

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

KOSHILKO YANEK

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Řízení laboratorní soustavy diskrétním PID regulátorem navrženým pomocí  
metody umístění pólů

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Yanek Koshilko**  
Osobní číslo: **I22265**  
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**  
Téma práce: **Řízení laboratorní soustavy diskrétním PID regulátorem navrženým pomocí metody umístění pólů**  
Zadávající katedra: **Katedra automatizace a matematiky**

## Zásady pro vypracování

Cíl práce: Navrhnout a aplikovat metodu, která umožní na základě umístění pólů uzavřeného regulačního obvodu vypočítat parametry diskrétního PID regulátoru.  
Teoretická část: Tvorba dynamických matematických modelů soustav a identifikace neznámých parametrů, jednoduchý regulační obvod, diskrétní PID regulátor, metoda umístění pólů.  
Praktická část: Dynamický model laboratorní soustavy. Návrh metody umístění pólů pro určení parametrů diskrétního PID regulátoru. Simulační ověření návrhu a aplikace regulátoru. Použití metody pro řízení laboratorní soustavy. Diskuze a zhodnocení výsledků.

Rozsah pracovní zprávy: **50**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0020-2.  
VÍTEČKOVÁ, Miluše a VÍTEČEK, Antonín. Základy automatické regulace. Přeprac. 2. vyd. Ostrava: VŠB –  
Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Daniel Honc, Ph.D.**  
Katedra automatizace a matematiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2024**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

**prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D.** v.r.  
děkan

LS.

**Ing. Libor Kupka, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem „Řízení laboratorní soustavy diskrétním PID regulátorem navrženým pomocí metody umístění pólů“ 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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16. 5. 2025

Koshilko Yanek

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto vyjádřil upřímné poděkování svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Danielu Honcovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné připomínky a vstřícný přístup během zpracování této práce. Jeho podpora a odborné rady pro mě byly velkou pomocí a motivací. Také děkuji své rodině za její podporu během celého studia

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a implementací diskrétního PID regulátoru pro řízení laboratorní soustavy. Regulátor je navržen pomocí metody umístění pólů, která umožňuje dosáhnout požadovaných dynamických vlastností systému. V práci je popsán postup návrhu regulátoru, jeho digitalizace a realizace v prostředí laboratorní úlohy. Výsledky měření potvrzují, že navržený regulátor zajišťuje stabilní řízení a splňuje požadavky na rychlost a přesnost regulace. Práce může sloužit jako podklad pro další rozvoj metod návrhu digitálních regulátorů v laboratorním prostředí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

PID regulátor, diskrétní řízení, metoda umístění pólů, laboratorní soustava, návrh regulátoru, stabilita systému

## **TITLE**

Control of a Laboratory System Using a Discrete PID Controller Designed by the Pole Placement Method

## **ANNOTATION**

This bachelor's thesis focuses on the design and implementation of a discrete PID controller for the control of a laboratory system. The controller is designed using the pole placement method, which enables achieving the desired dynamic properties of the system. The thesis describes the design process, digitalization, and implementation of the controller in a laboratory setup. Measurement results confirm that the designed controller ensures stable control and meets the requirements for regulation speed and accuracy. The work may serve as a basis for further development of digital controller design methods in laboratory environments.

## **KEYWORDS**

PID controller, discrete control, pole placement method, laboratory system, controller design, system stability

## **OBSAH**

SEZNAM ULUSTRACÍ A TABULEK .....	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK .....	11
TERMINOLOGIE .....	12
ÚVOD .....	13
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	14
1.1 Základy automatického řízení .....	14
1.1.1 Systém a řízený proces .....	14
1.1.2 Základní prvky automatického řízení .....	14
1.1.3 Typy řízení .....	15
1.1.4 Diskrétní a spojitý řízení .....	15
1.2 Uzavřený regulační obvod .....	16
1.2.1 Blokové schéma URO .....	16
1.2.2 Výhody a nevýhody zpětnovazebního řízení .....	17
1.3 Model řízené soustavy .....	18
1.3.1 Proporcionální soustava prvního řádu .....	18
1.3.2 Spojitá přenosová funkce soustavy .....	19
1.3.3 Diskrétní přenosová funkce soustavy .....	19
1.4 Regule a PI regulátor .....	20
1.4.1 Regule a regulátor .....	20
1.4.2 Spojitý PI regulátor .....	21
1.4.3 Diskrétní PI regulátor .....	22
1.5 Návrh diskrétního PI regulátoru pomocí metody umístění pólů .....	23
1.5.1 Princip metody umístění pólů .....	23
1.5.2 Postup návrhu PI regulátoru .....	24
2 PRAKTICKÁ ČÁST .....	26
2.1 Identifikace modelu řízené soustavy .....	26
2.1.1 Měření dat pro identifikace .....	26
2.1.2 Identifikace modelu soustavy 1. řádu .....	28
2.1.3 Identifikace modelu soustavy 2. řádu .....	31
2.2 Návrh diskrétního PI regulátoru v Simulinku .....	34
2.2.1 Blokové shéma URO .....	34
2.2.2 Realizace diskrétního PI regulátoru .....	36

2.2.3 Vytvoření modelu řízené soustavy .....	38
2.3 Simulace řízení .....	39
2.3.1 Příprava parametrů řídicího algoritmu .....	40
2.3.2 Parametrické nastavení modelu .....	41
2.3.3 Vyhodnocení dynamiky řízených soustav .....	43
2.4 Reálné řízení .....	47
2.4.1 Experimentální zapojení .....	48
2.4.2 Realizace měření a analýza výsledků.....	48
ZÁVĚR .....	51
POUŽITÁ LITERATURA.....	52

## SEZNAM ULUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu(HONC,2024).....	16
Obrázek 2: Časové průběhy vstupní a výstupní veličiny naměřené na laboratorní soustavě ...	28
Obrázek 3: Porovnání modelu a měření soustavy 1. řádu .....	30
Obrázek 4: Porovnání modelu a měření soustavy 2. řádu .....	33
Obrázek 5: Blokové schéma URO s diskretním PI regulátorem .....	34
Obrázek 6: Vnitřní schéma subsystému PI regulátoru .....	36
Obrázek 7: Maska PI regulátoru .....	37
Obrázek 8: Blokové schéma modelu soustavy .....	38
Obrázek 9: Maska řízené soustavy .....	39
Obrázek 10: Maska regulátoru s hodnotami .....	42
Obrázek 11: Maska soustavy 1. řádu .....	42
Obrázek 12: Maska soustavy 2. řádu s hodnotami .....	43
Obrázek 13: Odezva pro soustavu 1. řádu s nastaveným pólem 0.969 .....	44
Obrázek 14: Odezva pro soustavu 2. řádu s nastaveným pólem 0.969 .....	44
Obrázek 15: Odezva pro soustavu 1. řádu s nastaveným pólem 0.951 .....	45
Obrázek 16: Odezva pro soustavu 2. řádu s nastaveným pólem 0.951 .....	45
Obrázek 17: Odezva pro soustavu 1. řádu s nastaveným pólem 0.905 .....	46
Obrázek 18: Odezva pro soustavu 2. řádu s nastaveným pólem 0.905 .....	46
Obrázek 19: Blokové schéma experimentálního zapojení s reálnou soustavou RT 050 .....	48
Obrázek 20: Odezva pro reálnou soustavu s nastaveným pólem 0.969.....	49
Obrázek 21: Odezva pro reálnou soustavu s nastaveným pólem 0.951.....	49
Obrázek 22: Odezva pro reálnou soustavu s nastaveným pólem 0.905.....	50
Tabulka 1: Parametry polů .....	41

## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

- PID - Proporcionálně–Integračně–Derivační regulátor
- PI - Proporcionálně–Integrační regulátor
- ZOH - Zero-Order Hold (držení nulového řádu – metoda vzorkování)
- LTI – Lineární Časově Invariantní
- URO – Uzavřený regulační obvod
- $T_i$ .....integrační časová konstanta regulátoru
- $T$ .....časová konstanta
- $T_s$ .....vzorkovací perioda
- $k$ .....zesílení systému
- $u$ .....vstup soustavy
- $y$ .....výstup soustavy
- $e$ .....regulační odchylka
- $S(s)$ .....spojitá přenosová funkce soustavy
- $S(z)$ .....diskrétní přenosová funkce soustavy
- $R(s)$ .....spojitá přenosová funkce regulátoru
- $R(z)$ .....diskrétní přenosová funkce regulátoru
- $s$ .....komplexní proměnná v Laplaceově transformaci
- $z$ .....komplexní proměnná v Z-transformaci
- $q_0, q_1$ .....váhové koeficienty diskrétní regulační rovnice

## TERMINOLOGIE

- Diskretizace - proces převodu spojitého (časově nepřetržitého) systému na diskrétní (časově vzorkovaný)
- Z-transformace - matematický nástroj používaný pro analýzu diskrétních systémů v časové oblasti.
- Regulace - proces udržování veličiny na požadované hodnotě pomocí zásahu regulátoru.
- Řízená soustava - fyzikální nebo matematický systém, který je předmětem regulace. V práci je modelován pomocí přenosové funkce
- Zpětná vazba - mechanismus, při kterém je výstup systému porovnáván se vstupem pro korekci chyby.
- Identifikace - proces nalezení vhodného matematického modelu systému (např. přenosové funkce) na základě měřených dat vstupu a výstupu
- PI regulátor - regulátor s proporcionální a integrační složkou. Zajišťuje nulovou stacionární regulační odchylku.
- Přenosová funkce - popis vztahu mezi vstupem a výstupem systému v Laplaceově nebo Z-transformační doméně.
- Metoda umístění pólů - návrhová metoda řízení, kde jsou žádoucí dynamické vlastnosti systému dosaženy volbou polohy pólů uzavřené smyčky.
- Matlab(Matrix Laboratory) – výpočetní a simulační prostředí pro technické a vědecké výpočty, používané např. pro návrh a simulaci regulačních systémů
- Simulink - blokové prostředí MATLABu pro modelování a simulace dynamických systémů
- Masky - parametrizační rozhraní v Simulinku, umožňující uživatelské zadání hodnot bez nutnosti úprav vnitřní struktury subsystému
- Subsystém - uspořádaný blok v Simulinku obsahující konkrétní část řízení nebo modelu (např. regulátor nebo soustava)

## ÚVOD

Řízení dynamických systémů představuje jednu z klíčových oblastí moderní automatizace, která se uplatňuje napříč mnoha technickými obory – od výrobních linek přes automobilový průmysl až po letecké a zdravotnické technologie. Cílem řízení je zajistit, aby se řízený proces choval požadovaným způsobem i za přítomnosti vnějších vlivů, poruch nebo změn v parametrech systému. Z hlediska návrhu řízení jsou důležité nejen přesnost a stabilita, ale i rychlost odezvy a robustnost celého systému.

V oblasti návrhu regulátorů zaujímají významné postavení klasické lineární regulátory typu PID (proporcionálně-integračně-derivační) a jejich zjednodušené varianty, zejména PI (proporcionálně-integrační) regulátory. Tyto regulátory nabízejí vhodný kompromis mezi výpočetní ocností a dostatečně kvalitními regulačními vlastnostmi. Díky tomu jsou široce využívány jak v akademické oblasti při výuce automatizace a řízení, tak i v průmyslové praxi. Vzhledem k postupné digitalizaci řízení a přechodu na mikroprocesorové systémy je však v současnosti stále důležitější návrh regulátorů v diskrétní podobě, tedy takových, které jsou implementovatelné ve vzorkovaném (digitálním) čase.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh a implementaci diskrétního PI regulátoru, který bude použit k řízení reálné laboratorní soustavy. Specifikem této práce je využití metody umístění pólů (pole placement) při návrhu regulátoru – v Gausově rovině pro diskrétní popis řízeného systému. Tato metoda umožňuje explicitně určit polohu pólů uzavřené regulační smyčky, čímž lze přesně ovlivnit dynamické vlastnosti systému – jako je rychlost odezvy, stabilita nebo překmit. Výhodou této metody oproti klasickému ladění PI regulátoru (např. pomocí Ziegler-Nicholsovy metody) je její teoretická přesnost a možnost systematického návrhu i pro složitější dynamické systémy.

Praktická část práce je založena na řízení laboratorní soustavy, která napodobuje vlastnosti reálných technologických procesů. Nejprve bude provedena identifikace modelu soustavy, následně návrh diskrétního PI regulátoru pomocí umístění pólů, simulace odezvy v prostředí MATLAB/Simulink a v závěru i implementace na reálném zařízení v laboratoři. Bude provedeno srovnání dosažených výsledků s požadavky na kvalitu regulace a zhodnocení výhod a nevýhod navrženého přístupu.

Cílem práce je tedy nejen ověřit teoretické znalosti návrhu řízení, ale také ukázat jejich využitelnost v praxi, zejména v souvislosti s digitálním řízením reálných soustav.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Základy automatického řízení

### 1.1.1 Systém a řízený proces

Automatické řízení představuje jednu ze stěžejních oblastí technické praxe, která umožňuje ovládat procesy a systémy bez nutnosti přímého zásahu člověka. S rozvojem moderních technologií, mikroprocesorové techniky a automatizačních prostředků se automatické řízení stalo nedílnou součástí nejen průmyslu, ale také dopravy, domácí techniky, zdravotnictví nebo energetiky. Obecným cílem řízení je dosáhnout, aby se řízený proces choval žádoucím způsobem – tedy tak, jak odpovídá zadaným požadavkům. Typicky to znamená udržovat určitou fyzikální veličinu (např. teplotu, tlak, rychlost, hladinu apod.) na požadované hodnotě nebo podle požadovaného časového průběhu.

V automatickém řízení rozlišujeme několik základních pojmů:

- **Systém** – obecný soubor prvků, které společně vykazují určitý vstupně-výstupní vztah. Může být mechanický, elektrický, tepelný nebo jiného typu.
- **Řízený proces (soustava)** – fyzikální jev nebo zařízení, jehož chování je předmětem řízení.
- **Řídicí systém** – technické zařízení, které vyhodnocuje stav procesu a podle nastavených pravidel rozhoduje o potřebném zásahu.

Řízení může být ruční (manuální) nebo automatické. V automatickém řízení je zásah do systému realizován na základě měřených údajů, obvykle pomocí regulační smyčky, jejíž jádrem je regulátor.

### 1.1.2 Základní prvky automatického řízení

Každý automatický řídicí systém je tvořen několika klíčovými částmi, které spolu vzájemně komunikují a zajišťují požadované chování řízeného procesu. Tyto prvky jsou funkčně propojeny do uzavřené smyčky, která umožňuje systému reagovat na aktuální stav řízené veličiny a podle potřeby jej upravovat. Na začátku celého řetězce stojí snímače, neboli senzory, které měří fyzikální veličiny v daném systému, jako je teplota, tlak, hladina, poloha či rychlost. Úkolem těchto prvků je převést měřenou fyzikální veličinu na elektrický signál, který může být dále zpracován řídicím systémem. Senzory tak poskytují důležitou zpětnou vazbu o chování

řízené soustavy. Získané informace ze senzorů vstupují do regulátoru, který tvoří mozek celého systému. Regulátor neustále porovnává aktuální hodnotu výstupní veličiny s požadovanou hodnotou (tzv. žádanou hodnotou) a na základě této odchylky vypočítává řídicí zásah. Ten má za úkol minimalizovat rozdíl mezi skutečným a požadovaným stavem, čímž se systém přibližuje ke stabilnímu a přesnému chování. Volba typu regulátoru a jeho nastavení zásadně ovlivňuje kvalitu celého řízení. Výstupem regulátoru je signál, který je předán akčnímu členu. Ten převádí řídicí signál na konkrétní fyzický zásah do systému – může jít například o otevření ventilu, změnu otáček motoru nebo úpravu napětí. Akční člen tedy přímo ovlivňuje chování řízené soustavy tak, aby odpovídalo požadovaným parametrům. Řízená soustava je tím prvkem, který je cílem veškerého řízení. Může jí být například ohřívač vody, dopravní pás, motor nebo chemický reaktor – zkrátka jakýkoli technický nebo fyzikální systém, jehož stav je potřeba automaticky upravovat. Výsledkem zásahu do soustavy je změna řízené veličiny, která je opět snímána senzory, a tím se celý regulační cyklus uzavírá.

Celý tento systém vytváří zpětnovazební smyčku, která je základním stavebním kamenem moderní automatizace. Právě díky zpětné vazbě je možné zajistit dynamickou reakci na poruchy, odchylky nebo změny v prostředí, ve kterém řízený proces probíhá.

### **1.1.3 Typy řízení**

#### **• Otevřené řízení**

System pracuje bez zpětné vazby – nevyhodnocuje výsledek svého působení. Používá se tam, kde lze chování soustavy přesně předpovědět (např. časovače, jednoduché spínače).

#### **• Uzavřené (zpětnovazební) řízení**

Regulátor porovnává požadovaný stav se skutečným a upravuje řízení podle vzniklé odchylky. Výhodou je schopnost reagovat na poruchy a odchylky systému v reálném čase.

### **1.1.4 Diskrétní a spojitě řízení**

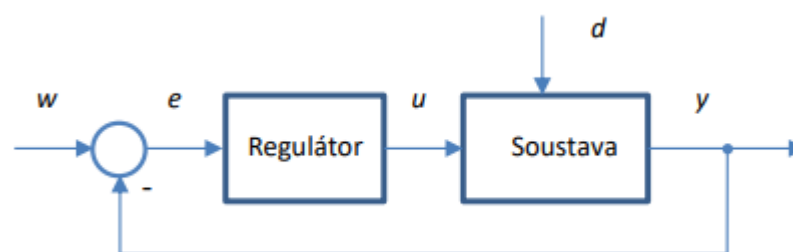
Regulační systémy lze obecně rozdělit podle způsobu zpracování signálů na spojitě a diskrétní. Spojitě řízení pracuje s plynule se měnícími veličinami v reálném čase – výstup reaguje na každou změnu okamžitě a bez přerušení. Typické je pro analogové obvody a dřívější systémy automatizace. Naopak diskrétní řízení, dnes nejrozšířenější, zpracovává data v pravidelných časových intervalech. Systém tedy pracuje pouze s hodnotami vzorkovanými v předem stanovených okamžicích. Tento přístup se pojí s využitím digitálních technologií, mikroprocesorů a PLC.

Při návrhu diskretního regulátoru je třeba přizpůsobit klasické metody spojitého řízení – například převést model řízené soustavy do diskretní podoby a zvolit vhodnou vzorkovací periodu. Tato volba výrazně ovlivňuje chování celého systému. Příliš dlouhá vzorkovací doba může způsobit nestabilitu nebo zpožděnou reakci, zatímco příliš krátká zvyšuje výpočetní náročnost. I když spojité řízení má své výhody u některých rychlých systémů, v moderní praxi převažuje řízení diskretní, a to zejména díky přesnosti, flexibilitě a snadné implementaci ve výpočetní technice.

## 1.2 Uzavřený regulační obvod

Uzavřený regulační obvod představuje základní a nejpoužívanější strukturu automatického řízení. Jeho hlavní výhodou je schopnost neustále reagovat na změny v systému i na vnější poruchy prostřednictvím zpětné vazby, čímž se dosahuje požadovaného výstupního chování bez nutnosti ručního zásahu. Klíčovým prvkem řízeného systému je zpětnovazební obvod. Ten tvoří základní strukturu řízení, ve které se výstupní veličina systému – například teplota, tlak nebo rychlost – neustále měří a porovnává s požadovanou hodnotou (žádanou veličinou). Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami se nazývá regulační odchylka. Tato odchylka je vstupem pro regulátor, který na jejím základě upravuje řídicí zásah tak, aby se výstup co nejvíce přiblížil požadované hodnotě. Zpětná vazba umožňuje systému samostatně reagovat na poruchy nebo změny podmínek. Pokud například teplota v systému náhle klesne, měřicí člen tuto změnu zachytí, regulátor vyhodnotí odchylku a zvýší řídicí zásah – například otevřením ventilu nebo zvýšením výkonu topného tělesa. Jakmile se teplota přiblíží zpět k požadované hodnotě, regulační zásah se opět sníží. Tento mechanismus je základem uzavřeného regulačního okruhu, který je v praxi mnohem účinnější než řízení bez zpětné vazby.

### 1.2.1 Blokové schéma URO



Obrázek 1: Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu(HONC,2024)

kde:

- $w$  je žádaná hodnota
- $e$  je regulační odchylka
- $u$  je akční veličina
- $d$  je poruchová veličina
- $y$  je regulovaná veličina

Cílem je minimalizovat odchylku  $e$ , tedy aby se skutečný výstup  $y$  co nejvíce blížil požadovanému  $w$

Funkce tohoto obvodu je založena na principu neustálého přizpůsobování. Pokud dojde ke změně v systému – například k poruše, odchylce nebo změně požadavku – obvod tuto změnu zaznamená prostřednictvím měření, vypočítá novou regulační odchylku a podle ní upraví řídicí zásah. Díky tomu je výstupní veličina neustále „honěna“ směrem k žádané hodnotě.

Uzavřený regulační obvod tak umožňuje:

- kompenzovat poruchy, které ovlivňují řízený proces,
- zajistit přesnost (malou trvalou odchylku mezi výstupem a požadovanou hodnotou),
- zvýšit stabilitu a zkrátit čas ustálení soustavy.

### **1.2.2 Výhody a nevýhody zpětnovazebního řízení**

**Výhody:**

- Odolnost vůči poruchám a změnám parametrů,
- Možnost přesné regulace výstupu,
- Vysoká flexibilita a stabilita řízení.

**Nevýhody:**

- Složitější návrh regulátoru,
- Potřeba senzorky a měření,
- Možné problémy se stabilitou při špatně navrženém řízení.

### 1.3 Model řízené soustavy

V oblasti automatického řízení hraje klíčovou roli schopnost popsat reálný fyzikální systém pomocí matematického modelu. Takový model umožňuje simulaci chování soustavy, analýzu stability, návrh vhodného regulátoru a celkovou optimalizaci řízení bez nutnosti opakovaného testování na skutečném zařízení. Díky modelování lze výrazně snížit náklady i čas potřebný pro návrh a ladění řídicích systémů. Model řízené soustavy tedy představuje zjednodušený obraz reálného procesu, který zachycuje podstatné dynamické vlastnosti systému, jako jsou odezva na vstup, zpoždění, setrvačnost, zesílení nebo nelinearity. Tyto vlastnosti se vyjadřují pomocí matematických vztahů, nejčastěji diferenciálních, diferenčních rovnic nebo převodních funkcí. Výsledný model nemusí být zcela přesný, měl by však být dostatečně reprezentativní pro účely řízení.

Spojité lineární model soustavy prvního řádu s časovou invariantností (LTI) patří mezi nejčastěji používané přístupy při popisu dynamických systémů díky své jednoduchosti a srozumitelnosti. Přestože se jedná o zjednodušený model, dokáže dostatečně vystihnout základní charakteristiky řady technických procesů. Pro účely digitálního řízení je pak tento typ modelu převáděn do diskretní podoby, aby mohl být využit v systémech s číslicovým regulátorem.

#### 1.3.1 Proporcionální soustava prvního řádu

Soustava prvního řádu je jeden z nejjednodušších dynamických systémů, který se často používá k popisu technických a fyzikálních procesů. Typickým příkladem může být elektrický RC obvod, tepelný systém s určitou setrvačností nebo hydraulický systém s lineární dynamikou. Tento model je zvláště vhodný tam, kde výstupní veličina reaguje na změnu vstupu s určitou setrvačností, ale bez oscilací či složitější dynamiky

Obecně platí, že chování dynamických systémů může být popsáno pomocí diferenciálních rovnic, které vyjadřují vztah mezi vstupem a výstupem systému. U soustavy prvního řádu se jedná o diferenciální rovnici prvního řádu.

Za předpokladu lineárního chování systému a časové invariantnosti lze soustavu popsat rovnicí:

$$T \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot u(t) \quad (1.3.1.)$$

kde:

- $y(t)$  je výstupní signál
- $u(t)$  je vstupní signál
- $T$  je časová konstanta
- $K$  je statické zesílení,

čily to znamená, že časová konstanta  $T$  charakterizuje rychlost odezvy systému a udává dobu, za kterou výstup dosáhne přibližně 63 % své konečné hodnoty po skokové změně vstupu. Zesílení  $K$  vyjadřuje poměr mezi ustálenou hodnotou výstupu a velikostí vstupu, tedy jak silně systém reaguje na daný podnět.

### 1.3.2 Spojitá přenosová funkce soustavy

Pro účely analýzy se často přechází do frekvenční (operátorové) oblasti pomocí Laplaceovy transformace, kde se derivace převede na násobek operátoru  $s$ . Aplikací Laplaceovy transformace (při nulových počátečních podmínkách) se dostane:

$$T \cdot s \cdot Y(s) + Y(s) = K \cdot U(s) \quad (1.3.2)$$

Vytkne se  $Y(s)$ :

$$Y(s) \cdot (T \cdot s + 1) = K \cdot U(s) \quad (1.3.3)$$

A získá se spjitá přenosová funkce soustavy, což je poměr výstupu a vstupu v Laplaceově oblasti:

$$S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (1.3.4)$$

### 1.3.3 Diskrétní přenosová funkce soustavy

Vzhledem k tomu, že cílem je návrh regulátoru v diskrétní podobě, je nezbytné popsat model řízené soustavy rovněž pomocí přenosové funkce ve  $z$ -diskrétní doméně. Tento popis umožňuje analýzu a návrh řídicího algoritmu přímo v prostředí číslicového řízení

Pomocí metody *Zero-Order Hold (ZOH)*, jejíž princip spočívá v tom, že vstupní signál je během každého vzorkovacího intervalu  $T_s$  udržován konstantní, lze spojité model soustavy převést do diskrétní podoby. Tato metoda věrně napodobuje chování reálných digitálních řídicích systémů, kde se výpočty provádějí pouze v diskrétních časových okamžicích. Aplikací *ZOH* na spojité model soustavy prvního řádu pak získáme diskrétní přenosovou funkci ve tvaru:

$$S(z) = \frac{bz^{-1}}{1 + az^{-1}} \quad (1.3.5)$$

kde parametry  $a$  a  $b$  závisí na vlastnostech spojité soustavy a zvolené vzorkovací periodě.

Parametr  $a$  vyjadřuje vliv předchozího výstupu na aktuální stav systému a odpovídá přirozenému útlumu danému časovou konstantou soustavy:

$$a = -e^{-\frac{T_s}{T}} \quad (1.3.6)$$

Parametr  $b$  určuje velikost odezvy na vstupní signál a zohledňuje jak zesílení systému, tak vliv vzorkovací periody:

$$b = K(1 + a) \quad (1.3.7)$$

Zpoždění  $z^{-1}$  reprezentuje jeden vzorkovací interval zpoždění, což odpovídá skutečnosti, že výpočet výstupu v diskrétním systému vychází z hodnot vstupu a výstupu z předchozího časového okamžiku

## 1.4 Regulace a PI regulátor

### 1.4.1 Regulace a regulátor

Regulace je proces řízení, jehož cílem je udržet určitou veličinu na požadované hodnotě nebo v požadovaném rozsahu hodnot, i když se okolní podmínky mění. V praxi je regulace nezbytná pro automatické řízení systémů, kde je potřeba reagovat na odchylky od požadované hodnoty a upravit vstupy tak, aby se systém vrátil do požadovaného stavu. Regulace se obvykle provádí prostřednictvím regulátorů, které vyhodnocují aktuální hodnotu sledované veličiny a na základě této hodnoty vypočítávají řízení (tj. výstupní signál) pro zajištění požadovaného chování systému.

Regulátor je zařízení nebo algoritmus, který provádí řízení určitého systému. Jeho úkolem je vyhodnocovat regulační odchylku, což je rozdíl mezi požadovanou hodnotou (nastavenou hodnotou) a aktuální hodnotou sledované veličiny. Na základě této odchylky regulátor vypočítá

řídící signál, který ovlivňuje řízený systém tak, aby se odchylka co nejdříve odstranila. Regulátory se dělí na různé typy podle toho, jakým způsobem reagují na tuto odchylku. Mezi nejběžnější typy patří proporcionální (P), proporcionálně-integrační (PI), proporcionálně-diferenciální (PD) a proporcionálně-integračně-diferenciální (PID) regulátory

### 1.4.2 Spojitý PI regulátor

PI regulátor (Proporcionálně-Integrační regulátor) je jedním z nejběžněji používaných regulátorů, který kombinuje dvě složky:

- **Proporcionální složka (P):** Tato složka je přímo úměrná regulační odchylce  $e(t)$ , tedy rozdílu mezi požadovanou hodnotou a aktuální hodnotou sledované veličiny. Její úloha je okamžitě reagovat na odchylky a jejich zmenšení.
- **Integrační složka (I):** Tato složka integruje regulační odchylku v čase, čímž odstraňuje dlouhodobé (statické) odchylky, které by jinak v systému zůstaly.

Matematicky je PI regulátor ve spojitém čase vyjádřen jako:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (1.4.1)$$

kde:

- $u(t)$  je výstupní signál
- $K_p$  je proporcionální zesílení
- $e(t)$  je regulační odchylka
- $T_i$  je integrační časová konstanta
- $\frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$  je integrační složka, která sčítá chybu v čase

Pro analýzu v oblasti řízení se často pracuje v Laplaceově doméně, kde integrál má známý obraz:

$$L \left\{ \int_0^t e(\tau) d\tau \right\} = \frac{E(s)}{s} \quad (1.4.2)$$

A protože Laplaceova transformace je lineární, celé rovnici PI regulátoru odpovídá v Laplaceově doméně:

$$U(s) = Kp(E(s) + \frac{1}{Ti} \cdot \frac{E(s)}{s}) \quad (1.4.3)$$

Vytkne se E(s):

$$U(s) = Kp \cdot E(s) \cdot (1 + \frac{1}{Tis}) \quad (1.4.4)$$

Tedy přenosová funkce PI regulátoru je:

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Kp \cdot (1 + \frac{1}{Tis}) \quad (1.4.5)$$

### 1.4.3 Diskrétní PI regulátor

Diskrétní PI regulátor operuje ve vzorcích (krocích) a jeho výpočet se provádí v pravidelných časových intervalech. Princip činnosti spočívá v tom, že v každém časovém kroku regulátor vyhodnotí aktuální regulační odchylku, zkombinuje ji s dříve naměřenými hodnotami a podle předem nastavených parametrů vypočítá nový řídicí signál, který ovlivňuje chování řízeného systému.

V rámci návrhu diskrétního PI regulátoru je potřeba převést spojitou přenosovou funkci regulátoru do diskrétní podoby. K tomu lze využít různé aproximační metody. Jednou z nejjednodušších je dopředná Eulerova metoda, která umožňuje přibližně nahradit spojitý operátor s diskrétním z-transformovaným výrazem.

#### Princip Eulerovy metody:

Eulerova metoda vychází z numerické aproximace derivace:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x[k] - x[k - 1]}{T} \quad (1.4.6)$$

kde:

- $x[k]$  je hodnota veličiny ve vzorku  $k$
- $T$  je vzorkovací perioda

Tato metoda se používá k nahrazení derivací (nebo integrálů) spojitých systémů pomocí rozdílových rovnic, což umožňuje implementaci ve vzorkovaných systémech. V Laplaceově transformaci odpovídá operátor s derivací, a proto Eulerova metoda aproximuje:

$$s \approx \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (1.4.7)$$

Tento vztah lze následně dosadit do přenosové funkce spojitého regulátoru (1.4.5):

$$R(z) = Kp \cdot \left( 1 + \frac{1}{Ti \cdot \left( \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)} \right) = Kp \left( 1 + \frac{T}{Ti(1 - z^{-1})} \right) \quad (1.4.8)$$

Následně se rovnice upraví na tvar se společným jmenovatelem:

$$R(z) = \frac{Kp \cdot (1 - z^{-1}) + Kp \frac{T}{Ti}}{1 - z^{-1}} \quad (1.4.9)$$

Diskrétní PI regulátor lze tedy vyjádřit jako přenosovou funkci ve tvaru:

$$R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (1.4.10)$$

kde:

- $q_0 = Kp(1 + \frac{T}{Ti})$ , reprezentuje váhu aktuální regulační odchylky a zahrnuje jak proporcionální, tak integrační složku
- $q_1 = -Kp$ , představuje záporný vliv předchozí odchylky a vyplývá z vlastností integračního členu v diskrétní oblasti.

## 1.5 Návrh diskrétního PI regulátoru pomocí metody umístění pólů

V této kapitole je prezentována metoda návrhu diskrétního PI regulátoru pro řízení lineárního diskrétního systému. Konkrétně je využita metoda umístění pólů (*pole placement*), která umožňuje určit parametry regulátoru tak, aby výsledná uzavřená smyčka měla požadované dynamické vlastnosti, jako je rychlost odezvy, překmit nebo stabilita

### 1.5.1 Princip metody umístění pólů

Metoda umístění pólů je založena na požadavku, aby kořeny charakteristické rovnice uzavřeného systému (tedy póly) ležely v předem zvolených místech komplexní z-roviny. Tato poloha pólů přímo určuje dynamickou odezvu systému. Například:

- Čím blíže k počátku leží póly, tím je systém rychlejší.
- Póly blíže jednotkovému kruhu znamenají pomalejší odezvu.
- Komplexně sdružené póly ovlivňují výskyt a velikost překmitu.

Pro diskretní systémy je nutné, aby všechny póly výsledného systému ležely uvnitř jednotkového kruhu ( $|z| < 1$ ), jinak bude systém nestabilní.

### 1.5.2 Postup návrhu PI regulátoru

Uvažujme diskretní lineární systém popsany přenosovou funkcí (1.3.5) a diskretní PI regulátor (1.4.10). Přenosová funkce uzavřené smyčky je pak dána vztahem:

$$Furo(z) = \frac{R(z)S(z)}{1 + R(z)S(z)} \quad (1.5.1)$$

Z jmenovatele této funkce se určuje charakteristická rovnice uzavřené smyčky:

$$1 + R(z)S(z) = 0 \quad (1.5.2)$$

Dosadí se za  $R(z)$  a  $S(z)$ :

$$1 + \frac{bz^{-1}}{1 + az^{-1}} \cdot \frac{q_0 + q_1z^{-1}}{1 - z^{-1}} = 0 \quad (1.5.3)$$

Součinem těchto dvou zlomků vznikne:

$$R(z)S(z) = \frac{bz^{-1} \cdot (q_0 + q_1z^{-1})}{(1 + az^{-1}) \cdot (1 - z^{-1})} \quad (1.5.4)$$

Po roznásobení čitatele a jmenovatele:

$$1 + \frac{bq_0z^{-1} + bq_1z^{-2}}{1 + (a - 1)z^{-1} - az^{-2}} = 0 \quad (1.5.4)$$

Provede se převedení na společný jmenovatel:

$$\frac{(1 + (a - 1)z^{-1} - az^{-2}) + bq_0z^{-1} + bq_1z^{-2}}{1 + (a - 1)z^{-1} - az^{-2}} = 0 \quad (1.5.5)$$

V čitateli dojde k seskupení členů:

$$\frac{1 + [(a - 1) + bq_0]z^{-1} + [-a + bq_1]z^{-2}}{1 + (a - 1)z^{-1} - az^{-2}} = 0 \quad (1.5.6)$$

Vynásobením rovnice jmenovatelem dojde k odstranění zlomku, a rovnice se zjednoduší na čítec rovný nule:

$$z^{-2} \cdot [z^2 + ((a - 1) + bq_0)z + (-a + bq_1)] = 0 \quad (1.5.7)$$

a tedy charakteristická rovnice je:

$$z^2 + ((a - 1) + bq_0)z + (-a + bq_1) = 0 \quad (1.5.8)$$

Táto kvadratická rovnice se porovná s požadovanou charakteristickou rovnicí:

$$z^2 + c_1 z + c_2 = 0 \quad (1.5.9)$$

Čímž se získá soustava rovnic pro výpočet  $q_0$  a  $q_1$ :

$$c_1 = (a - 1) + bq_0 \quad (1.5.10)$$

$$c_2 = -b + bq_1 \quad (1.5.11)$$

Výstupem této metody jsou konkrétní hodnoty koeficientů diskrétního PI regulátoru, které zajistí, že uzavřená regulační smyčka bude mít požadovanou dynamickou odezvu

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této bakalářské práce je rozdělena do dvou hlavních celků, které se navzájem doplňují a společně slouží k ověření funkčnosti a účinnosti diskrétního PID regulátoru navrženého pomocí metody umístění pólů.

První část se zaměří na vytvoření simulačního prostředí v softwaru *MATLAB/Simulink*. V této fázi se navrhne a implementuje diskrétní PI regulátor, jehož parametry jsou určeny analyticky právě metodou umístění pólů, a to na základě zvolených charakteristik uzavřené smyčky. Regulátor je následně aplikován na několik typových modelů řízených soustav – konkrétně lineární systémy prvního a druhého řádu.

Druhá část se věnuje realizaci reálného řízení. K tomuto účelu se využije laboratorní zařízení *RT 050*, které slouží jako fyzická soustava. Do simulačního schématu vytvořeného v *Simulinku* se místo modelované soustavy vloží blok *RT 050* jako reálný subsystém, přičemž zbytek regulační struktury – včetně generátoru žádané hodnoty, PI regulátoru a zpětnovazební smyčky – zůstává zachován. Regulátor pracuje se stejnými parametry jako v předchozích simulacích, což umožňuje přímé porovnání mezi simulačním a reálným řízením.

### 2.1 Identifikace modelu řízené soustavy

#### 2.1.1 Měření dat pro identifikace

Pro účely identifikace modelu se využije laboratorní soustava řízená pomocí systému *RT 050*. Pomocí předem připraveného modelu v prostředí *Simulink* se na soustavu aplikuje známý vstupní signál a zaznamená se odezva výstupní veličiny

Naměřená data – tedy časové průběhy vstupu, výstupu a času – se následně exportují a použijí pro identifikaci přenosové funkce systému.

Vstupní a výstupní veličiny se centrováním upraví odečtením ustálených hodnot, aby se usnadnily výpočty. Na základě těchto dat se následně provede identifikace matematického modelu systému ve formě přenosové funkce prvního a druhého řádu.

Pro lepší orientaci v naměřených datech se nejprve vykreslí časový průběh vstupní a výstupní veličiny. K tomuto účelu slouží jednoduchý skript v prostředí *MATLAB*, který umožňuje vizuálně ověřit odezvu soustavy na vstupní signál:

```
load data

figure

t=data.Time;

u=data.Data(:,1);

y=data.Data(:,2);

plot(t,u,t,y)

legend('Vstupní signál (u)', 'Výstupní signál (y)')

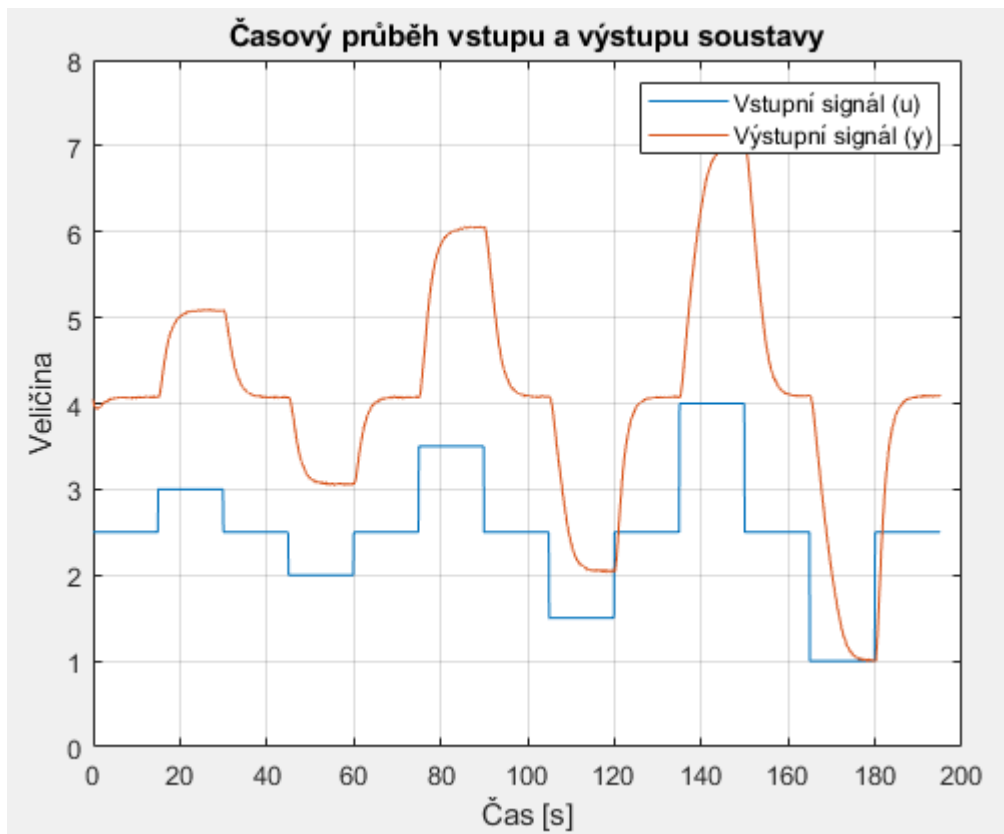
xlabel('Čas [s]')

ylabel('Veličina')

title('Časový průběh vstupu a výstupu soustavy')

grid on
```

Skript slouží k načtení naměřených dat ze souboru *data.mat*, rozdělení dat na časový vektor *t*, vstupní veličinu *u* a výstupní veličinu *y*, a k jejich následnému vykreslení do společného grafu. Graf slouží k vizuálnímu zhodnocení dynamiky systému a kvality měření. Pomocí legendy, popisků os a mřížky je zajištěna lepší čitelnost a interpretace zobrazených průběhů.



Obrázek 2: Časové průběhy vstupní a výstupní veličiny naměřené na laboratorní soustavě

### 2.1.2 Identifikace modelu soustavy 1. řádu

Pro návrh vhodného regulátoru je nutné znát dynamické vlastnosti řízené soustavy. Jedním ze způsobů, jak tyto vlastnosti získat, je vytvoření matematického modelu systému na základě experimentálně naměřených dat – proces označovaný jako identifikace. Táto část práce se zaměří na identifikaci modelu soustavy ve tvaru přenosové funkce 1. řádu, která představuje jednoduchý, ale často postačující model pro reálné technické soustavy s jedním dominantním časovým konstantním členem. Identifikace začíná definicí kritéria shody mezi výstupem simulovaného modelu a skutečným měřením:

```
function K=krit1(X,t,u,y)
```

```
k=X(1);
```

```
T=X(2);
```

```
S=tf(k,[T 1]);
```

```
yo=lsim(S,u,t,'zoh');
```

```
K=(y-yo)'*(y-yo);
```

Funkce *krit1* slouží k výpočtu kvadratického kritéria přesnosti modelu prvního řádu ve tvaru přenosové funkce. Na základě zadaných parametrů (zesílení  $k$  a časová konstanta  $T$ ) simuluje odezvu modelu na vstupní signál pomocí funkce *lsim* s metodou *zoh* (zero-order hold) a následně porovná simulovanou odezvu s reálným výstupem. Výstupem funkce je součet čtverců rozdílů mezi modelovaným a skutečným výstupem, který slouží jako optimalizační kritérium při identifikaci parametrů.

Na základě výše definovaného kritéria v následujícím kroku se provede samotná identifikace parametrů přenosové funkce prvního řádu pomocí optimalizační metody. Tento proces je realizován ve skriptu *ident1*, kde se využijí experimentálně naměřená data a pomocí minimalizace kvadratické chyby mezi simulovanou a skutečnou odezvou systému se určí optimální hodnoty parametrů zesílení  $k$  a časové konstanty  $T$ :

```
load data
```

```
z = 101; k = 1951;
```

```
t = data.Time(z:k) - data.Time(z);
```

```
u = data.Data(z:k,1);
```

```
y = data.Data(z:k,2);
```

```
u0 = 2.5; y0 = 4.1;
```

```
X = fminsearch('krit1', [1 1], [], t, u - u0, y - y0);
```

```
k = X(1);
```

```
T = X(2);
```

```
S = tf(k, [T 1]);
```

```
yo = lsim(S, u - u0, t, 'zoh') + y0;
```

```
figure
```

```
stairs(t,u), hold on, plot(t,y, 'y', t, yo, 'r--'), grid
```

```
legend('Vstup', 'Naměřený výstup', 'Modelovaný výstup')
```

```
title('Porovnání modelu a měření')
```

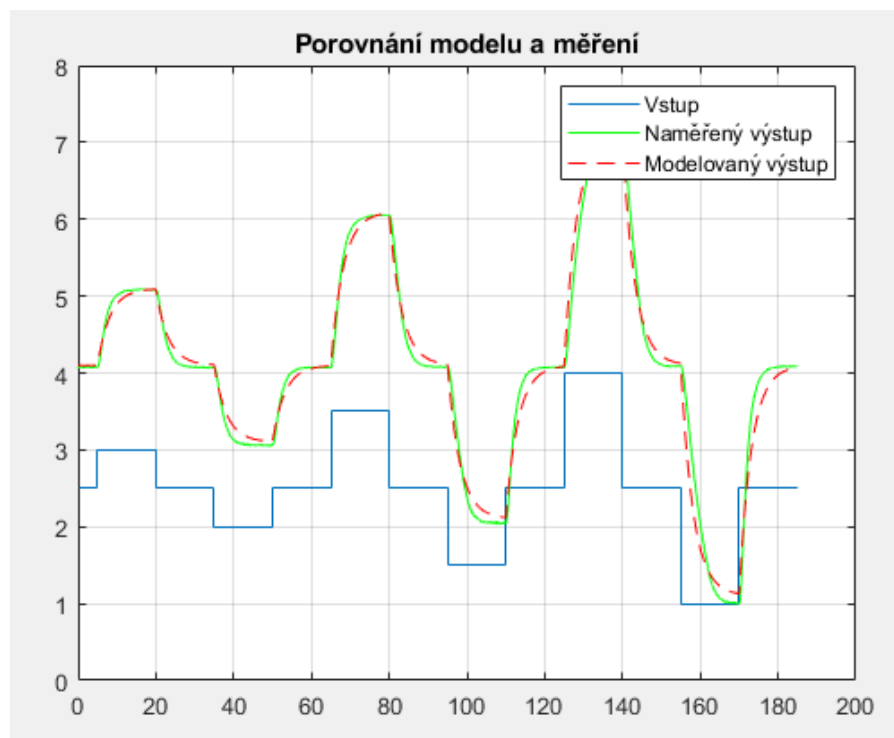
Na základě předzpracovaných dat se v prostředí *MATLAB* provede odhad parametrů přenosové funkce 1. řádu. K optimalizaci parametrů se využije funkce *fminsearch*, která minimalizuje rozdíl mezi výstupem modelu a naměřenou odezvou soustavy. Po určení parametrů se sestaví spojitá přenosová funkce, jejíž odezva se porovná s experimentálními daty v grafické podobě.

$$S(s) = \frac{2}{3s + 1} \quad (2.2.1)$$

Pro účely návrhu digitálního regulátoru se následně přenosová funkce převede do diskrétního tvaru pomocí metody *ZOH* pro zvolený interval vzorkování  $T_s = 0,1$  s.

$$S(z) \approx \frac{0,06z^{-1}}{1 + 0,9z^{-1}} \quad (2.2.2)$$

Pro vizualizaci výsledků se vygeneruje graf, který porovnává skutečně naměřená data s simulovanou odezvou modelu. Na grafu je zobrazen vstupní signál (vstupní veličina), naměřený výstup a modelovaný výstup na základě získané přenosové funkce. Tento graf slouží k posouzení kvality shody mezi modelovanou a skutečnou odezvou, což je klíčové pro ověření přesnosti vytvořeného modelu.



Obrázek 3: Porovnání modelu a měření soustavy 1. řádu

### 2.1.3 Identifikace modelu soustavy 2. řádu

Ačkoli model 1. řádu často postačuje pro hrubou aproximaci dynamiky některých systémů, v mnoha případech je jeho přesnost nedostatečná – zejména pokud se v odezvě systému projevuje výraznější setrvačnost, kmitání nebo překmity. V takových situacích je vhodné přistoupit k identifikaci přesnějšího modelu vyššího řádu. Nejbližším rozšířením je model soustavy 2. řádu, který umožňuje zachytit nejen rychlost odezvy, ale i její charakter, například tlumené oscilace nebo přechodové jevy typické pro mechanické, hydraulické či elektrické systémy

Prvním krokem identifikace je formulace kritéria, které vyjadřuje rozdíl mezi výstupem modelu a naměřenými daty.

```
function K=krit2(X,t,u,y)
```

```
k=X(1);
```

```
T1=X(2);
```

```
T2=X(3);
```

```
S=tf(k,[T1*T2 T1+T2 1]);
```

```
yo=lsim(S,u,t,'zoh');
```

```
K=(y-yo)'*(y-yo);
```

Funkce *krit2* slouží k vyhodnocení přesnosti modelu druhého řádu na základě kvadratického kritéria. Vstupními parametry jsou zesílení  $k$  a dvě časové konstanty  $T1$  a  $T2$ , z nichž je sestavena přenosová funkce odpovídající soustavě druhého řádu. Odezva modelu na daný vstupní signál je vypočítána pomocí funkce *lsim*, která využívá metodu nulového řádu podržení *zoh*. Výsledná simulovaná odezva je následně porovnána s reálnými naměřenými daty a návratovou hodnotou funkce je suma čtverců rozdílů mezi oběma výstupy. Tato hodnota slouží jako kritérium optimalizace při hledání nejvhodnějších parametrů modelu.

V následujícím kroku na základě dříve definovaného kritéria se provede optimalizace parametrů přenosové funkce druhého řádu. Proces identifikace se realizuje ve skriptu *ident2*, kde se využijí naměřená experimentální data. Pomocí minimalizace kvadratické odchylky mezi skutečnou odezvou systému a simulovanou odpovědí modelu se určí nejvhodnější hodnoty parametrů zesílení  $k$  a časových konstant  $T1$  a  $T2$ . Tento přístup umožňuje přesnější zachycení dynamiky systému a zajišťuje, že model lépe vystihuje reálné chování řízené soustavy:

```

load data

z=101; k=1951;

t=data.Time(z:k)-data.Time(z);

u=data.Data(z:k,1);

y=data.Data(z:k,2);

plot(t,u,t,y), grid

u0=2.5; y0=4.1;

X=fminsearch('krit2',[1 1 1],[],t,u-u0,y-y0);

k=X(1);

T1=X(2);

T2=X(3);

S=tf(k,[T1*T2 T1+T2 1]);

yo=lsim(S,u-u0,t,'zoh')+y0;

figure

stairs(t,u), hold on, plot(t,y, 'g', t, yo, 'r--'), grid

legend('Vstup', 'Naměřený výstup', 'Modelovaný výstup')

title('Porovnání modelu a měření')

```

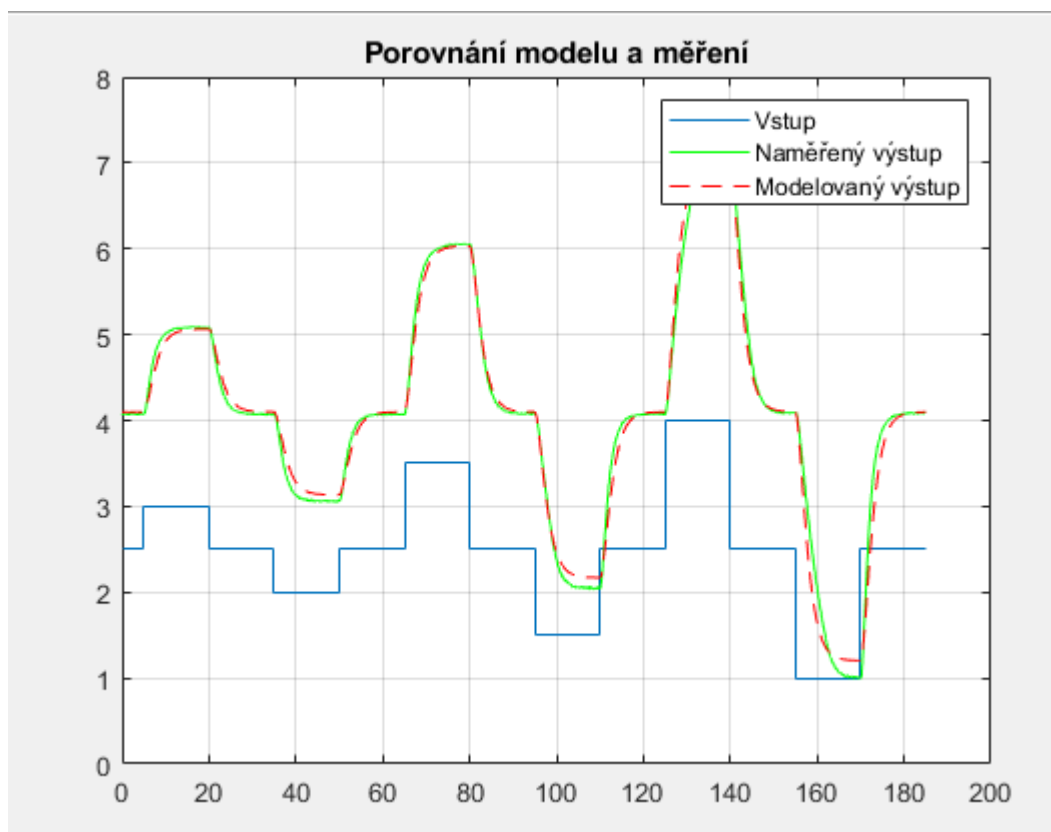
Kód začíná načtením experimentálních dat a výběrem jejich části pro analýzu. Vektory času  $t$ , vstupního signálu  $u$  a odpovídajícího výstupu  $y$  jsou připraveny pro další zpracování. Pro identifikaci parametrů modelu druhého řádu je použita optimalizační funkce *fminsearch*, která na základě definovaného kritéria minimalizuje rozdíl mezi naměřenými daty a simulovanou odezvou modelu. Optimalizací získané hodnoty parametrů  $k$ ,  $T1$  a  $T2$  jsou následně využity pro sestavení spojitě přenosové funkce druhého řádu ve tvaru:

$$S(s) = \frac{2}{(1,5s + 1)^2} \quad (2.3.1)$$

Převod spojitého modelu na diskretní je proveden s využitím metody ZOH a stejnou periodu vzorkován jako v případě prvního řádu. Tento model bude použit pro zpřesnění simulace řízení.

$$S(z) = \frac{0,004z + 0,004}{z^2 - 1,87z + 0,88} \quad (2.3.2)$$

Pro znázornění výsledků je vytvořen graf, který ukazuje srovnání mezi experimentálně naměřenými daty a simulovanou odezvou modelu. V grafu je vykreslen vstupní signál, změřený výstup a výstup získaný na základě identifikovaného modelu. Tento přehled slouží k vyhodnocení míry shody mezi reálnou a modelovanou odezvou systému, což je zásadní pro posouzení přesnosti zvoleného modelu.



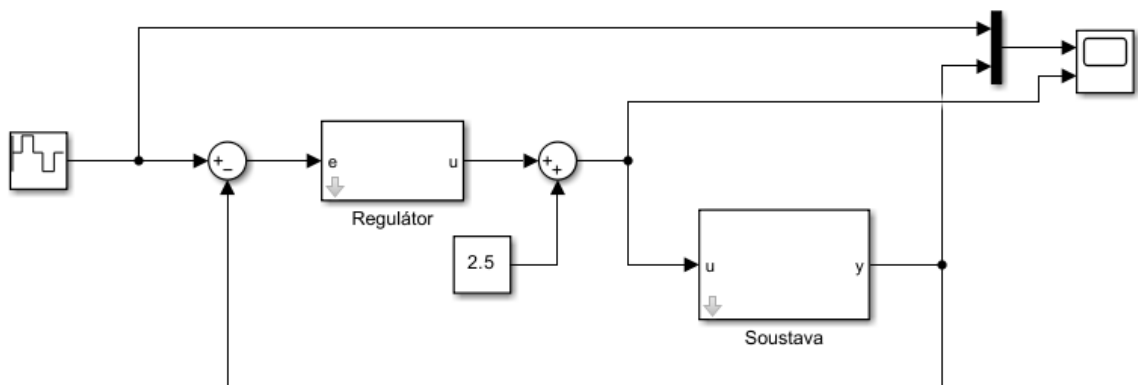
Obrázek 4: Porovnání modelu a měření soustavy 2. řádu

## 2.2 Návrh diskrétního PI regulátoru v Simulinku

Návrh regulátoru tvoří zásadní krok v procesu řízení technického systému, neboť přímo ovlivňuje jeho stabilitu, rychlost odezvy i přesnost regulace. V této části práce je využito simulačního prostředí Simulink, které poskytuje robustní platformu pro modelování a návrh řídicích struktur v diskrétním čase. Díky blokovému přístupu lze s vysokou mírou přehlednosti a modularity sestavit kompletní regulační smyčku, zahrnující nejen samotný PI regulátor, ale také zpětnovazební propojení, přizpůsobení vstupů a výstupů, vzorkování a další logické prvky. Výhodou tohoto přístupu je možnost okamžité simulace odezvy systému, ladění parametrů a ověřování funkčnosti návrhu před jeho reálným nasazením. Tato kapitola se zaměřuje na sestavení blokového modelu diskrétního PI regulátoru v *Simulinku*, popis jednotlivých komponent a vytvoření ovládacího rozhraní (masky) pro zadávání parametrů. Cílem je navrhnout plně funkční řídicí strukturu, která umožní efektivní simulaci i další ladění v rámci praktických testů.

### 2.2.1 Blokové schéma URO

Na následujícím obrázku je znázorněno blokové schéma implementace diskrétního PI regulátoru navrženého v simulačním prostředí *Simulink*.



Obrázek 5: Blokové schéma URO s diskrétním PI regulátorem

Zobrazené schéma představuje uzavřenou regulační smyčku realizovanou v prostředí *Simulink*. Referenční signál je generován blokem *Repeating Sequence Stair* a vstupuje do výpočtu regulační odchylky. Na jejím základě PI regulátor, implementovaný jako maskovaný blok s uživatelsky nastavitelnými parametry  $K_p$  a  $T_i$  vytváří akční zásah. Ten je upraven o pracovní bod (např. 2,5) a přiveden na model řízené soustavy, rovněž zadané ve formě maskovaného bloku s definovanou přenosovou funkcí. Výstup soustavy je zobrazován pomocí *Scope* a

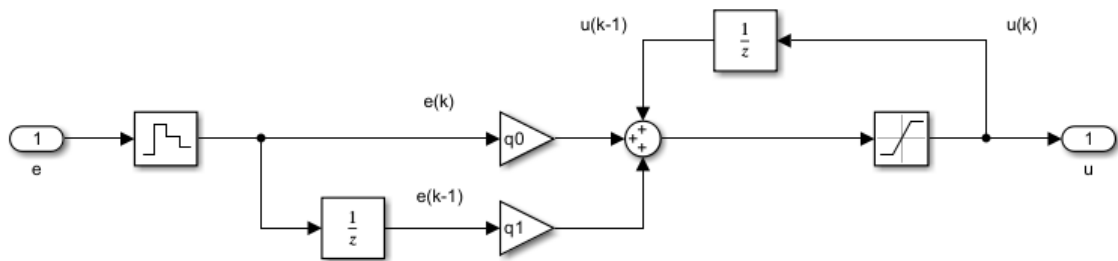
současně vracen zpět pro výpočet odchylky, čímž je uzavřena zpětnovazební smyčka. Model umožňuje testovat účinek parametrů regulátoru na chování řízené soustavy.

Blokové schéma se skládá z následujících funkčních částí:

- K simulaci reakce řízené soustavy na skokové změny žádané hodnoty se využije blok *Repeating Sequence Stair*, který generuje periodický sekvenční signál. V parametru *Vector of output values* je zadán vektor:  $[0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0] + 4$ , tím vzniká cyklický průběh hodnot  $4 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ , reprezentující opakující se skokové změny žádané hodnoty. Vzorkovací doba se nastaví na 5 sekund, což znamená, že každá hodnota v sekvenci je udržována po dobu 5 s, než dojde ke změně na další.
- Sčítací člen (rozdílový uzel) provádí výpočet regulační odchylky, tj. rozdílu mezi aktuální žádanou hodnotou a skutečným výstupem soustavy. Tento rozdíl (chybový signál) vstupuje do regulátoru a tvoří základní vstupní informaci pro řízení.
- PI regulátor je realizován v diskrétní podobě v bloku označeném jako *Regulátor*. Tento blok implementuje řídicí zákon ve známé formě (1.4.10)
- Blok s konstantní hodnotou (2.5) je přičten ke výstupu regulátoru a slouží k nastavení pracovní rovnovážné hodnoty signálu – tj. k přizpůsobení výstupu regulátoru reálnému rozsahu vstupních hodnot řízené soustavy. Toto posunutí je nezbytné např. při regulaci okolo ustáleného pracovního bodu
- Model řízené soustavy je implementován v samostatném subsystému označeném jako *Soustava*. Tento blok představuje matematický model dynamiky řízeného objektu, získaný předchozí identifikací a převedený do diskrétní podoby. Blok přijímá řídicí signál jako vstup a generuje odpovídající výstupní reakci systému
- Zpětná vazba je realizována prostřednictvím výstupního signálu modelu soustavy, který je zpětně přiváděn do rozdílového uzlu. Tím je zajištěna automatická korekce odchylky v čase, čímž je zajištěna stabilita a přesnost regulace
- Výstupní blok *Scope* zobrazuje v reálném čase průběhy všech důležitých signálů ve smyčce – konkrétně referenční hodnoty, výstupu soustavy a výstupu regulátoru. Tento výstup slouží k vyhodnocení funkčnosti a kvality navrženého řízení

### 2.2.2 Realizace diskrétního PI regulátoru

Diskrétní PI regulátor je v tomto modelu sestaven z jednotlivých základních bloků prostředí *Simulink*, které zajišťují výpočet proporcionální a integrační složky regulace v diskrétní podobě. Celý regulátor je implementován jako samostatný subsystém, čímž je dosaženo vyšší přehlednosti a modularity modelu. Hlavním cílem této implementace je přesná realizace regulačního algoritmu pomocí diskrétní struktury založené na přenosové funkci PI regulátoru převedené do diferenční rovnice. Takto navržený subsystém pracuje s hodnotami aktuální a předchozí regulační odchylky a výstupu regulátoru, čímž umožňuje zpětnovazební řízení v diskrétním čase:



Obrázek 6: Vnitřní schéma subsystému PI regulátoru

V teoretické části práce je PI regulátor odvozen ve formě přenosové funkce v z-oboru (1.4.10), avšak při jeho praktické realizaci v Simulinku se zvolí rekurzivní implementace na základě diferenční rovnice. Konkrétní podoba použitá v modelu vychází z rozdílové rovnice:

$$u(k) = u(k - 1) + q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k - 1) \quad (2.2.1)$$

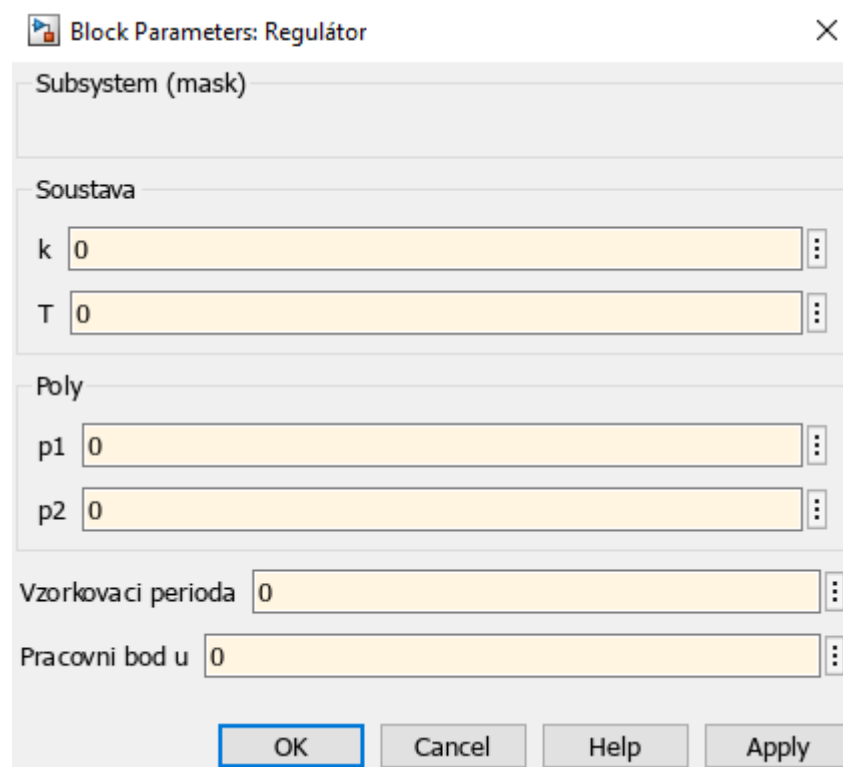
kde:

- $e(k)$  je regulační odchylka v čase  $k$
- $u(k)$  je řídicí zásah
- $q_0$  a  $q_1$  jsou diskrétní koeficienty závislé na parametrech PI regulátoru a vzorkovací periodě  $T_s$

Subsystém je vytvořen z běžně dostupných základních bloků knihovny Simulinku. Vstupem je signál regulační odchylky  $e$ , který je v dalším kroku zpožděn pomocí bloku  $1/z$  tak, aby bylo možné získat předchozí hodnotu  $e(k-1)$ . Následně se současná i zpožděná hodnota chyby násobí příslušnými váhovými koeficienty  $q_0$  a  $q_1$ , které odpovídají proporcionální a integrační části regulátoru převedené do diskrétní podoby. Výsledky těchto operací se následně sčítají a

spolu s předchozí hodnotou výstupu  $u(k-1)$  tvoří nový řídicí zásah  $u(k)$ . Tento výstup je následně omezen pomocí saturace, která zajišťuje, že nedojde k překročení fyzických mezí akčního členu. Zpožděný výstup je zároveň zpětně veden do výpočtu dalšího kroku, čímž je zajištěno rekurzivní chování systému. Výsledkem je diskrétní PI regulátor, který je připraven k použití ve zpětnovazební regulační smyčce.

Aby byl návrh regulátoru co nejvíce přehledný a uživatelsky přívětivý, subsystém se doplní o parametrizační masku. Ta umožňuje snadné zadávání a úpravu hodnot, určujících vlastnosti diskrétního PI regulátoru. Díky této funkcionalitě lze regulátor rychle upravit pro různé experimentální scénáře bez nutnosti zasahovat do samotné struktury bloku:



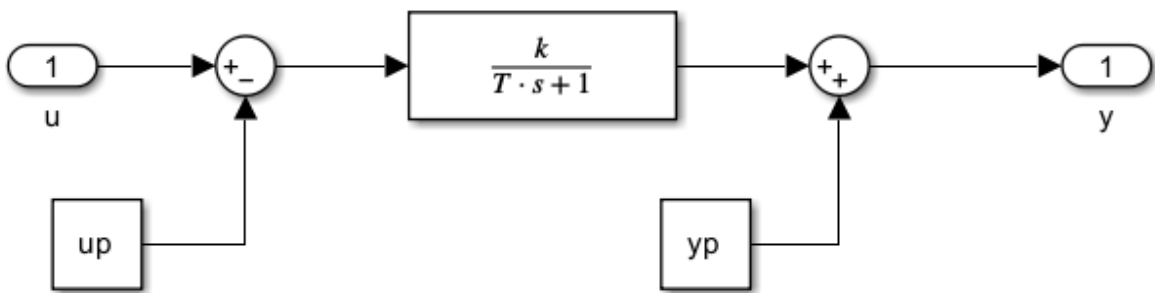
Obrázek 7: Maska PI regulátoru

Maska regulátoru poskytuje uživateli přehledné rozhraní pro zadání všech nezbytných parametrů. Jednotlivé vstupy jsou rozděleny do tematických sekcí:

- Soustava( $k, T$ ) slouží k zadání parametrů řízené soustavy
- Poly( $p1, p2$ ) určují konkrétní nastavení diskrétní regulační rovnice
- Vzorkovací perioda definuje délku vzorkovacího intervalu v sekundách
- Pracovní bod umožňuje zadání statických hodnot, vůči kterým jsou jednotlivé signály uvažovány

### 2.2.3 Vytvoření modelu řízené soustavy

Pro účely simulačního ověření návrhu regulátoru se musí vytvořit blok odpovídající chování řízené soustavy. Tento blok je implementován jako samostatný subsystém, který reprezentuje přenosovou funkci reálného systému ve formě vhodné pro diskrétní simulace. Při konstrukci modelu se klade důraz na co nejvěrnější zachycení dynamických vlastností systému včetně jeho ustáleného chování. Zvolená struktura umožňuje simulovat odezvu soustavy na různé vstupní signály, porovnávat výsledky s výstupy reálného systému a dále ladit parametry řídicího algoritmu:



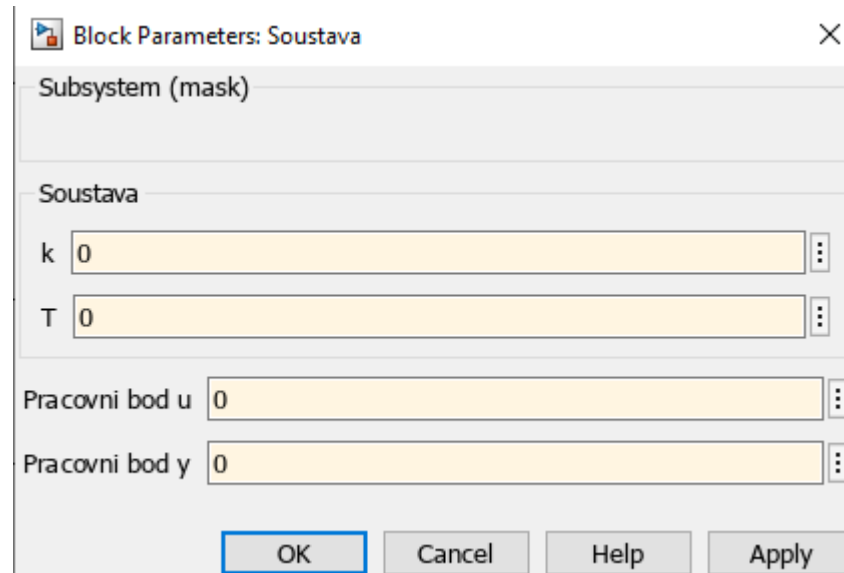
Obrázek 8: Blokové schéma modelu soustavy

Tento model představuje lineární dynamický systém prvního řádu s jedním vstupem a jedním výstupem, přičemž je navržen s ohledem na možnost snadného přizpůsobení parametrů a simulaci provozu v okolí definovaného pracovního bodu. Vstupem do modelu je signál řízení  $u$ , který je v první fázi upraven odečtením pracovního bodu  $up$ . Tato operace slouží k posunu vstupu do relativní souřadnicové soustavy, čímž je možné modelovat pouze odchylkové chování systému vůči ustálenému stavu. Takto upravený vstup je dále zpracován přenosovou funkcí soustavy(1.3.4), která simuluje dynamickou odezvu soustavy prvního řádu. Na výstupu dynamického bloku je výpočet opět upraven přičtením výstupního pracovního bodu  $yp$ , čímž se získá absolutní výstupní hodnota  $y$ . Tento způsob zpracování zajišťuje, že i když vnitřní výpočty probíhají v odchylkovém režimu, výstup modelu odpovídá reálnému chování systému včetně původního ustáleného stavu.

Tato struktura se volí z důvodu univerzality a snadné rozšiřitelnosti. V aktuální podobě modeluje lineární dynamický systém 1. řádu, nicméně díky modulárnímu návrhu může být tento subsystém snadno upraven např. na proporcionální model 2. řádu, nebo nahrazen

modelem reálné soustavy získané identifikací. Tím se zajišťuje dostatečná variabilita modelu pro různé fáze testování a ladění řízení.

Stejně jako v případě regulátoru, i u modelu řízené soustavy se použije maska, která zajišťuje snadné a přehledné zadávání klíčových parametrů modelu:



Obrázek 9: Maska řízené soustavy

Parametrizační maska soustavy zajišťuje pohodlný způsob, jak zadat všechny důležité charakteristiky simulovaného systému:

- Soustava( $k$ ,  $T$ ) slouží k zadání parametrů řízené soustavy
- Pracovní bod  $u$  slouží pro zadání hodnoty ustáleného vstupu  $u_p$
- Pracovní bod  $y$  umožňuje zadání výstupní hodnoty  $y_p$ , která odpovídá reakci soustavy na pracovní vstup

### 2.3 Simulace řízení

Simulace řízení je klíčovým nástrojem při návrhu a ověřování vlastností regulačních systémů. Umožňuje testovat řízení ještě před samotnou implementací na reálné zařízení, čímž minimalizuje rizika selhání a urychluje vývoj. Díky simulaci je možné ladit parametry regulátoru, analyzovat chování systému v různých provozních podmínkách a vyhodnocovat vliv různých vstupních a poruchových veličin bez nutnosti zásahu do fyzického zařízení. Simulace umožňuje rychlé iterace návrhu, přehlednou vizualizaci výsledků a možnost podrobné analýzy pomocí standardních matematických a inženýrských nástrojů.

### 2.3.1 Příprava parametrů řídicího algoritmu

Pro účely simulace se využije několik standardních modelů řízených soustav, konkrétně lineárních proporcionálních systémů prvního a druhého řádu. Výběr těchto modelů umožňuje systematické porovnání dynamických vlastností jednotlivých soustav při regulaci diskretním PI regulátorem a zároveň poskytuje podklad pro hodnocení účinnosti navrženého řídicího algoritmu v závislosti na charakteristikách řízeného objektu. Takto vytvořená simulační platforma umožňuje detailní analýzu odezvy uzavřeného regulačního obvodu, což je nezbytné pro verifikaci parametrů regulátoru a ověření jeho robustnosti v různých provozních podmínkách.

V rámci vytvořeného simulačního modelu se návrh diskretního PI regulátoru realizuje pomocí metody umístění pólů (pole placement). Tento přístup umožňuje nastavit požadovanou dynamiku uzavřeného regulačního obvodu prostřednictvím volby komplexních nebo reálných pólů  $p_1$  a  $p_2$ . Na základě těchto hodnot jsou automaticky dopočítány parametry regulátoru  $q_0$  a  $q_1$ , které vstupují do simulačního modelu řídicího algoritmu. Výpočet potřebných koeficientů je integrován přímo v masce subsystému jako inicializační výraz, což zajišťuje, že jakákoli změna parametrů dynamiky uzavřeného regulačního obvodu se okamžitě promítne do výpočtu parametrů regulátoru bez nutnosti externího skriptu. Výpočet parametrů regulátoru je realizován prostřednictvím *MATLABu*:

```
k=2;
```

```
T=3.2;
```

```
p1=0.969;
```

```
p2=0.905; % p2=0.951; p2=0.969
```

```
Ts=0.1;
```

```
c1=-(p1+p2);
```

```
c2=p1*p2;
```

```
a=-exp(-Ts/T)
```

```
b=k*(1+a)
```

```
q0=(c1-a+1)/b
```

```
q1=(c2+a)/b
```

Tento postup umožňuje navrhnout řídicí zákon tak, aby uzavřený regulační obvod vykazoval předem definovanou dynamiku, jež je specifikována volbou pólů  $p1$  a  $p2$ . Parametry řízené soustavy jsou definovány zesílením  $k$ , časovou konstantou  $T$  a vzorkovací dobou  $Ts$ . V tomto případě je hodnota pólu  $p1$  ve všech variantách nastavena konstantně jako  $p1=0,969$ , zatímco  $p2$  se mění. Nejprve jsou spočítány koeficienty charakteristického polynomu uzavřené smyčky, což umožňuje následný výpočet parametrů  $q0$  a  $q1$  diskrétního PI regulátoru.

Pro účely analýzy vlivu parametrů návrhu regulátoru se sestaví tabulka, která shrnuje vypočtené hodnoty koeficientů  $q0$  a  $q1$  pro různé hodnoty druhého pólu uzavřené smyčky  $p2$

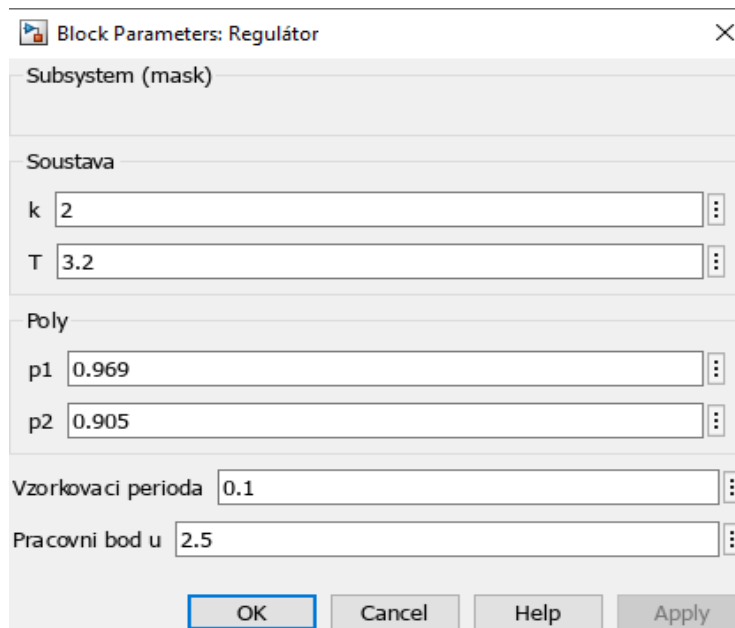
Tabulka 1: Parametry polů

p1	p2	q0	q1
0.969	0.969	0.51	-0.49
0.969	0.951	0.80	-0.77
0.969	0.905	1.55	-1.50

Z uvedené tabulky je patrné, že s rostoucí hodnotou pólu  $p2$  se snižují hodnoty koeficientů  $q0$  a  $q1$ . To má přímý dopad na charakteristiku výsledného regulátoru – vyšší hodnota  $p2$ , tedy pomalejší pól blíže k jednotkové kružnici, vede ke konzervativnějším regulačním zásahům, a tím i k pomalejší dynamické odezvě systému. Naopak nižší hodnota  $p2$  vede k agresivnějšímu řízení a rychlejší odezvě.

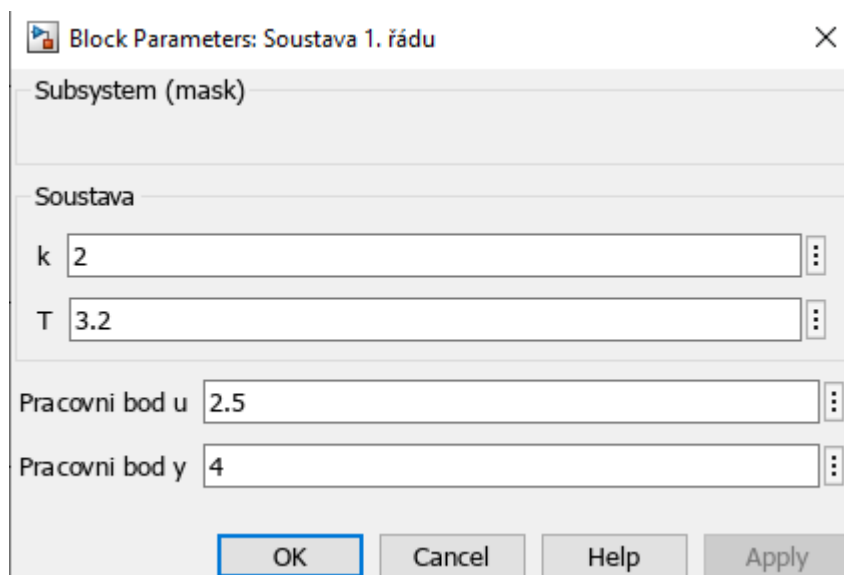
### 2.3.2 Parametrické nastavení modelu

Maska regulátoru umožňuje nastavit základní parametry výpočtu – zesílení  $k$ , časovou konstantu  $T$ , vzorkovací periodu  $Ts$  a dva požadované póly  $p1$  a  $p2$ . Na základě těchto hodnot jsou automaticky dopočítány koeficienty regulátoru  $q0$  a  $q1$  pomocí metody umístění pólů. V rámci simulační analýzy byla zachována konstanta  $T=3.2$ , přičemž variabilní parametr tvoří hodnota pólu  $p2$ , která se postupně mění (např. 0.905, 0.951, 0.969). Kromě toho v masce se také nastavuje pracovní bod soustavy, konkrétně hodnota regulované veličiny  $u$ , která slouží jako referenční úroveň pro linearizaci systému a výpočet parametrů v rámci regulační struktury



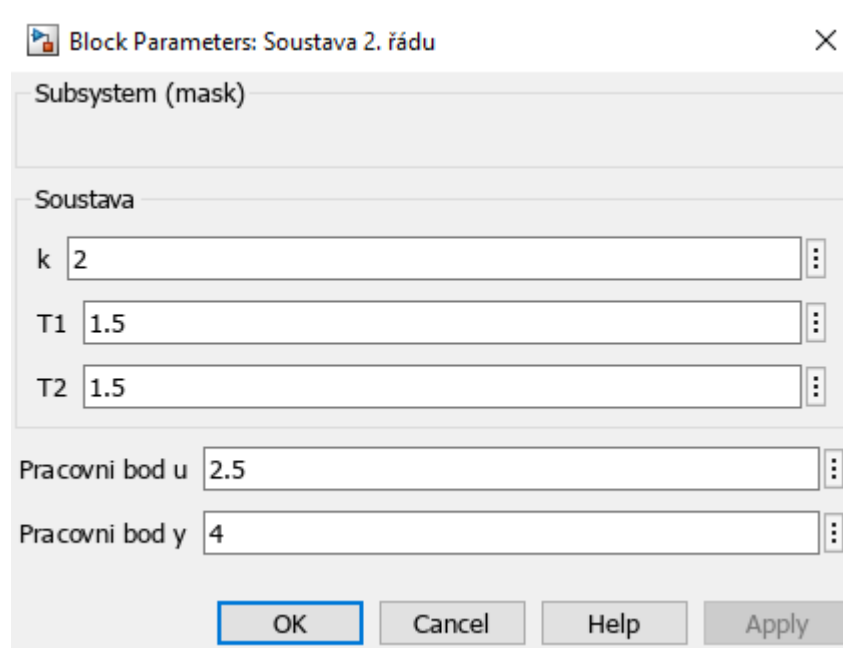
Obrázek 10: Maska regulátoru s hodnotami

Soustava 1. řádu je popsána přenosem(2.2.1). V masce subsystému lze definovat zesílení  $k$ , časovou konstantu  $T$  a vzorkovací periodu  $T_s$  a pracovní body: vstupní hodnotu  $u$  a výstupní hodnotu  $y$ . Tato konfigurace umožňuje simulovat běžnou dynamickou odezvu jednoduchého systému s inercí:



Obrázek 11: Maska soustavy 1. řádu

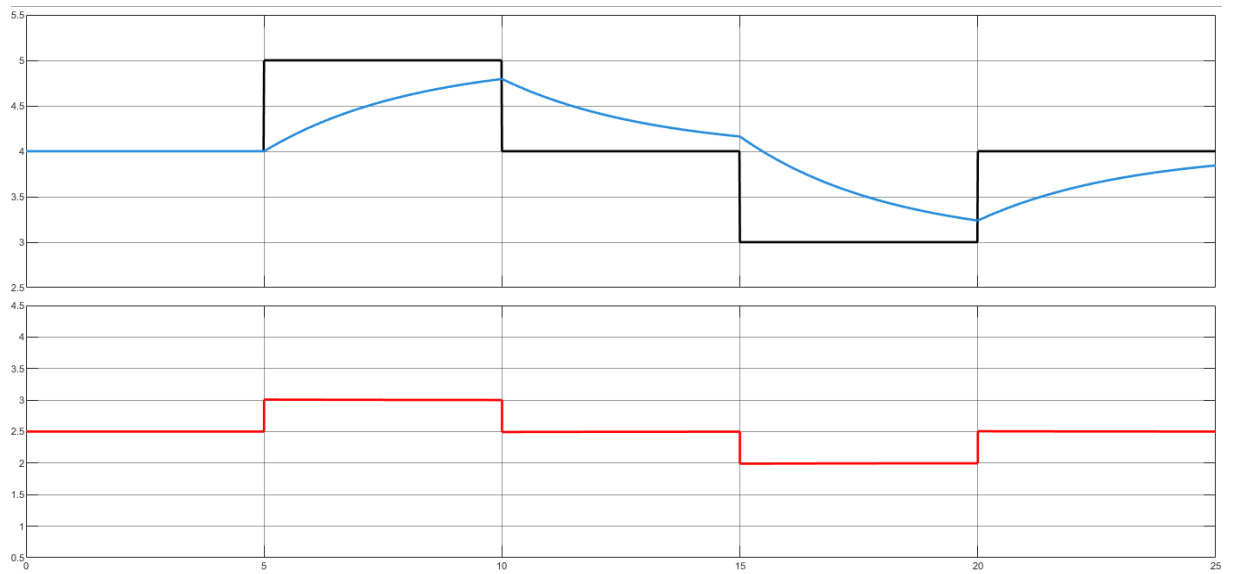
V případě soustavy druhého řádu(2.3.1) je možné zadat nejen zesílení  $k$ , ale také dvě časové konstanty  $T1$  a  $T2$ , které určují dynamiku systému. Kromě toho lze nastavit pracovní body  $u$  a  $y$ . Díky těmto parametrům je možné přesně modelovat širší spektrum dynamických chování a následně testovat robustnost navrženého regulátoru při řízení složitějších systémů:



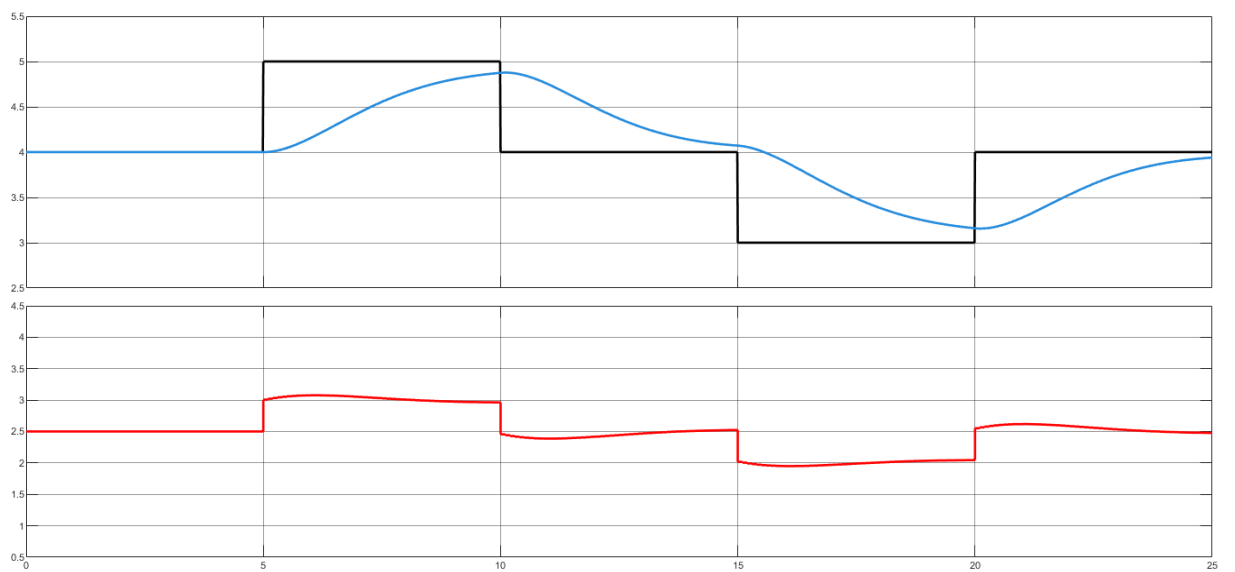
Obrázek 12: Maska soustavy 2. řádu s hodnotami

### 2.3.3 Vyhodnocení dynamiky řízených soustav

Aby bylo možné komplexně zhodnotit chování navrženého regulačního systému, je nezbytné analyzovat jeho časovou odezvu. Odezva systému představuje reakci výstupní veličiny na změnu vstupu (například žádané hodnoty) a poskytuje klíčové informace o dynamických vlastnostech řízeného objektu i samotného regulátoru. Z pohledu automatického řízení je důležité sledovat zejména parametry jako je doba náběhu, doba ustálení, překmit, případně výskyt oscilací či stabilita. Tyto charakteristiky umožňují vyhodnotit kvalitu regulace a její vhodnost pro daný typ soustavy. Pro přehledné posouzení těchto vlastností výsledky simulací se zobrazí formou grafů časových průběhů výstupní veličiny. Cílem této části je vizuálně zhodnotit, jak rozdílný řád soustavy ovlivňuje výslednou kvalitu regulace, zejména z hlediska rychlosti odezvy, stabilizační doby či případného výskytu překmitu. Tato srovnání tvoří důležitý podklad pro posouzení vhodnosti navrženého regulačního algoritmu a jeho přizpůsobení konkrétnímu dynamickému chování systému

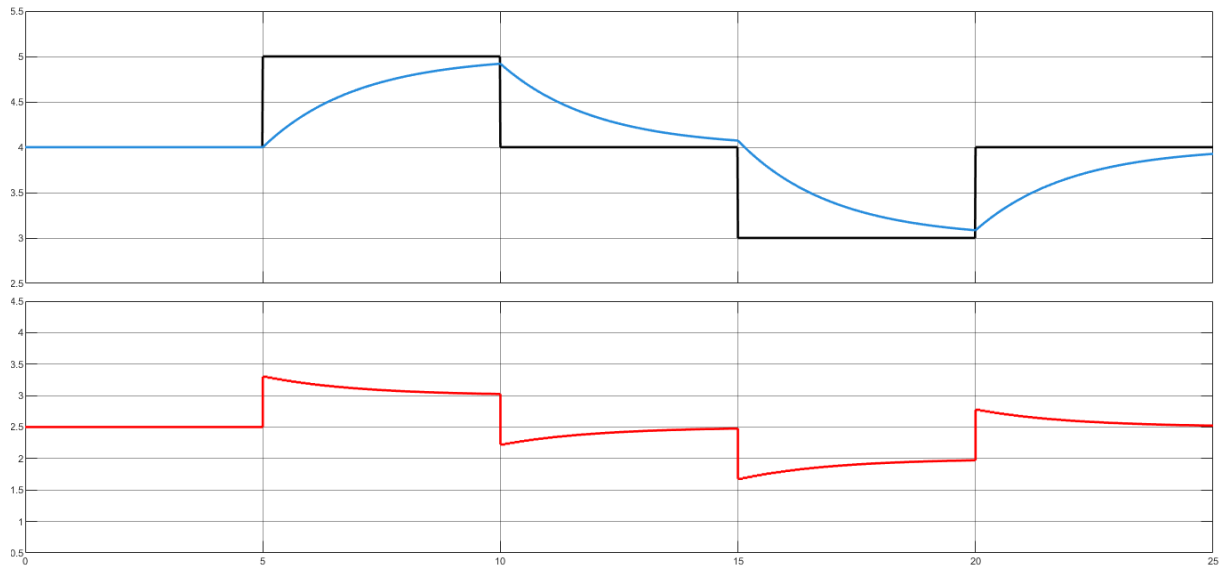


Obrázek 13: Odezva pro soustavu 1. řádu s nastaveným pólem 0.969

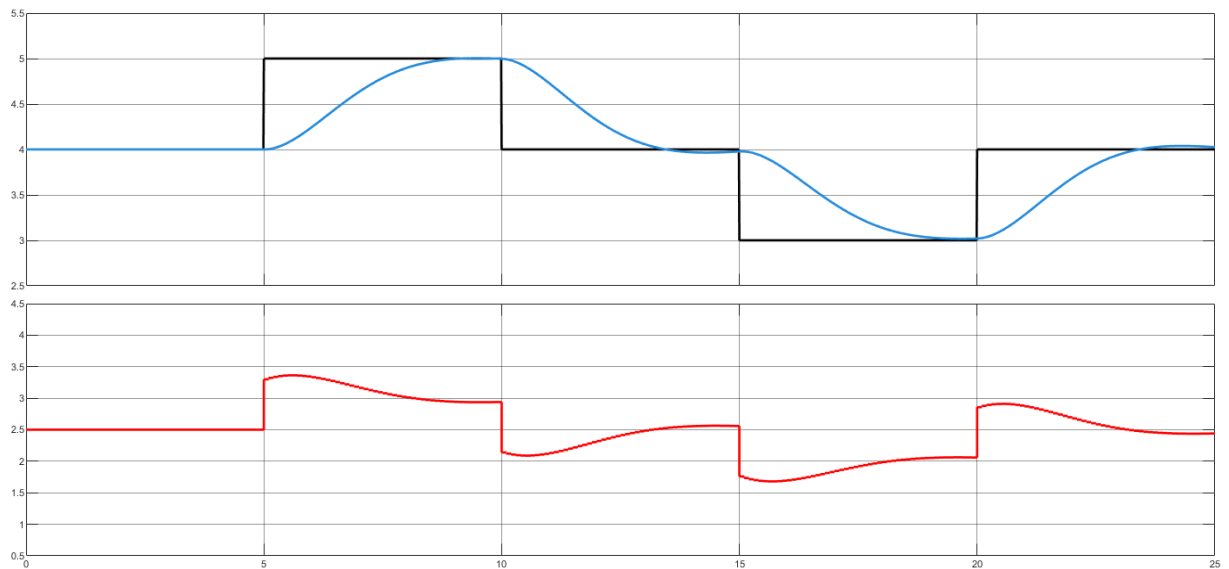


Obrázek 14: Odezva pro soustavu 2. řádu s nastaveným pólem 0.969

V další fázi simulace se změní hodnota požadovaného pólu PI regulátoru na  $p2=0,951$ , zatímco ostatní parametry, včetně pracovního bodu i struktury regulátoru, zůstanou nezměněny. Tento krok umožňuje sledovat, jak změna dynamiky regulátoru – způsobená umístěním pólu blíže k jednotkovému kruhu – ovlivní odezvu řízeného systému. Stejně jako v předchozím případě odezvy se zaznamenají pro modely soustavy prvního i druhého řádu.

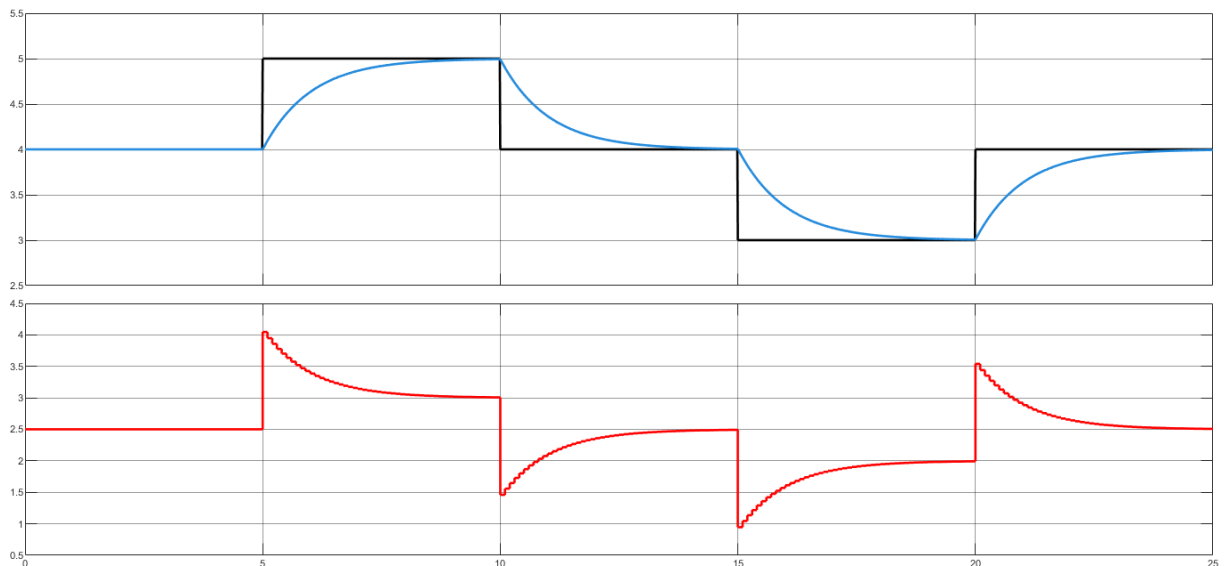


Obrázek 15: Odezva pro soustavu 1. řádu s nastaveným pólem 0.951

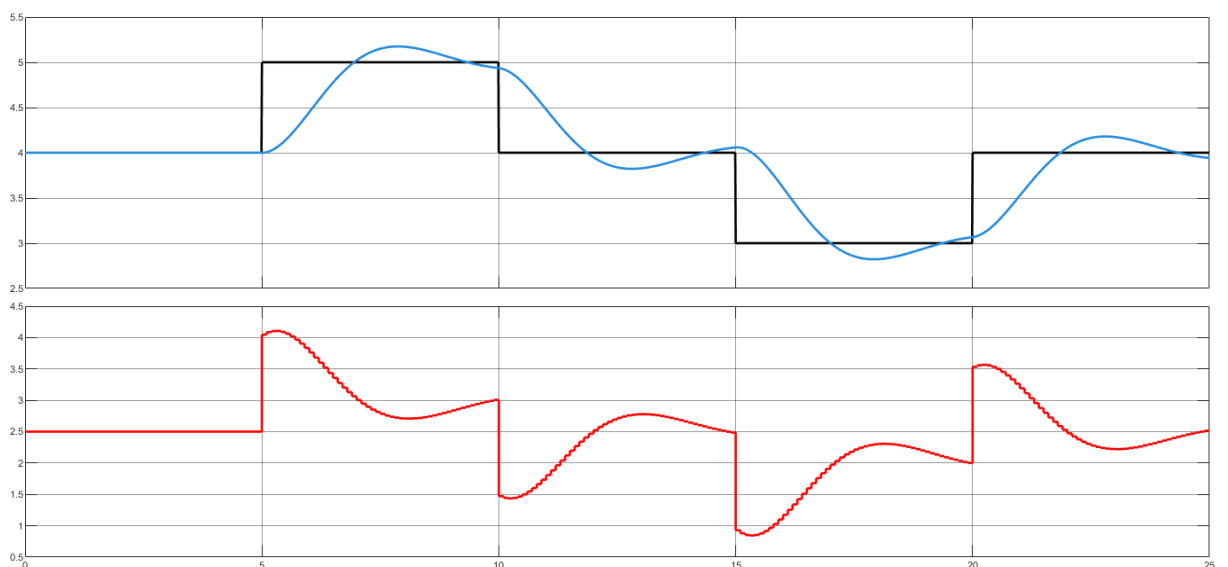


Obrázek 16: Odezva pro soustavu 2. řádu s nastaveným pólem 0.951

Ve třetí simulaci se hodnota požadovaného pólu regulátoru upraví na  $p2=0,905$  což odpovídá umístění blíže ke středu Z-oboru. Taková volba typicky vede k agresivnějšímu regulačnímu zásahu, což se může projevit rychlejší odezvou, ale zároveň i zvýšenou pravděpodobností výskytu oscilací nebo překmitu. Simulace opět zahrnuje modely soustavy prvního a druhého řádu, přičemž jejich odezvy jsou porovnávány za stejných podmínek jako v předchozích případech



Obrázek 17: Odezva pro soustavu 1. řádu s nastaveným pólem 0.905



Obrázek 18: Odezva pro soustavu 2. řádu s nastaveným pólem 0.905

Na základě provedených simulací lze zhodnotit rozdílnou vypovídací schopnost jednotlivých modelů řízené soustavy a jejich význam při návrhu a ověřování funkčnosti PI regulátoru navrženého metodou umístění pólů. Regulátor byl navržen s využitím zjednodušeného modelu soustavy 1. řádu, který poskytl vhodné prostředí pro algebraický návrh a analýzu základních regulačních vlastností. Simulace ukázaly, že snižování hodnoty pólu  $p_2$  vedlo k rychlejší odezvě systému, což je na první pohled pozitivní efekt. Nicméně tento model, svou strukturou zjednodušený, nezachycuje komplexnější dynamické jevy reálného systému, jako je setrvačnost vyššího řádu či oscilace, které mohou ovlivnit stabilitu a kvalitu regulace. Z tohoto důvodu byl následně využit model soustavy 2. řádu, jenž lépe odpovídá reálnému fyzikálnímu chování systému a umožňuje přesnější predikci odezvy. Simulace na tomto modelu odhalily limity regulátoru navrženého na základě jednoduššího přístupu – při nižších hodnotách pólu  $p_2$  se objevily oscilace a ztráta stability, což poukazuje na nedostatečnou robustnost návrhu při použití na komplexnější dynamický systém. Tato část tedy ukazuje, že zatímco model 1. řádu je vhodný pro základní návrh a pochopení principů návrhové metody, ověřování na přesnějším modelu je nezbytné pro identifikaci potenciálních problémů, které by mohly nastat při implementaci regulátoru v reálných podmínkách. Experimentální část tak demonstruje význam víceúrovňového přístupu k návrhu, který zahrnuje nejen teoretický výpočet, ale i simulace na modelu vyššího řádu jakožto přechod k reálné aplikaci.

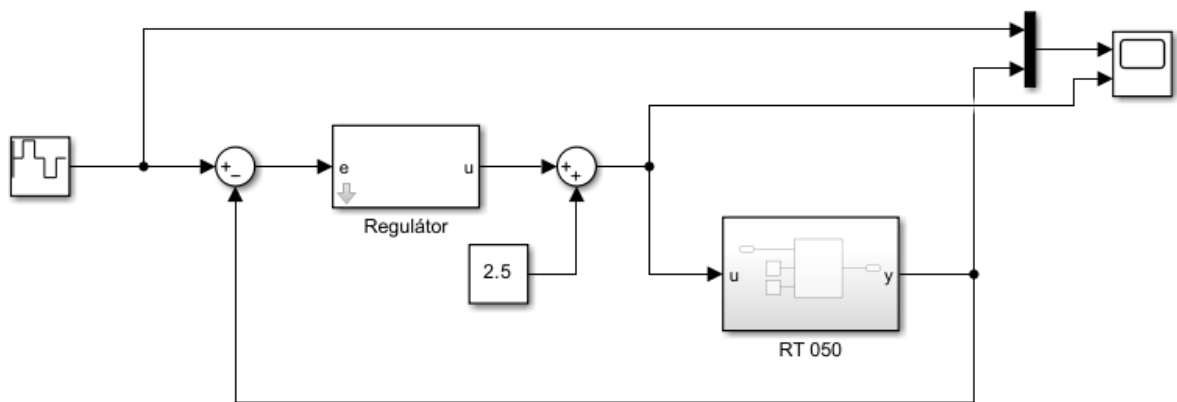
## 2.4 Reálné řízení

Zatímco simulace umožňují detailní návrh a ladění řídicího algoritmu v ideálních podmínkách, reálné řízení představuje klíčový krok k ověření jeho praktické použitelnosti. V reálném systému totiž vstupují do hry různé nežádoucí vlivy, jako jsou například šumy, zpoždění, kvantizační chyby, nelinearity či omezená přesnost měření, které mohou významně ovlivnit výsledné chování řízené soustavy. K tomuto účelu se využije laboratorní zařízení GUNT RT 050, které slouží jako fyzická platforma pro testování řídicích algoritmů v reálném čase. Zařízení RT 050 umožňuje připojení reálné analogové soustavy k počítači, na kterém je pomocí prostředí *Simulink* implementován regulační algoritmus. Komunikace s hardwarem probíhá prostřednictvím DLL knihovny akvizitní karty LabJack volané z prostředí *Simulink*, což zajišťuje dostatečně rychlé a stabilní propojení mezi modelem regulátoru a fyzickým modelem řízené soustavy. Regulační algoritmus navržený v předchozích částech práce se tedy realizuje v reálném čase, přičemž řídicí signál generovaný na základě odezvy systému ovlivňuje skutečný fyzický proces. Stejně jako v případě simulací, i zde se provede testování pro tři různé

hodnoty pólu  $p_2$ , a to za účelem porovnání dynamického chování systému při různých parametrech regulátoru. Tento přístup umožní nejen ověření správnosti návrhu, ale rovněž poskytnutí důležitých poznatků o rozdílech mezi teoretickým a praktickým chováním řízeného systému.

### 2.4.1 Experimentální zapojení

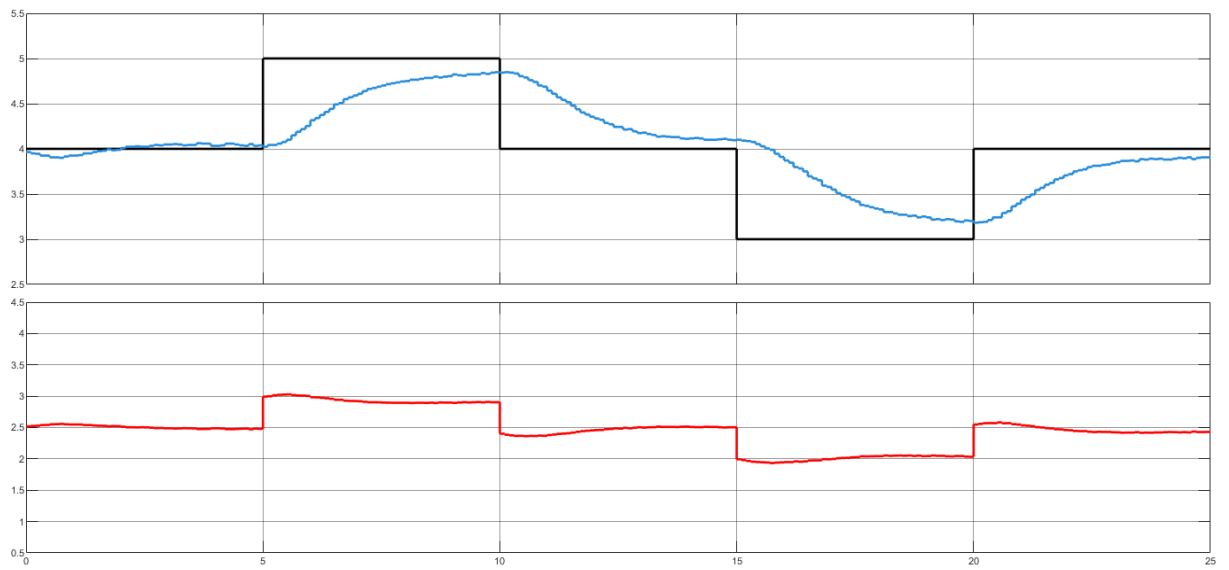
Struktura obsahuje digitální PI regulátor, generátor žádané hodnoty a zpětnovazební smyčku. Parametry regulátoru, včetně požadovaných pólů a pracovního bodu, jsou definovány pomocí masky bloku. Jedinou změnou oproti simulacím je nahrazení modelované soustavy za subsystém s *RT 050*, který umožňuje reálné testování řídicího algoritmu.



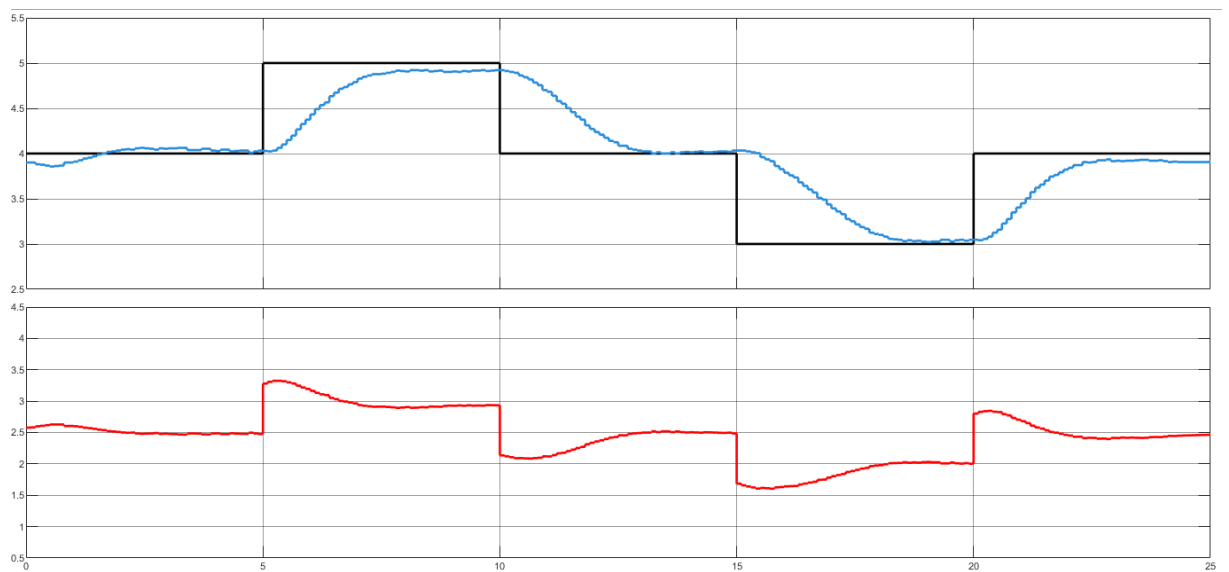
Obrázek 19: Blokové schéma experimentálního zapojení s reálnou soustavou *RT 050*

### 2.4.2 Realizace měření a analýza výsledků

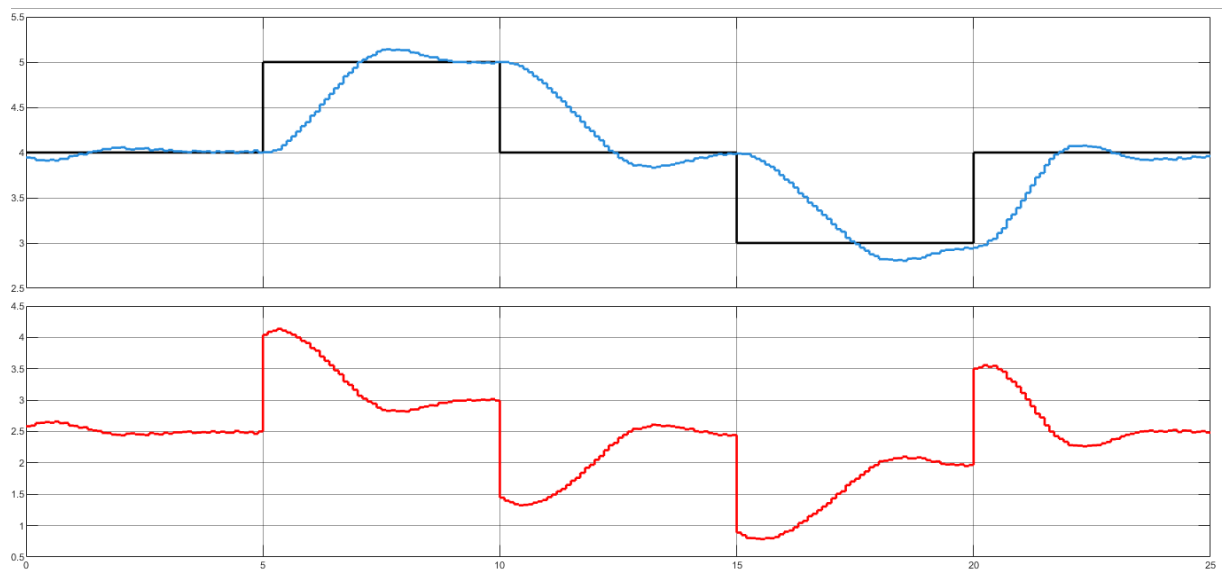
Na základě navržené blokové struktury se zrealizuje experimentální část, jejímž cílem je ověření funkčnosti diskrétního PI regulátoru při řízení fyzické soustavy prostřednictvím modulu *RT 050*. Měření probíhá za předem definovaných podmínek, které odpovídají použitým ve fázi simulace, což umožňuje přímé porovnání dosažených výsledků. Experiment se provede pro tři různé hodnoty požadovaného pólu regulátoru, přičemž ostatní parametry regulačního systému zůstaly konstantní. Každé měření se zaměří na sledování časové odezvy reálného systému, přičemž se vyhodnotí klíčové dynamické vlastnosti, jako je doba náběhu, doba ustálení a případný překmit. Výsledky měření jsou následně prezentovány ve formě grafů a slouží k posouzení vlivu jednotlivých parametrů regulátoru na kvalitu řízení v reálném prostředí



Obrázek 20: Odezva pro reálnou soustavu s nastaveným pólem 0.969



Obrázek 21: Odezva pro reálnou soustavu s nastaveným pólem 0.951



Obrázek 22: Odezva pro reálnou soustavu s nastaveným pólem 0.905

Na základě reálného měření lze konstatovat, že chování fyzického systému vykazuje vysokou míru shody s výsledky dosaženými při simulaci modelu druhého řádu. Časové odezvy regulovaného systému při reálném řízení přes modul *RT 050* přibližně odpovídají simulovaným průběhům – zejména z hlediska dynamiky a ustáleného stavu. Přesto je třeba zohlednit určitá odchýlení, která jsou přirozená při práci s reálným systémem. Měřené odezvy vykazují drobné odchylky způsobené přítomností šumu, možnými nelinearitami fyzické soustavy či jemnými odchylkami v parametrech. V některých případech se rovněž projevil mírný překmit či oscilace, které však nijak zásadně neovlivnily celkovou stabilitu systému. Z pohledu celkového hodnocení je možné říci, že navržený diskrétní PI regulátor je schopen úspěšně řídit reálnou soustavu s obdobnými charakteristikami, jaké se analyzovaly během simulací. Tím dochází k potvrzení správnosti návrhu regulátoru i z hlediska praktické realizace.

## ZÁVĚR

Táto bakalářská práce se zabývá návrhem, simulací a experimentálním ověřením diskrétního regulátoru, jehož parametry byly stanoveny prostřednictvím metody umístění pólů. Cílem práce bylo ověřit funkčnost a účinnost tohoto přístupu jak v simulačním prostředí, tak při řízení fyzické soustavy v laboratorních podmínkách.

Práce byla systematicky rozdělena do dvou částí – teoretické a praktické. V teoretické části byla nejprve provedena analýza základních pojmů z oblasti automatického řízení, se zaměřením na diskrétní systémy a návrh regulátorů. Následně byla popsána metoda umístění pólů, která slouží jako systematický nástroj pro nastavení vlastností uzavřené regulační smyčky pomocí volby polohy pólů v Z-rovině. Byly odvozeny výpočtové vztahy pro parametry diskrétního PI regulátoru a popsán vliv jednotlivých pólů na dynamiku výsledného systému.

V praktické části byla metoda aplikována na řízení modelových soustav prvního a druhého řádu. Pro každý typ systému byly použity tři varianty regulátorů, lišící se polohou jednoho z pólů. Simulace v prostředí Simulink ukázaly, že výběr pólů má zásadní vliv na kvalitu regulace.

Přínos práce spočívá také v experimentálním ověření navrženého regulátoru na reálném zařízení prostřednictvím soustavy RT 050. Blokova struktura simulace byla upravena tak, aby místo modelované soustavy pracovala s reálným fyzickým zařízením. Odezvy získané při reálném řízení vykazovaly dobrou shodu se simulovanými výsledky, zejména v případě soustavy druhého řádu, přičemž menší odchylky lze přičíst vlivům fyzického prostředí (např. šum, nelinearity).

Na základě provedených analýz lze konstatovat, že metoda umístění pólů představuje efektivní nástroj pro návrh diskrétních regulátorů s požadovanými dynamickými vlastnostmi. Výsledky práce potvrzují, že správně navržený diskrétní PI regulátor může dosáhnout stabilní a přesné regulace i při přechodu ze simulačního prostředí do reálného řízení. Celkově práce úspěšně propojuje teoretické principy s praktickou realizací, a přináší komplexní pohled na problematiku návrhu a nasazení digitálních regulátorů v technické praxi.

## POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA

- TZB-INFO, 2015. *Úvod do regulačních jednotek DDC v budovách* [online]. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/merici-a-regulacni-technika/13479-uvod-do-regulacnich-jednotek-ddc-v-budovach>
- BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0020-2.
- VÍTEČKOVÁ, Miluše a VÍTEČEK, Antonín. *Základy automatické regulace*. Přepřac. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.
- WIKIPEDIA, 2024. *Wikipedia: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/>
- HONC, Daniel, 2024. *Automatizace 2*. Pardubice, Studijní materiál. Univerzita Pardubice. Fakulta elektrotechniky a informatiky
- TŮMA, Jiří, 2010. *Technické prostředky řízení* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~tum52/download/TechnickeProstredky.pdf>.
- JUMO Měření a regulace s.r.o., 2025. *PID regulátor* [online]. [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.jumo.cz/web/services/faq/controller/pid-controller>.
- CVEJN, Jan, 2024. *Automatizace 1*. Pardubice, Studijní materiál. Univerzita Pardubice. Fakulta elektrotechniky a informatiky