vyslané světlo, nebo světlo odražené od pohybujícího se objektu (Obr. 4.15).

V praxi se často využívají optické enkodéry, které mají rotační kotouč s definovanými vzory. Jakmile se kotouč otáčí, dochází k postupnému přerušování nebo změně intenzity světelného signálu, který je následně detekován fotodetektozem. Tyto změny signálu se převádějí na elektrické impulzy, jejichž počet či časování umožňuje přesné stanovení aktuální polohy.



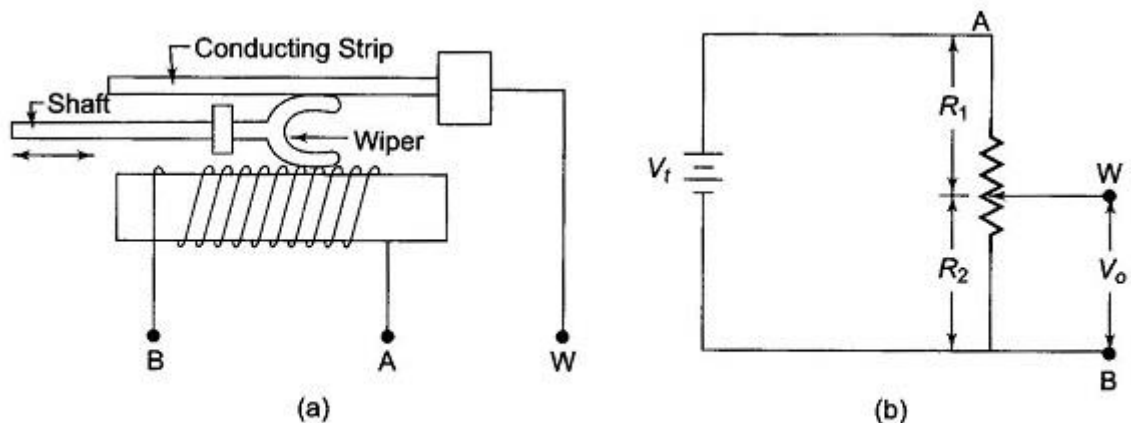
Obr. 4.15 – Optický snímač polohy (Celera Motion; Novanta Company)

#### E. Vybraný snímač polohy

Pro konstrukci laboratorního modelu „kulička na tyči“ byl zvolen odporový snímač polohy využívající vlastnost kovové kuličky klouzající po kovu. Tento princip funguje na bázi jednoduchého potenciometru: kulička, která se pohybuje po dvou tyčích (ocelová a s navinutým odporovým drátem), dotýká se odporového vodiče a vytváří tak dělič napětí. Změnou polohy kuličky se mění bod, ve kterém se měří napětí, a tím i velikost výsledného odporu. Tento analogový signál je snadno zpracovatelný řídicí elektronikou, umožňuje plynulé a okamžité snímání polohy kuličky bez potřeby složitých převodníků.

Volba právě tohoto snímače vychází z několika praktických i didaktických důvodů. Zaprvé konstrukce je velmi přímočará a nenáročná na výrobu i údržbu, což umožňuje studentům a badatelům rychlé pochopení základního principu měření polohy a jeho vlivu na

řízení soustavy. Zadruhé poskytuje dostatečnou přesnost v rozsahu dráhy kyvadélka, přičemž odporová drátová vinutí zajišťuje stabilní a lineární závislost odporu na posunu kuličky. Zatřetí je celý snímač odolný vůči mechanickému opotřebení – kovová kulička a odolný drát dokážou snášet časté pohyby a vibrace modelu bez podstatné změny parametrů. Celkově tak tento odporový snímač spojuje nízké náklady, snadnou integraci a dostatečnou přesnost.



**Fig. 13.2** (a) Construction of Resistance Position Transducer  
(b) Typical Method

Obr. 4.16 – Schéma principu činnosti (EEEGUIDE.COM)

Na levé části Obr. 4.16 je znázorněna aproximace modelu konstrukce odporového snímače polohy. Kovová kulička představovaná sběračem (Wiper) klouzá po navinutém odporovém drátě, který má vyvedené své konce (označenými A a B) na dva kontakty mimo senzor. Kulička zároveň klouzá po vodivé ocelové tyči (Conducting Spring), která má taktéž vyvedený snímací bod W na jeden kontakt, kde se dá odebírat napěťový signál odpovídající aktuální poloze kuličky. Hřídel (Shaft), která v tomto případě pohybuje sběračem (Wiper / kuličkou), který představuje v modelu servomotor. Tento akční člen funguje podle Newtonova zákona akce a reakce na bázi dětské houpačky. Takto jednoduchý je tento senzor.

Pravá část obrázku demonstruje ekvivalentní zapojení jako jednoduchý napěťový dělič. Mezi svorky A a B je připojeno napájecí napětí  $V_t$  a výstupní napětí  $V_o$  se odebírá právě z W. Horní část odporu (od A po W) označujeme jako  $R_1$ , spodní část (od W po B) jako  $R_2$ , takže platí vztah:

$$\frac{V_o}{V_t} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (4.2)$$

Tento lineární poměr umožňuje přesné vyjádření polohy kuličky (a tudíž i úhlu či posuvu vahadla) pouze měřením napětí  $V_0$ , bez potřeby jakékoli složité mechanické kalibrace.

#### **4.4 REALIZACE MODELU**

Pro účely této diplomové práce byl kompletní model sestaven z recyklátu PET-G filamentu. Jednotlivé díly byly navrženy v CAD prostředí SolidWorks, kde byla věnována zvláštní pozornost jak přesnosti rozměrů, tak kompatibilitě sestavy. Hotové 3D návrhy byly exportovány do formátu 3MF, který umožňuje zachovat veškeré informace o geometrii a materiálových vlastnostech součástí.

Následně byly 3MF soubory importovány do programu PrusaSlicer, v němž byla definována tisková strategie včetně parametrů výplně, podpůrných struktur, vrstvené výšky, rychlosti tisku a teploty extruderu. Po optimalizaci těchto nastavení generuje PrusaSlicer finální instrukce ve formátu G-code, jež jsou přímo čitelné 3D tiskárnou a zajišťují plynulý a reprodukovatelný tisk každého dílu modelu.

## 5 POPIS VYBRANÉHO ŘÍDICÍHO ALGORITMU

V úvodní fázi návrhu řídicího systému byl implementován manuální režim, který sloužil především k základnímu oživení systému a ověření správné funkčnosti jednotlivých komponent. Manuální režim umožňuje přímé ovládání servomotoru pomocí potenciometru bez zásahu regulační smyčky. Tento přístup byl zásadní pro prvotní nastavení a testování PWM signálu, kalibraci rozsahu serva a také pro ověření správné činnosti analogových vstupů, A/D převodníku a LCD displeje. Díky tomuto režimu bylo možné rychle identifikovat případné chyby v zapojení nebo konfiguraci mikrokontroléru ještě před nasazením automatického PID regulátoru.

V počátečních fázích návrhu automatického řídicího systému byla využita jednoduchá metoda, pokus-omyl, která spočívala v opakovaném manuálním nastavování parametrů systému a sledování jeho chování. Tento přístup umožňuje rychlé otestování základní funkčnosti bez nutnosti složitějšího matematického modelování. Přestože jde o neformální způsob ladění, může být užitečný zejména při prvotním oživení systému, kdy nejsou k dispozici přesné modely řízené soustavy.

Po úvodním testování byl jako hlavní řídicí algoritmus zvolen PID regulátor, který patří mezi nejrozšířenější nástroje v oblasti automatického řízení. PID regulátor pracuje na principu zpětné vazby, kde se výstupní veličina porovnává s požadovanou hodnotou ( $w(t)$ ) a na základě odchylky generuje vhodný řídicí zásah. Regulátor kombinuje tři složky:

- P – proporcionální, která reaguje přímo na aktuální chybu,
- I – integrační, která zohledňuje dlouhodobé odchylky a
- D – derivační, která předvídá vývoj chyby.

Pomocí vhodného nastavení těchto tří parametrů ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) lze dosáhnout rychlé, přesné a zároveň stabilní regulace bez výrazného překmitu nebo trvalé regulační odchylky. V této práci byl PID algoritmus implementován programově v mikrokontroléru ATmega32A v jazyce C.

### 5.1 IMPLEMENTACE PID ALGORITMU

Regulátor byl implementován v hlavní smyčce programu s periodou vzorkování přibližně 20 ms. Hodnoty žádané a měřené veličiny jsou získávány pomocí 8bitového A/D převodníku mikrokontroléru. Žádaná hodnota je nastavena pomocí potenciometru připojeného na vstup PA7, zatímco skutečná hodnota je snímána odporovým senzorem na PA0.

Základní myšlenka regulace vychází ze standardní spojité rovnice PID regulátoru:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (5.1)$$

kde  $e(t)$  je regulační odchylka mezi žádanou a měřenou hodnotou. Tato rovnice však není v číslicovém řízení přímo použitelná, protože mikrokontrolér pracuje s diskretními časovými okamžiky. Proto byla implementována diskretní verze tohoto regulátoru ve formě PSD regulátoru, jehož výpočetní rovnice má tvar:

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot T_s \cdot \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \cdot \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s}, \quad (5.2)$$

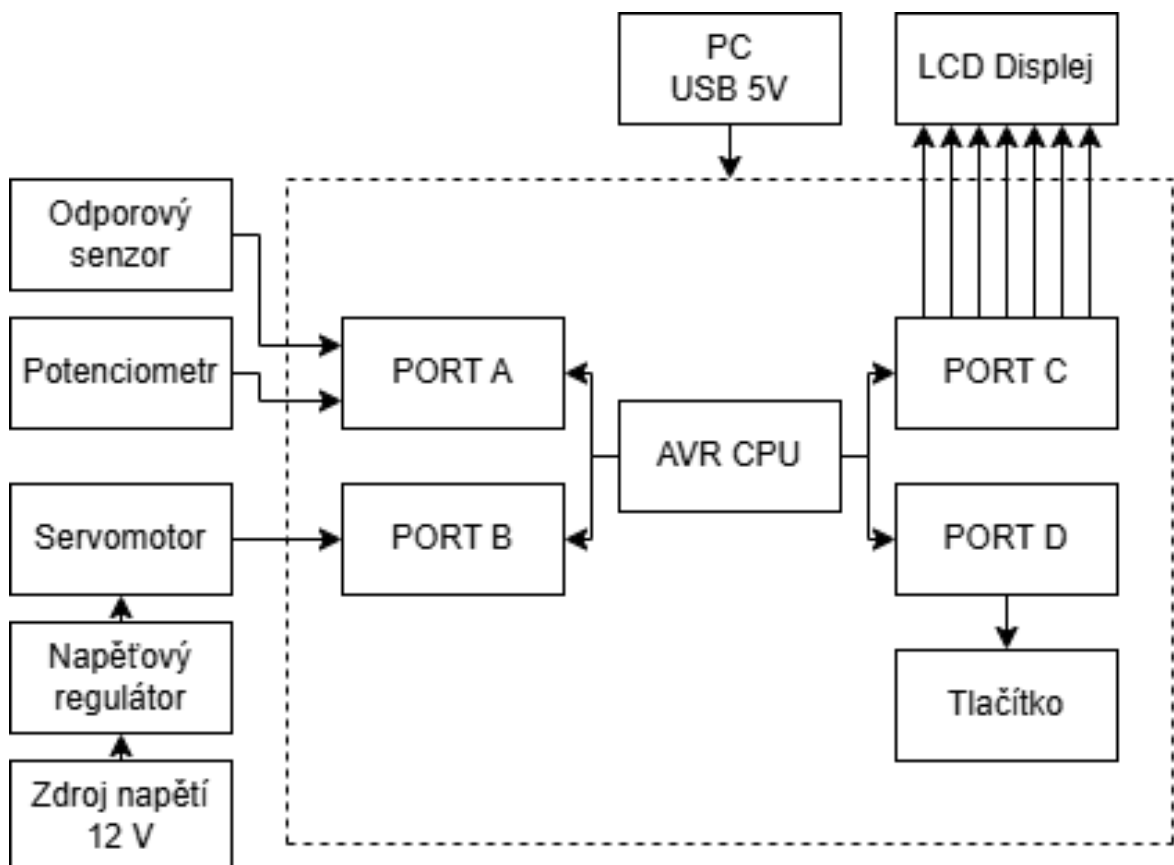
Takto vypočtená hodnota regulačního zásahu je následně omezena mezi minimální a maximální hodnotou PWM signálu (definováno jako MIN\_PULSE a MAX\_PULSE), aby bylo zajištěno bezpečné řízení servomotoru. PWM signál je generován pomocí časovače Timer0 v režimu Fast PWM, a hodnota zásahu je přiřazena do registru OCR0.

## 6 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

Pro model bylo vytvořeno blokové schéma na Obr. 6.1. Znáznorňuje celkové uspořádání systému založeného na mikrořadiči AVR, který slouží k řízení různých periferních zařízení. Napájení systému je zajištěno dvěma zdroji. Hlavní zdroj o napětí 12 V napájí servomotor skrze napěťový regulátor, zatímco samotný mikrořadič a další komponenty jsou napájeny z USB portu počítače.

Port A mikrořadiče je vyhrazen pro analogové vstupy, ke kterým jsou připojeny odporový senzor a potenciometr. Tyto prvky slouží k měření analogových hodnot, které jsou dále zpracovávány mikrořadičem, pro řízení servomotoru připojeného k portu B. Výstupní port C je využit pro komunikaci s LCD displejem, který slouží k vizualizaci získaných dat systému. Port D je propojen s tlačítkem, které slouží ke změně režimu systému.

Celý systém je řízen centrální jednotkou AVR CPU, která zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými perifériemi, zpracování dat a řízení výstupních signálů.



Obr. 6.1 – Blokové schéma modelu

## 6.1 PROPOJOVACÍ TABULKA PINŮ

Tab. 6.1 – Zapojení všech vývodů pomocí propojovacích kabelů

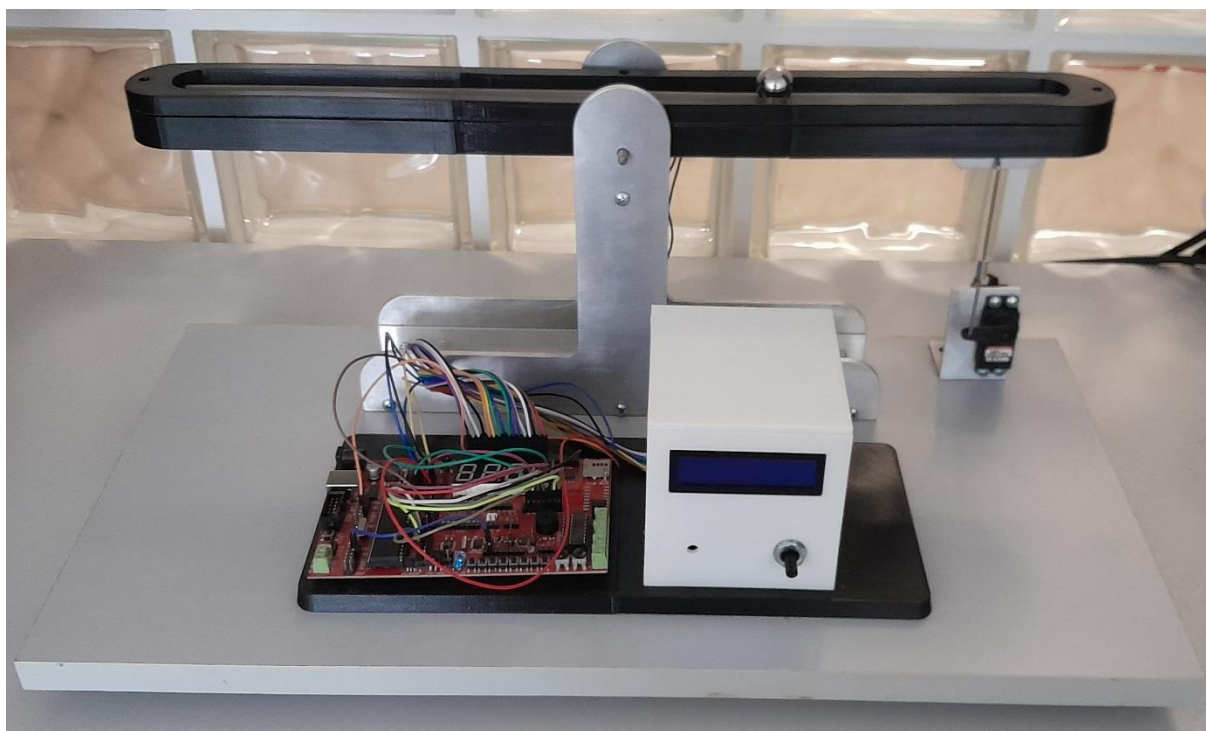
Pořadí	Ze zařízení	Součástka	Do zařízení	Součástka
1	Odporový senzor	R01-2	kit – Mikroprocesor	PORT A0
2	Servomotor	SV1	kit – Mikroprocesor	PORT B4
3	Potenciometr	R02-2	kit – Mikroprocesor	PORT A7
4	LCD Displej	DIS1-E	kit – Mikroprocesor	PORT C6
5	LCD Displej	DIS1-RW	kit – Mikroprocesor	PORT C5
6	LCD Displej	DIS1-RS	kit – Mikroprocesor	PORT C4
7	LCD Displej	DIS1-D7	kit – Mikroprocesor	PORT C3
8	LCD Displej	DIS1-D6	kit – Mikroprocesor	PORT C2
9	LCD Displej	DIS1-D5	kit – Mikroprocesor	PORT C1
10	LCD Displej	DIS1-D4	kit – Mikroprocesor	PORT C0
11	LCD Displej	DIS1-BL	kit – 5 V	5 V
12	kit – Tlačítko	SW8	kit – Mikroprocesor	PORT D3
13	Potenciometr	R02-3	kit – GND	GND
14	Potenciometr	R02-1	kit – 5 V	5 V
15	LCD Displej	GND	kit – GND	GND
16	LCD Displej	VCC	kit – 5 V	5V
17	Odporový senzor	R01-1	kit – GND	GND
18	Odporový senzor	R01-3	kit – 5 V	5 V

## 6.2 VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Na Obr. 6.2 je zachyceno celkové konstrukční řešení modelu „kulička na tyči“. Nosná konstrukce je vyrobena z hliníkového profilu, ke kterému je připevněno rameno ve tvaru žlábků, v němž se pohybuje kovová kulička. Její poloha je snímána odporovým senzorem, který je umístěn ve vnitřní části žlabu. Pohyb tyče je zajišťován servomotorem, který je připevněn na pravé straně základové desky.

Ve spodní části konstrukce je umístěna vývojová deska s mikrokontrolérem, prostřednictvím níž je realizováno měření, řízení a zpracování dat. Na základně vedle ní je umístěna ovládací elektronika v plastovém boxu, ve kterém je integrován LCD displej. Pod displejem je umístěn potenciometr.

Přepínač, který byl původně plánován, nebyl v konečné konstrukci použit, přestože jeho umístění je stále patrné na čelní straně plastového boxu, jak je vidět na obrázku.



Obr. 6.2 – Celkové konstrukční řešení

## 6.3 NAPÁJENÍ A VÝBĚR NAPÁJECÍHO ZDROJE

Pro správnou funkci celého modelu bylo nezbytné zvolit vhodné napájení, které by bylo schopno současně napájet jak servomotor, tak i senzor. Zpočátku byl sice využíván starší napájecí zdroj, avšak s ohledem na stabilitu a spolehlivost napájení byl následně zvolen osvědčený zdroj, který se osvědčil již v rámci bakalářské práce.

Konkrétně byl použit napájecí zdroj typu Sunny SYS1546-3612-T2, jehož výstupní napětí činí 12 V DC a maximální výstupní proud dosahuje hodnoty 3 A. Tento zdroj byl zvolen především z důvodu dostatečné proudové rezervy, což zajišťuje bezproblémový provoz i v případě zvýšené zátěže ze strany servomotoru při maximálním zatížení. Kromě toho použití stabilizovaného napětí 12 V umožňuje efektivní napájení dalších komponent systému pomocí následných napěťových regulátorů nebo rozvodů, pokud by bylo třeba.

Napájení však nebylo omezeno pouze na tento externí zdroj. Pro napájení vývojové desky s mikropočítačem EvB bylo využito napájení prostřednictvím rozhraní USB typu B, které je integrováno přímo na desce. Toto napájení zajišťuje standardní napětí 5 V, které je připojeno buď z USB portu počítače, nebo pomocí adaptéru ze sítě. Výhodou tohoto řešení je skutečnost, že stejný USB kabel slouží zároveň pro programování mikropočítače, čímž dochází k úspoře kabeláže a zjednodušení zapojení při vývoji.

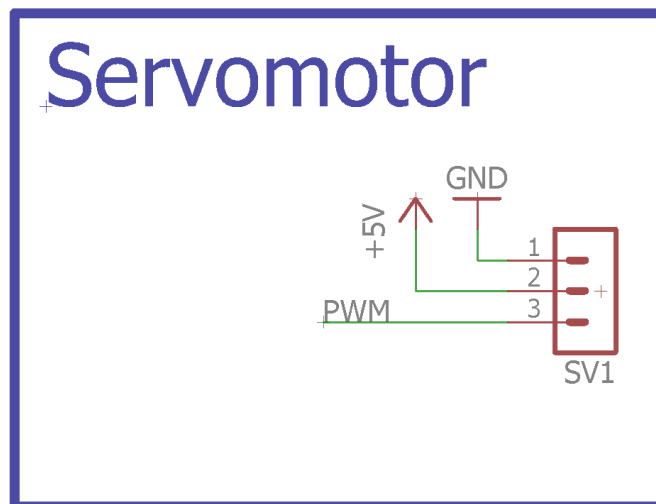
Použití dvou nezávislých napájecích větví:

- 12 V pro napájení silovějších komponent (servomotor) a,
- 5 V pro napájení mikropočítače bylo zvoleno záměrně.

Toto oddělení napájení přispívá ke zvýšení stability celého systému a minimalizaci rušení, které by mohlo vznikat sdílením napájení mezi výkonovou a řídicí částí systému.

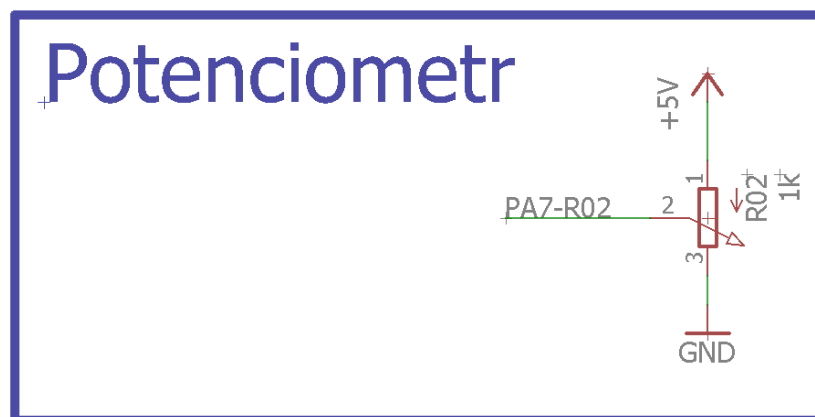
## **6.4 SERVOMOTOR A JEHO OVLÁDÁNÍ**

Jak bylo uvedeno na Obr. 4.7, byl použit servomotor Hitec HS-635HB. Jeho jednoduché zapojení je znázorněno na Obr. 6.3. Tento typ servomotoru může být napájen napětím v rozsahu 4,8–6 V a jeho maximální úhel natočení je 180°. Vzhledem k tomu, že vývojová deska EvB kit není schopna tento servomotor napájet přímo, bylo nutné vytvořit samostatné napájení pomocí napěťového stabilizátoru. Zároveň bylo nezbytné propojit země (GND) obou napájecích větví, aby nedocházelo k poruchám funkce.



Obr. 6.3 – Servomotor (Zapojení pinů)

V manuálním režimu je řízení servomotoru realizováno generováním PWM signálu na výstupním pinu PB4 mikroprocesoru ATmega32A. Pro manuální nastavení polohy je do kanálu ADC7 (pin PA7) připojen jednoduchý potenciometr (Obr. 6.4), jehož výstupní napětí je periodicky převáděno pomocí vestavěného A/D převodníku. Naměřená hodnota ADC je lineárně škálována na hodnotu registru OCR1A, čímž se mění šířka PWM impulzu, a tedy polohová odchylka serva. Uživatelský zásah na potenciometru se tak okamžitě projeví změnou pozice servomotoru.

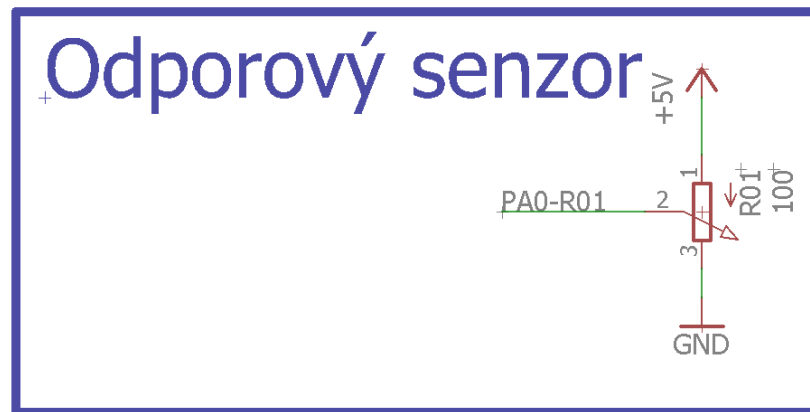


Obr. 6.4 – Potenciometr (Pro ovládání PWM)

V automatickém režimu je místo uživatelského potenciometru na PA7 primárně využit odporový senzor (Obr. 6.5), připojený na kanál ADC0 (pin PA0). Tento senzor průběžně měří aktuální polohu mechanické části soustavy a jeho digitální výstup reprezentuje skutečnou hodnotu  $y(t)$ . Paralelně však zůstává aktivní i potenciometr na PA7, který nyní slouží k

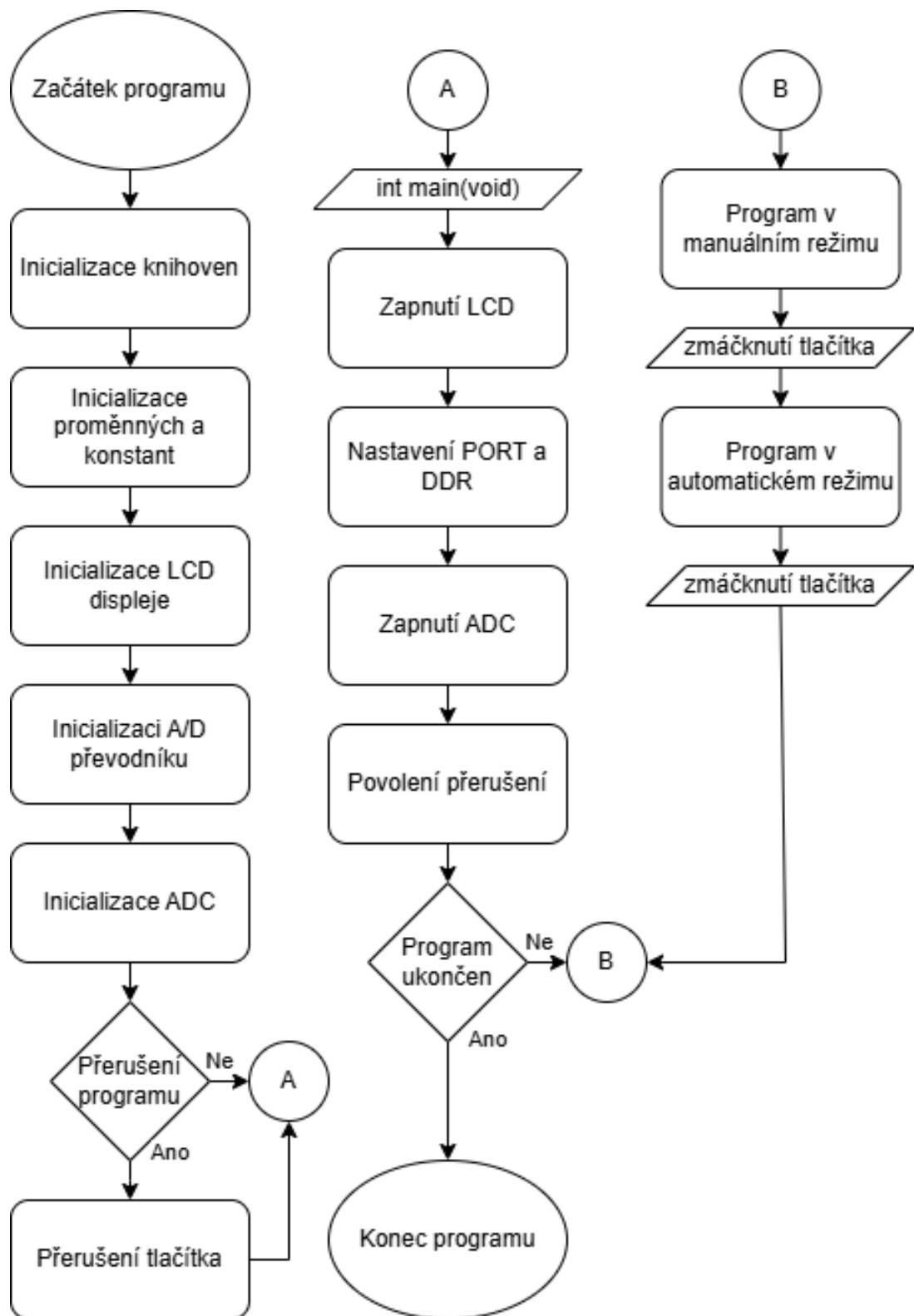
nastavení žádané hodnoty  $w(t)$ . Obě hodnoty  $w(t)$  a  $y(t)$  jsou periodicky snímány A/D převodníkem a v mikrokontroléru se vypočítá regulační člen  $e(t)$ .

Výsledná korekce se opět přenáší do registru OCR1A časovače Timer1, čímž se automaticky upravuje šířka PWM a polohu servomotoru tak, aby se minimalizovala regulační odchylka.



Obr. 6.5 – Odporový senzor

## 6.5 PROGRAM MIKROPOČÍTAČE



Obr. 6.6 – Vývojový diagram programu

Celý program mikropočítače byl vytvořen v prostředí Microchip Studio v programovacím jazyce C. Následně byl převeden do formátu HEX pomocí tohoto vývojového prostředí a poté nahrán do mikropočítače prostřednictvím programu AND-Load.

Na začátku programu byly vloženy potřebné knihovny pro práci s mikrokontrolérem ATmega32A. Jedná se o knihovny zajišťující přístup k registrům mikrokontroléru, práci se zpožděním, obsluhu přerušení a řízení LCD displeje. Dále byla definována pracovní frekvence mikrokontroléru a následuje nastavení konstant PID regulátoru ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ).

Tab. 6.2 – Výsledné parametry PID

PID	Hodnota
P ( $K_p$ )	1
I ( $K_i$ )	0,5
D ( $K_d$ )	0,2

Pomocí výčtového typu byl zaveden režim řízení (MANUAL/AUTOMATIC) a pro realizaci PID algoritmu byly deklarovány globální proměnné.

Bylo nastaveno přerušení od časovače Timer0 pro PWM signál na pinu PB4 a externí přerušení INT1 na přepínání režimů.

Po spuštění programu byly provedeny inicializace všech potřebných periférií. Nastavení pro Porty I/O. Časovač Timer0 byl inicializován. A/D převodník byl povolen a nakonfigurován. Externí přerušení INT1 bylo nastaveno přerušení na sestupnou hranu pro přepínání režimů. A bylo provedeno spuštění LCD displeje, jeho vymazání a zobrazení výchozího režimu.

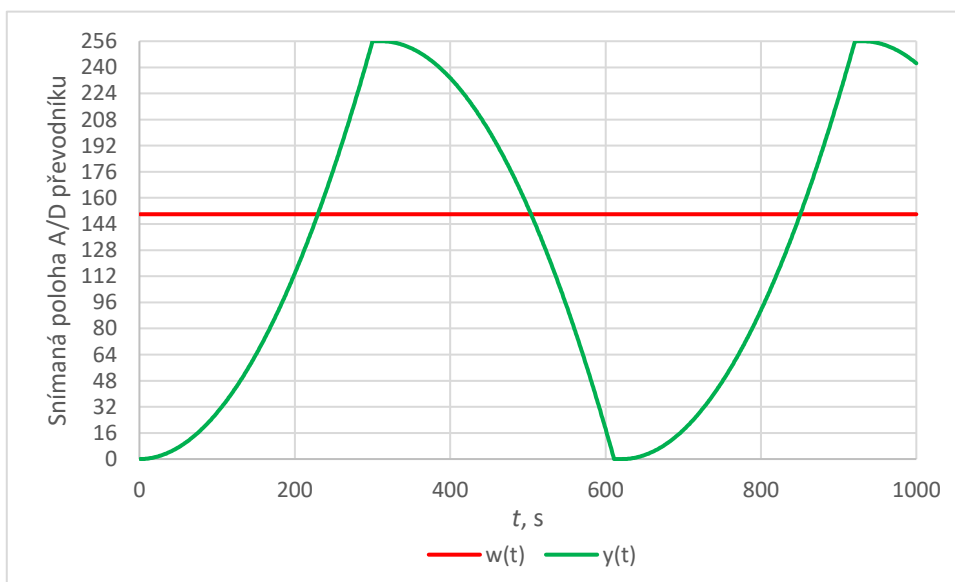
Hlavní programová smyčka byla navržena tak, aby umožňovala průběžné vyhodnocování stavu systému a zajištění odpovídajícího řízení. Po spuštění programu byl systém uveden do manuálního režimu, přičemž pomocí externího přerušení bylo možné režimy přepínat. (Hlavní smyčka je definována na Obr. 6.6 jako smyčka B.) V každém cyklu smyčky byly načítány analogové hodnoty z potenciometru a senzoru, přičemž v manuálním režimu byla hodnota potenciometru přímo převedena na řídicí PWM signál, zatímco v automatickém režimu byla použita k výpočtu regulační odchylky v rámci PID algoritmu. Současně byly na LCD displej vypisovány aktuální hodnoty pro zpětnou kontrolu. Celý proces probíhal s periodou 20 ms.

## 6.6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Praktické měření představuje klíčovou fází realizace projektu, během níž jsou ověřovány teoretické poznatky a funkčnost navrženého systému v reálných podmínkách. Během této etapy byly prováděny testy jednotlivých HW i SW částí za účelem zajištění správné činnosti celého zařízení.

Pro vyzkoušení modelu byl vytvořen manuální režim, u kterého bylo nutné zjistit jeho funkčnost a správnost měření. Jelikož docházelo k chybám měření, které byly způsobeny nečistotami na odporovém senzoru, bylo toto řešení správné.

První metoda měření pro automatický režim byla použita metoda pokus-omyl. Tento přístup spočíval ve sledování reakce modelu na různé vstupní podněty a následném upravování hodnot řídicích veličin podle výsledků pokusů. Na Obr. 6.7 je patrné, že tato metoda nevedla k uspokojivým výsledkům. Jediným úspěchem této strategie bylo dosažení stavu na hranici stability modelu. Což je sice dobré, jak říká King, („*I zastavené hodiny mají dvakrát denně pravdu.*“ (Stephen King)) ale když byla požadovaná hodnota nastavena na 150, výstupní veličina tuto hodnotu pouze protínala, aniž by se k ní trvale přiblížila. Takové nastavení proto neumožňovalo požadovanou hodnotu efektivně dosáhnout.



Obr. 6.7 – Reakce systému pomocí metody pokus-omyl

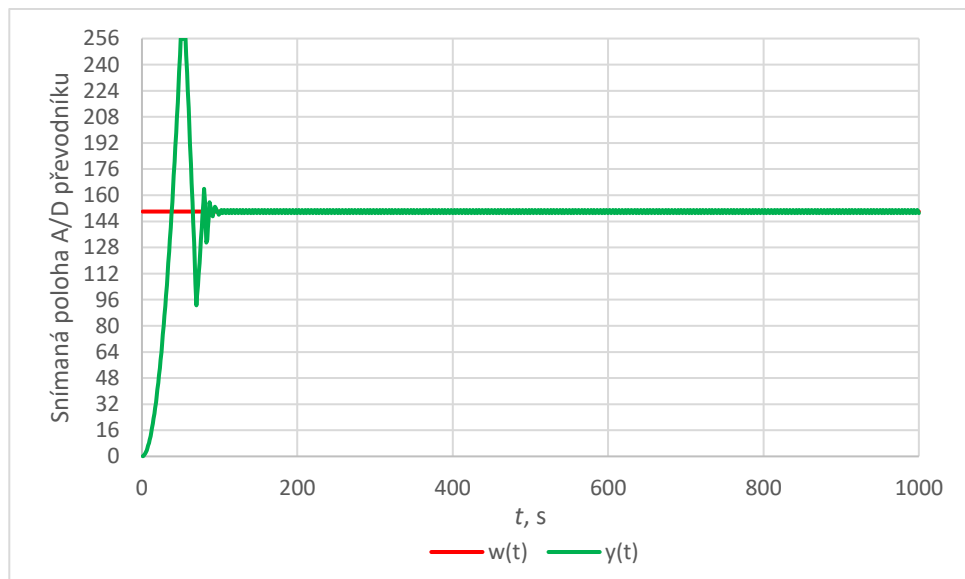
Pro druhou metodu měření v automatickém režimu byl využit PID regulátor, který byl softwarově implementován v mikrokontroléru ATmega32A. Regulátor zajišťuje řízení polohy servomotoru na základě zpětné vazby ze senzoru polohy. Hodnoty parametrů PID regulátoru byly určeny experimentálně metodou s cílem minimalizovat překmitý, zkrátit ustalovací čas a

dosáhnout co nejmenší ustálené odchylky. Konkrétní nastavené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.1.

Výsledky měření jsou znázorněny na Obr. 6.8. Na vodorovné ose je čas  $t$  ve vteřinách a na svislé ose je snímaná poloha servomotoru ve formě číselné hodnoty z 8bitového A/D převodníku.

Graf zachycuje regulační pochod uzavřeného regulačního obvodu po skokové změně žádané hodnoty  $w(t)$ , která je v tomto případě nastavena na 150. Zelená křivka  $y(t)$  představuje skutečný výstup systému, tedy aktuální polohu serva snímanou senzorem.

Z grafu je patrný rychlý nárůst výstupní hodnoty, následuje překmit a poté tlumené oscilace, které se postupně ustálí kolem žádané hodnoty. Tento průběh odpovídá chování systému druhého řádu. Malá ustálená odchylka a stabilita systému potvrzují, že PID regulátor byl nastaven vhodně a regulace funguje správně.



Obr. 6.8 – Reakce systému na změnu žádané hodnoty s použitím PID regulace

## 7 ZÁVĚR

Celá diplomová práce pojednávala o modelu „kulička na tyči“. Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat funkční demonstrační zařízení využívající mikrokontrolér ATmega32A pro řízení servomotoru na základě zpětné vazby z odporového senzoru, a to s využitím PWM signálu a A/D převodníku. Systém byl doplněn o LCD displej pro zobrazování aktuálních hodnot a uživatelské tlačítko pro změnu režimů.

V průběhu návrhu a realizace byla úspěšně implementována PID regulace, která umožňuje přesné nastavení polohy servomotoru dle zadané hodnoty z potenciometru. Byly vyřešeny otázky spojené s generováním PWM signálu, čtením analogových hodnot a jejich zpracováním. Správnou funkčnost systému se podařilo ověřit pomocí testování v reálném provozu.

Práce tak ukazuje praktické využití základních periférií mikrokontroléru, jako jsou časovače, A/D převodník, externí přerušení či řízení LCD displeje, a může sloužit jako výuková nebo demonstrační pomůcka pro pochopení principů regulace a řízení.

## POUŽITÁ LITERATURA

- INSTITUT PRO TESTOVÁNÍ A CERTIFIKACI. 2018. "Vahadlová houpačka" [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.nlfnorm.cz/terminologicky-slovník/104043>
- AMJAD, M.; KASHIF, M.I.; ABDULLAH, S. S.; SHAREEF, Z. 2010. "Fuzzy logic control of ball and beam system" 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC). Shanghai: IEEE, 2010. s. 420–424. ISBN 978-1-4244-6367-6. DOI: 10.1109/ICETC.2010.5529494
- ASTI AUTOMATION SRL. "Ball and beam system" [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://astiautomation.com/product/ball-and-beam-system/>
- Bc. SVOBODA, F. 2021. "Senzor pro měření rychlosti proudění plynu [bakalářská práce]". Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2022. 71 s.
- SCHMID, D. a kol. 2005. "Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku". 1. vyd. Překlad Jiří Handlíř. Praha: Europa-Sobotáles. 420 s. ISBN 80-86706-10-9.
- Robu.in. 2020. "Inductive proximity sensor working principle". [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://robu.in/inductive-proximity-sensor-working-principle/>
- ifm efector, Inc. (n.d.). "Technology overview - capacitive sensors". [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/us/en/us/overview/capacitive/technology-overview/technology-overview>
- Celera Motion; Novanta Company. (n.d.). "Position Sensors – Choosing the right sensor". [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.celeramotion.com/inductive-sensors/support/technical-papers/position-sensors/>
- EEEGUIDE.COM. (n.d.). "Resistive position transducer". [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.eeeguide.com/resistive-position-transducer/>
- KRIŽAN, J. 2010. "Návrh a realizace výukového modelu kulička na tyči [bakalářská práce]". Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 38 s.
- Bc. SPAČEK, Ľ. 2016. "Digital control of CE 151 ball & plate model [diplomová práce]". Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta aplikované informatiky, 2016.
- UNIVERSITY OF MICHIGAN. 2012. "CTM Example: Ball & Beam Modeling". [online]. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20120814104718/http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/ball/ball.html>
- LOKHANDE, U. 2024. "Learn Basics of AVR Atmega32A Microcontroller". [online]. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://binaryupdates.com/learn-basics-avr-microcontroller/>
- ALI, A. T.; AHMED, A. M.; ALMAHDI, H. A.; USAMA, A. T.; NASERALDEEN, A. A. 2017. "Design and Implementation of Ball and Beam System Using PID Controller.". Automatic Control and Information Sciences [online]. 2017, 4 s. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/acis/3/1/1>. DOI: 10.12691/acis-3-1-1

DIXELL.CZ. "*Základy teorie ON/OFF a PID regulace*". [online]. [cit. 2025-05-16].  
Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>

## **PŘÍLOHY**

A – CD || flash disk

B – Výrobní dokumentace

C – Uživatelský manuál realizované konstrukce

**Příloha k diplomové práci**  
**KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ LABORATORNÍHO MODELU KULIČKA**  
**NA TYČI**

Bc. Filip Svoboda

## **Obsah**

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF
- 2 3D modely tisknutých dílů
- 3 Schémata zapojení
- 4 Software mikroprocesoru

**Příloha k diplomové práci**

**KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ LABORATORNÍHO MODELU KULIČKA  
NA TYČI**

Bc. Filip Svoboda

**VÝROBNÍ DOKUMENTACE**

## Obsah

Seznam ilustrací .....	B – 2
Seznam tabulek .....	B – 3
Úvod .....	B – 4
1 Seznam součástí a zařízení .....	B – 5
2 Celkové schéma zapojení .....	B – 6
3 Celková mechanická konstrukce .....	B – 8

## **SEZNAM ILUSTRACÍ**

Obr. 2.1 – Celkové schéma .....	B – 6
Obr. 4.1 – Celková mechanické konstrukce .....	B – 8

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 1.1 – Seznam součástí .....	B – 5
Tab. 1.2 – Seznam zařízení .....	B – 5

## ÚVOD

Práce se zaměřuje na funkční model „kulička na tyči“. Celková mechanická konstrukce zařízení byla vytvořena 3D tiskem pomocí filamentu PET-G a pro lepší pevnost v určitých místech přilepena vteřinovým lepidlem. Pro oživení modelu byla většina součástí testována s nepájivým polem, než bylo napájení umístěné na univerzální plošný spoj. Celkový projekt byl poté zapojen a otestován.

# 1 SEZNAM SOUČÁSTEK A ZAŘÍZENÍ

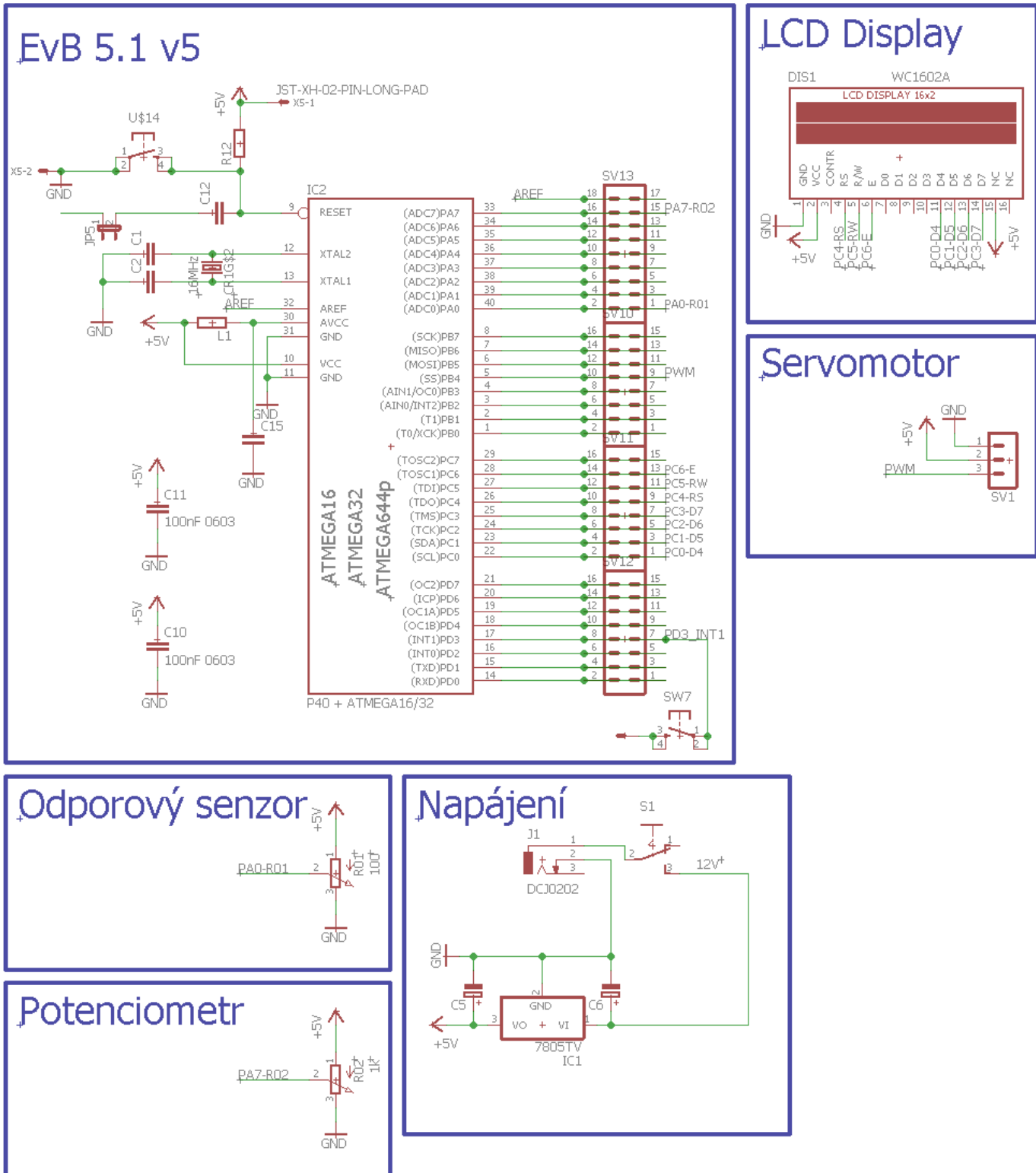
Tab. 1.1 – Seznam součástek

Počet	Označení na schématu	Název součástky	Hodnota / typ
1×	R1	Potenciometr (Sen.)	100 Ω
1×	R2	Potenciometr	1 kΩ
1×	IC1	Stabilizátor	7805
1×	C5	Kondenzátor	0,1 μF
1×	C6	Kondenzátor	0,1 μF
1×	S1	Vypínací tlačítko	MRS-101-9C3-B/B
1×	J1	Napájecí konektor	PC-G2.1/5.5

Tab. 1.2 – Seznam zařízení

Počet	Označení na schématu	Název Zařízení	Hodnota / typ
1×	×	Stavebnice (kit)	EvB 5.1 v5
1×	SV1	Servomotor	Hitec HS-635HB
1×	×	Napájecí zdroj	Sunny SYS1546-3612-T2

## 2 CELKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ



Obr. 2.1 – Celkové schéma

Celkové schéma se skládá ze šesti částí zobrazených na obr. 2.1. První část je napájení, které napájí pouze servomotor. (EvB má vlastní napájení, které zde není zobrazeno) Obsahuje konektor, vypínač a napěťový regulátor s kondenzátory.

Druhá část je samotný servomotor zobrazený za pomoci kontaktů servomotoru, spojených s napájením a mikroprocesorem.

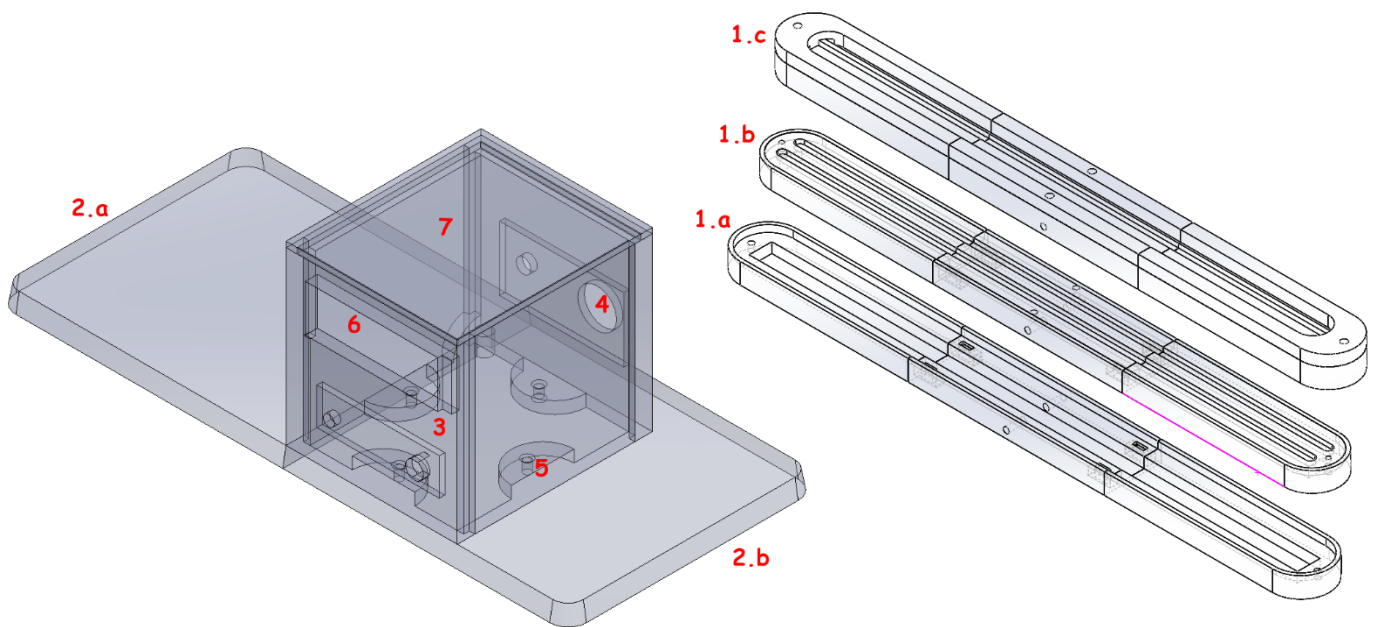
Třetí nejhlavnější část je mikroprocesor umístěný na stavebnici EvB, na který jsou připojeny veškerá zařízení.

Čtvrtá část je samotný LCD display umístěný mimo DPS.

A následná pátá a šestá část je potenciometr a odporový senzor polohy.

### 3 CELKOVÁ MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Mechanická konstrukce se skládá ze dvou hlavních částí (rameno a box). Veškeré mechanické části jsou vidět na obr. 4.1, kromě kovové části držící rameno. Rameno je na obrázku rozdělena do tří částí, kde 1.a je pouze spodní část pro uložení vodičů. Část 1.b je pro uložení odporového senzoru a 1.c je kompletní rameno. Druhá část je podložkou pro box. Samotný box se skládá z pěti částí (3-7).



Obr. 4.1 – Celková mechanické konstrukce

**Příloha k diplomové práci**  
**KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ LABORATORNÍHO MODELU KULIČKA**  
**NA TYČI**

Bc. Filip Svoboda

**Uživatelský manuál realizované konstrukce**

## Obsah

Seznam ilustrací .....	C – 2
1 Vysvětlení zobrazení a ovládání .....	C – 3

## **SEZNAM ILUSTRACÍ**

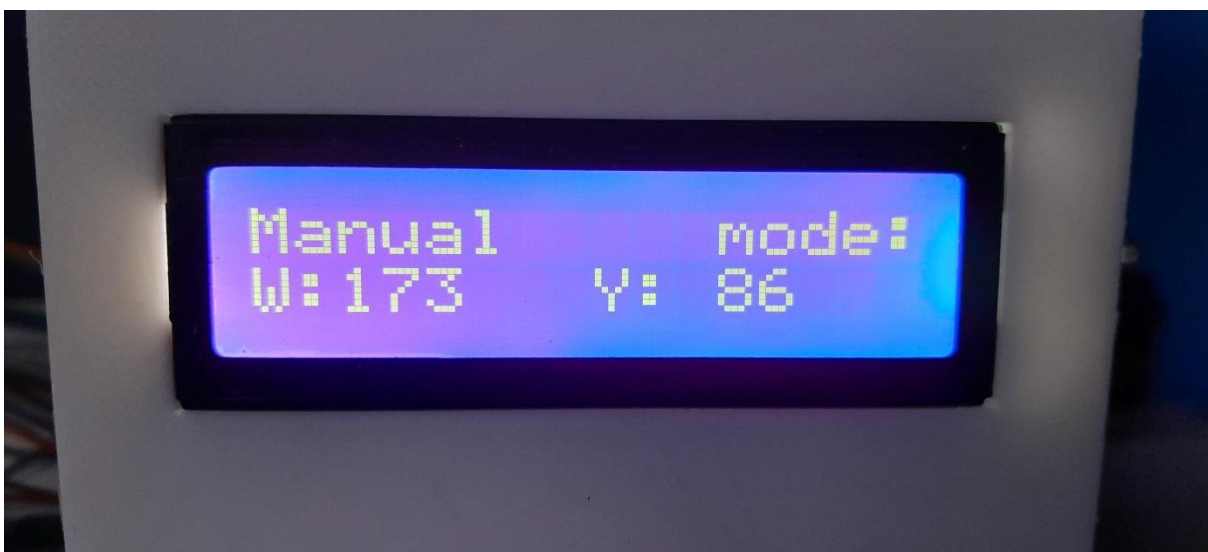
Obr. 1.1 – Zapnutý LCD displej ..... C – 3

## 1. VYSVĚTLENÍ ZOBRAZENÍ A OVLÁDÁNÍ

Uživatelské rozhraní systému je realizováno prostřednictvím LCD displeje připojeného k mikrořadiči. Tento displej slouží k základní orientaci uživatele v aktuálním stavu systému a ke zpětné vazbě během jeho provozu. Displej je dvouřádkový a každý z jeho řádků má pevně danou funkci.

První řádek zobrazuje aktuální režim systému. Uživatel se může nacházet buď v manuálním režimu (Manual mode), nebo v automatickém režimu (Automatic mode). Volba režimu probíhá prostřednictvím tlačítka připojeného k mikrořadiči. Po stisku tlačítka se režim přepne a tato změna se ihned projeví i na displeji.

Druhý řádek zobrazuje dvě klíčové veličiny regulovaného systému. Žádanou veličinu  $w(t)$  a výstupní veličinu  $y(t)$ . Tyto hodnoty se v reálném čase aktualizují a umožňují uživateli sledovat, jak přesně řízení probíhá a jaká je okamžitá odchylka mezi žádanou a skutečnou hodnotou.



Obr. 1.1 – Zapnutý LCD displej