

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Studijní program

INTERAKTIVNÍ SIMULAČNÍ MODULY PRO PODPORU  
AUTOMATIZAČNÍCH PŘEDMĚTŮ

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Jan Plíhal

Vedoucí práce: doc. Ing. Libor Pekař, Ph.D.

Jihlava 2026

# Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce:	<b>Bc. Jan Plíhal</b>
Studijní program:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Garant studijního programu:	doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.
Název práce:	<b>Interaktivní simulační moduly pro podporu automatizačních předmětů</b>
Vedoucí práce:	doc. Ing. Libor Pekař, Ph.D.
Cíl práce:	Cílem práce je navrhnout a vytvořit názorné interaktivní simulační moduly demonstrující pojmy a výpočetní dovednosti ze základních oblastí automatizace a přidružených oborů (teorie systémů, teorie řízení).- Rešerše existujících interaktivních aplikací pro výuku automatizačních předmětů a prezentaci souvisejících znalostí a dovedností.- Analýza vhodných témat, pojmů, či výpočetních dovedností, s cílem vybrat obsah pokrývající praktickou část práce.- Návrh kompletní architektury interaktivních modulů v prostředí Unity.- Realizace 2D nebo 3D interaktivních modulů spustitelných v lokálním prostředí.- Vypracování stručného uživatelského manuálu pro práci s interaktivními moduly.

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací interaktivní simulační aplikace pro podporu výuky automatického řízení. Cílem práce je vytvořit výukový nástroj, který umožní studentům lépe pochopit principy dynamických systémů a zpětnovazební regulace prostřednictvím vizuální a experimentální formy.

Aplikace je vytvořena v prostředí Unity a obsahuje několik simulačních modulů zaměřených na různé typy řízených soustav, jako jsou mechanické systémy a tepelný proces. Každý modul využívá matematický model soustavy a implementovaný PID regulátor, jehož parametry může uživatel měnit a sledovat jejich vliv na chování systému.

Součástí aplikace je také implementace poruch, omezení akčních zásahů a diskrétní realizace regulace, což umožňuje přiblížit reálné podmínky řízení. Výsledkem práce je funkční výuková aplikace, která propojuje teoretické poznatky s praktickou simulací a podporuje intuitivní porozumění regulačním procesům.

## Klíčová slova

PID regulace; simulační aplikace; Unity; automatické řízení; dynamické systémy; výukový nástroj

## Abstract

This diploma thesis focuses on the design and implementation of an interactive simulation application intended for teaching control engineering. The main objective is to create an educational tool that enables students to better understand the principles of dynamic systems and feedback control through a visual and experimental approach.

The application is developed in the Unity environment and consists of several simulation modules representing different types of controlled systems, including mechanical systems and a thermal process. Each module is based on a mathematical model of the system and utilizes a PID controller, whose parameters can be adjusted by the user to observe their influence on system behaviour.

The application also incorporates disturbances, actuator limitations, and discrete-time control implementation, allowing the simulation to reflect real-world control conditions. The result is a functional educational tool that connects theoretical knowledge with practical simulation and supports intuitive understanding of control processes.

## Keywords

PID control; simulation application; Unity; control engineering; dynamic systems; educational tool

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 10. dubna 2026

.....

Podpis studenta/ky

## Poděkování

*Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Liboru Pekařovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné rady a odborné vedení během jejího zpracování.*

*Zároveň patří mé poděkování mé rodině za jejich neustálou podporu nejen při studiu, ale i v osobním životě.*

# Obsah

<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>7</b>
<b>Seznam zkratk.....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Význam automatizace a teorie řízení.....</b>	<b>10</b>
1.1 Výuka automatizace na vysokých školách .....	11
1.2 Současné výukové přístupy a trendy .....	11
1.3 Motivace k využívání interaktivních simulačních modulů .....	12
<b>2 Vývoj a současný stav simulačních a interaktivních nástrojů ve výuce řízení.....</b>	<b>13</b>
2.1 Počátky simulací a teorie řízení .....	13
2.2 Rozvoj digitálních simulací a počítačových laboratoří .....	14
2.3 Webové a open-source platformy.....	15
2.4 Vzdálené laboratoře a sdílené platformy .....	15
2.5 3D vizualizace, AR/VR a současné trendy .....	16
2.6 Výuka řízení na českých školách .....	16
<b>3 Interaktivita jako nástroj moderního učení.....</b>	<b>21</b>
3.1 Motivace studentů a role experimentu.....	21
3.2 Didaktické zásady výuky automatizace .....	21
3.3 Metodika návrhu interaktivních výukových modulů.....	22
3.4 Hodnocení efektivity interaktivních simulací .....	23
<b>4 Návrh aplikace.....</b>	<b>24</b>
4.1 Cíle a požadavky aplikace .....	24
4.2 Koncepce výukových modulů .....	25
4.3 Architektura aplikace .....	25
4.4 Vývojové prostředí Unity .....	26
4.5 Fyzikální simulace v Unity .....	27
4.6 Programování aplikace v jazyce C#.....	27
4.7 Návrh uživatelského rozhraní .....	27
4.8 Regulátor PID v simulaci .....	28
<b>5 Implementace simulačních modulů .....</b>	<b>33</b>
5.1 Modul 1 – Jet Cart.....	33
5.2 Modul 2 – Inverted Pendulum .....	40
5.3 Modul 3 – Race Cars .....	45
5.4 Modul 4 - Oven .....	47
<b>Závěr .....</b>	<b>56</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>57</b>
<b>Přílohy.....</b>	<b>61</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Regulační smyčka .....	10
Obr. 2 Wattův odstředivý regulátor.....	10
Obr. 3 Vodní hodiny .....	13
Obr. 4 Differential Analyzer .....	14
Obr. 5 Schéma laboratorní úlohy "Kulička na elipse" .....	17
Obr. 6 Laboratorní úloha "kyvadlo" .....	18
Obr. 7 Schéma laboratorní úlohy "skleník" .....	18
Obr. 8 Laboratorní soustava LD Didactic.....	19
Obr. 9 Laboratorní soustava aktivního tlumení .....	19
Obr. 10 Gyroskop od firmy Quansar3 .....	20
Obr. 11 Menu aplikace.....	25
Obr. 12 Unity Editor .....	26
Obr. 13 PID regulátor .....	28
Obr. 14 Modul 1 - Jet Cart.....	34
Obr. 15 Modul 1 - Parametry regulátoru .....	38
Obr. 16 Modul 1 - Horní lišta.....	38
Obr. 17 Modul 1 - Metriky .....	40
Obr. 18 Modul 2 - Inverted Pendulum .....	41
Obr. 19 Pendulum schéma.....	42
Obr. 20 Modul 3 - Race Cars .....	45
Obr. 21 Race Cars schéma.....	46
Obr. 22 Module 4 - Oven.....	48
Obr. 23 Modul 4 - nastavení teploty a poruch.....	52
Obr. 24 Modul 4 - regulátor .....	52
Obr. 25 Modul 4 - volba režimu .....	53
Obr. 26 Modul 4 - Horní graf.....	53
Obr. 27 Modul 4 - Dolní graf .....	54
Obr. 28 Modul 4 - Indikátor "Error Trend" .....	54
Obr. 29 Modul 4 - textový panel .....	55

## Seznam zkratek

API	Application Programming Interface (rozhraní pro programování aplikací)
AR	Augmented Reality (rozšířená realita)
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
IAE	Integral of Absolute Error (integrální kritérium absolutní chyby)
ISE	Integral Square Error (integrál kvadrátu chyby)
ITAE	Integral of Time-weighted Absolute Error (časově vážená absolutní chyba)
JSON	JavaScript Object Notation (formát pro výměnu dat)
MAE	Mean Absolute Error (Průměrná absolutní chyba)
MATLAB	Matrix Laboratory (výpočetní software pro technické výpočty)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (systém s více vstupy a výstupy)
PID	Multiple Input Multiple Output (systém s více vstupy a výstupy)
PLC	Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota)
TF	Transfer Function (přenosová funkce)
UI	User Interface (uživatelské rozhraní)
VR	Virtual Reality (virtuální realita)
ZOH	Zero-Order Hold (držení nulového řádu)

## Úvod

Automatizace a teorie řízení patří mezi klíčové oblasti moderního technického vzdělávání. Regulační systémy se dnes uplatňují v širokém spektru aplikací – od průmyslových procesů přes automobilový průmysl až po robotické systémy. Pochopení principů regulace dynamických systémů je proto důležitou součástí vzdělávání studentů technických oborů. Výuka těchto principů je však často založena převážně na matematickém popisu systémů a analytických metodách, což může být pro studenty obtížně uchopitelné bez vhodné vizualizace a praktické demonstrace.

V posledních letech se proto stále více prosazuje využívání interaktivních simulačních nástrojů, které umožňují propojit teoretické poznatky s experimentálním pozorováním chování systémů. Simulační prostředí umožňují studentům měnit parametry modelů, sledovat odezvu systému v reálném čase a lépe pochopit vztah mezi matematickým modelem a fyzikálním chováním systému. Takové nástroje mohou významně přispět ke zvýšení názornosti výuky a podpořit aktivní přístup studentů k učení.

Jedním z vhodných prostředí pro tvorbu interaktivních simulací je herní engine Unity. Tento nástroj je běžně využíván při vývoji počítačových her, ale díky svým možnostem vizualizace, fyzikální simulace a interaktivního uživatelského rozhraní jej lze efektivně využít také pro tvorbu výukových aplikací. Unity umožňuje propojit matematické modely dynamických systémů s grafickou reprezentací simulovaného prostředí a vytvořit tak názorné výukové nástroje.

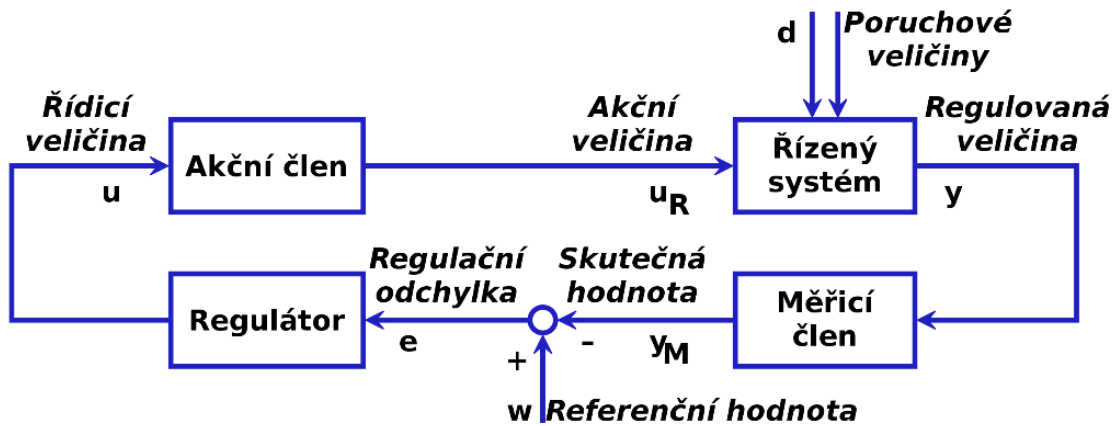
Cílem této diplomové práce je návrh a implementace interaktivní simulační aplikace určené pro podporu výuky základních principů teorie řízení. Aplikace je vytvořena v prostředí Unity a obsahuje několik samostatných simulačních modulů, které reprezentují různé typy dynamických systémů a regulačních úloh. Každý modul umožňuje uživateli experimentovat s parametry regulátoru, sledovat chování systému a analyzovat kvalitu regulace.

Práce je strukturována do několika částí. V první části jsou popsány základní principy automatizace a význam výuky teorie řízení v technickém vzdělávání. Dále jsou představeny současné přístupy k využívání simulačních nástrojů ve výuce. Následující kapitoly se zaměřují na použité technologie, zejména prostředí Unity a implementaci PID regulátoru.

Praktická část práce je věnována návrhu a realizaci simulační aplikace. Jsou zde popsány jednotlivé moduly aplikace, jejich matematické modely, implementace a uživatelské rozhraní.

# 1 Význam automatizace a teorie řízení

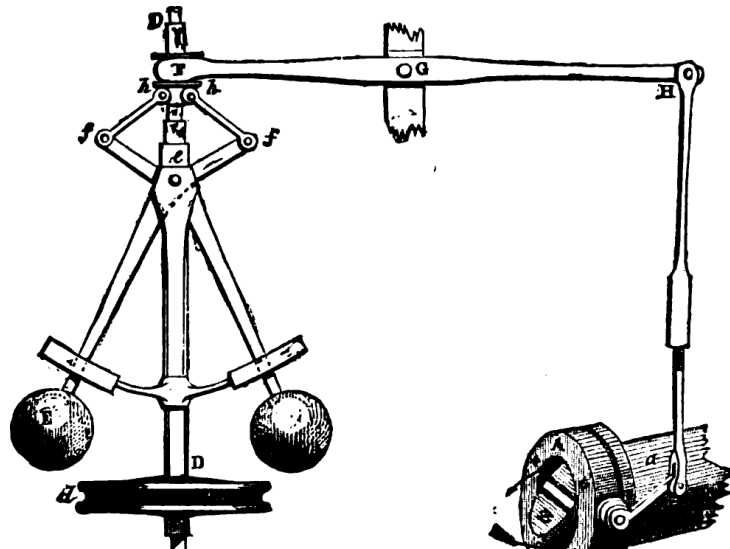
Automatizace představuje jeden z nejvýznamnějších směrů technického rozvoje současnosti. Uplatňuje se v průmyslové výrobě, dopravě, energetice i v každodenním životě, kde zajišťuje efektivní a bezpečné řízení procesů. Srdcem každého automatizačního systému je regulační smyčka (viz Obr. 1) [1], jejímž úkolem je udržovat sledovanou veličinu v požadované hodnotě. Teorie řízení tak tvoří základní pilíř moderní techniky a je nedílnou součástí vzdělávání budoucích inženýrů.



Obr. 1 Regulační smyčka

Historie automatického řízení sahá až k mechanickým regulátorům 18. století (např. Wattův odstředivý regulátor, viz Obr.2 [2]). V 20. století se rozvinula matematická teorie systémů a koncept zpětné vazby, čímž vznikl základ dnešního řízení dynamických systémů.[3] Postupně se obor transformoval z mechanického a elektrotechnického zaměření do interdisciplinární oblasti zahrnující mechatroniku, informatiku a kyber-fyzikální systémy.[4]

V souvislosti s rozvojem digitálních technologií a výpočetní techniky se výrazně proměnilo i prostředí, ve kterém se teorie řízení vyučuje. Simulace a modelování systémů se staly základní součástí výuky, protože umožňují studentům bezpečně experimentovat, vizualizovat chování systému a pochopit dynamické děje, které by v reálné laboratoři bylo obtížné demonstrovat.[5]



Obr. 2 Wattův odstředivý regulátor

## 1.1 Výuka automatizace na vysokých školách

Tradiční výuka teorie řízení je obvykle rozdělena na dvě základní úrovně – „první kurz řízení“ zaměřený na základy zpětnovazebních smyček, stabilitu a PID (proporcionálně-integračně-derivační) regulátory, a navazující kurzy zabývající se pokročilými metodami, jako jsou stavové prostory či prediktivní řízení.

Podle mezinárodní studie IFAC (International Federation of Automatic Control) a IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) existuje široká shoda, že cílem úvodního kurzu není pouze naučit studenty matematické výpočty, ale především rozvíjet konceptuální porozumění principům regulace. Autoři zdůrazňují, že studenti často dokážou provádět výpočty, aniž by chápali fyzikální význam zpětné vazby, což snižuje jejich schopnost aplikovat získané znalosti v praxi. [4]

Výzkum [6] také ukázal, že mezi nejdůležitější témata patří stabilita, přechodová odezva a praktické seřízení PID regulátoru. Tyto oblasti jsou zároveň nejvhodnější pro interaktivní vizualizaci a simulační cvičení, která studentům umožňují sledovat změny chování systému při různých nastaveních parametrů.

Z dalšího výzkumu [7] vyplývá, že moderní kurzy řízení stále více využívají otevřené vzdělávací zdroje a blended learning, tedy kombinaci tradiční výuky s digitálními a online prvky. Takové přístupy umožňují studentům učit se vlastním tempem, opakovat experimenty a rozšiřovat své porozumění i mimo laboratoř.

## 1.2 Současné výukové přístupy a trendy

Výuka automatizace prochází v posledních letech zásadní transformací. Místo pasivního přenosu informací se klade důraz na aktivní zapojení studenta prostřednictvím simulací, vizualizací a interaktivních modelů.[8]

Digitální technologie umožňují vytvářet prostředí, ve kterých studenti mohou „učit se praxí“ (learning by doing), měnit parametry regulátorů, sledovat odezvy systémů a okamžitě vyhodnocovat dopady svých rozhodnutí.

Podle článku „Future Trends for a First Course in Control Engineering“ [9] by měl moderní kurz řízení reflektovat nejen technologický pokrok, ale také proměnu studijních návyků dnešní generace. Místo čistě teoretických cvičení by měla být výuka založena na praktických úlohách a vizuálně srozumitelných modelech, které posilují intuitivní pochopení principů zpětné vazby.

Rozvoj výpočetní techniky a dostupnost softwaru, jako jsou Scilab, OpenModelica, Python, umožnily vytvářet otevřené simulační nástroje dostupné přes webové rozhraní. [10] Tento trend podporuje nejen dostupnost vzdělávání, ale i spolupráci mezi institucemi.

Další výzkumy ukazují, že interaktivní simulace výrazně zvyšují porozumění dynamice systémů a umožňují studentům přenést teoretické znalosti do praktického kontextu. [11] To potvrzuje i Negahban [12], který sleduje přechod od fyzických experimentů k digitálním simulacím.

### 1.3 Motivace k využívání interaktivních simulačních modulů

Z didaktického hlediska jsou interaktivní simulace významným nástrojem pro aktivní učení. Na rozdíl od statických ukázek či přednášek umožňují studentům samostatně experimentovat, objevovat chování systému a okamžitě pozorovat výsledky.

Tento přístup podporuje tzv. konstruktivní učení, kdy studenti aktivně vytvářejí vlastní znalostní struktury prostřednictvím činnosti.[5] [11]

Interaktivní výuka navíc přispívá k motivaci studentů – prvky vizualizace a simulace činí předmět atraktivnějším a srozumitelnějším. To potvrzují i starší práce, např. Kroumov [13], který již v roce 2003 popsal pozitivní dopady interaktivních nástrojů na pochopení řízení u studentů.

Moderní výukové trendy tak směřují k vytváření otevřených, přístupných a vizuálně názorných výukových prostředí, která propojují teorii s praxí a umožňují studentům učit se prostřednictvím experimentu.[7] [9]

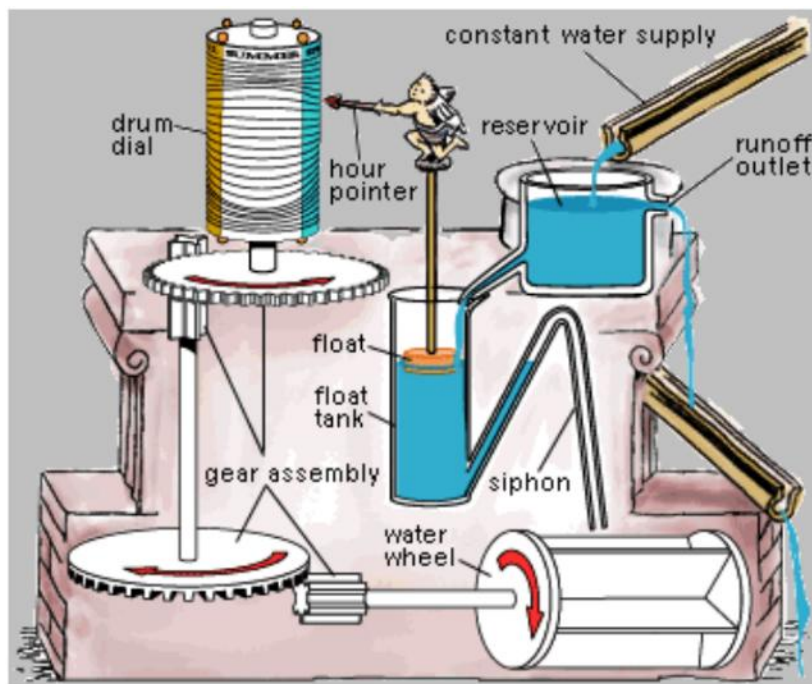
## 2 Vývoj a současný stav simulačních a interaktivních nástrojů ve výuce řízení

Simulace a interaktivní modely hrají v současné výuce teorie řízení zásadní roli. Umožňují zobrazit abstraktní dynamické jevy, bezpečně experimentovat s nastavením řídicích procesů a rozvíjet porozumění, které lze obtížně získat pouze teoretickým studiem. Jejich vývoj prošel dlouhým historickým vývojem – od mechanických regulátorů přes analogové simulátory až po dnešní webové, 3D a AR/VR platformy. Tato kapitola shrnuje tento vývoj v chronologicko-tematické linii a přináší ucelený přehled technických i didaktických trendů, které povede k návrhu vlastních interaktivních modulů.

### 2.1 Počátky simulací a teorie řízení

Počátky automatického řízení sahají hluboko do historie. Již starověké civilizace využívaly jednoduché mechanismy založené na principu zpětné vazby. Příkladem jsou vodní hodiny Ktésia z Alexandrie, které automaticky regulovaly hladinu vody a umožňovaly tak měření času. Čas byl zobrazován pomocí ukazatele pohybujícího se v závislosti na poloze plováku.[14]

Pro dosažení přesného a rovnoměrného měření času bylo nutné zajistit konstantní přítok vody do nádoby s plovákem. Toho bylo dosaženo použitím druhé nádoby, do níž byl přiveden zdroj vody a která byla opatřena odvodňovací trubicí umístěnou v definované výšce. Přebytková voda byla touto trubicí odváděna, čímž byla udržována stálá hladina vody v nádobě. Konstantní hladina následně zajišťovala rovnoměrný průtok vody do nádoby s plovákem a tím i stabilní chod celého měřicího mechanismu. Viz obrázek [14].



Obr. 3 Vodní hodiny

První významný milník však přinesla průmyslová revoluce 18. století – Wattův odstředivý regulátor. Tento mechanický systém automaticky stabilizoval otáčky parního stroje a stal se nejrozšířenější ukázkou řízení v praxi. [3]

První teoretické základy řízení vznikly na přelomu 19. a 20. století. James Clerk Maxwell v roce 1868 matematicky popsal stabilitu regulačních systémů a především prokázal stabilitu Wattova regulátoru. Dále Edward Routh rozpracoval své algebraické kritérium stability, čímž položili základy moderní teorie řízení dynamických systémů.[3] V průběhu 20. století následoval rychlý rozvoj teorie zpětné vazby, zesilovačů a servomechanismů, což vyústilo v období tzv. klasické teorie řízení.

Ve 40. letech 20. století vznikly nástroje, jako jsou Bodeho diagramy, Nyquistovo kritérium stability a využití Laplaceovy transformace, které dodnes tvoří základní repertoár při analýze dynamických systémů. V téže době se začaly objevovat první analogové simulátory, včetně známého zařízení Differential Analyzer, umožňujícího řešit diferenciální rovnice pomocí mechanických převodů.[4] Viz obrázek 4 [15].



Obr. 4 Differential Analyzer

Tyto nástroje byly omezené přesností i flexibilitou, přesto představovaly první možnost, jak „simulovat“ chování dynamického systému bez nutnosti fyzického experimentu.

## 2.2 Rozvoj digitálních simulací a počítačových laboratoří

Digitální revoluce ve 20. století znamenala zásadní zlom. S nástupem počítačů v 50. letech se simulace přesunuly z analogové roviny do numerické. Studenti i inženýři získali přesnější a flexibilnější nástroj, který umožňoval provádět simulace rychleji, opakovaně a bez fyzických omezení.[3]

V 60. a 70. letech se začaly používat první specializované modelovací jazyky, jako CSMP (Continuous System Modelling Program) nebo [U16.1]General Purpose Simulation System, schopné popisovat spojité i diskrétní systémy. Tento přístup se v 80. letech dále rozvinul s nástupem mikroprocesorů a software, který se brzy stal standardem [4]:

- MATLAB – jako prostředí pro numerické výpočty,
- Simulink – umožňující intuitivní modelování pomocí blokových schémat,
- později Scilab a Xcos jako open-source alternativy. [4] [5]

Pro výuku řízení to představovalo zásadní změnu. Studenti už nemuseli experimentovat pouze na fyzických soustavách; mohli simulovat chování systému, porovnávat různé parametry, sledovat přechodové děje a získávat tím hlubší porozumění dynamice.

Univerzitní pracoviště začala tato software spojovat s laboratorními modely – vznikaly první „virtuální laboratoře“, kde studenti porovnávali reálná data se simulovanými výstupy.

### 2.3 Webové a open-source platformy

Po roce 2010 nastává další posun – simulace se přesunují z desktopových aplikací do webového prostředí, které je nezávislé na instalaci software, operačním systému i výkonu uživatele počítače.[3]

Významným příkladem je nástroj Online Tool for Creating Simple Models of Mechanical Systems [10], který propojuje webové rozhraní s výpočty v OpenModelice přes JSON-RPC API. Podobně moderní aplikace PID/PIDA Interactive Tools [16] umožňuje simulovat principy a funkce klasických regulátorů přímo v prohlížeči a okamžitě sledovat časové odezvy.

Výuka řízení tím získává velké výhody:

- dostupnost odkudkoliv,
- rychlá interakce bez instalace,
- možnost využití mobilních zařízení,
- otevřenost a sdílení mezi univerzitami. [7]

Velký rozmach zažívají i mezinárodní platformy (např. Resourcium.org), které více propojují akademickou komunitu a vytvářejí společné databáze pro výuku. [17]

### 2.4 Vzdálené laboratoře a sdílené platformy

Současně s vývojem webových simulací vznikají remote labs – vzdálené laboratoře, které umožňují ovládat reálná zařízení přes internet. Pro studenty jde o unikátní kombinaci skutečného experimentu a pohodlí online přístupu.

První výraznější příklady představují:

- SciLab Based Remote Control of Thermo-Optical Plant [18]
- AutomatL@bs – síť evropských univerzitních vzdálených laboratoří. [19]

Vzdálené laboratoře řeší několik tradičních problémů výuky:

- omezená kapacita fyzické laboratoře,
- potřeba asistence vyučujícího,
- údržba zařízení,
- riziko poškození při experimentu.

Díky internetu mohou studenti provádět experimenty kdykoliv a odkudkoli, což výrazně podporuje blended learning a moderní distanční výuku. [8]

## 2.5 3D vizualizace, AR/VR a současné trendy

Poslední dekáda přinesla dynamický rozvoj 3D modelů, vizualizačních technologií a rozšířené a virtuální reality (AR/VR). Tyto nástroje propojují simulaci, interakci a vizuální vnímání do jediného prostředí.

Nejvýznamnější přínosy 3D a AR/VR ve výuce řízení [20]:

- intuitivní pochopení pohybu a dynamiky,
- možnost experimentovat v prostorovém modelu,
- podpora motivace a aktivního učení.

Příklady moderních implementací:

- 3D Visualization Methods in Online Control Experimentation – Unity + vizualizace reálných systémů [20],
- WebGL Presentation of Three Tank System – interaktivní model vícenádržové soustavy [21],
- Reaction Wheel Pendulum – WebGL 3D model se simulací v pozadí [22],
- AR aplikace podle Menezes (2017), umožňující studentům „vidět“ dynamiku v rozšířené realitě. [23]

Moderní výuka směřuje k imerzivním prostředím, kde se student stává aktivním účastníkem simulačního procesu. Jak uvádí Negahban [12], budoucí vzdělávací platformy budou kombinovat reálné, simulované a vizuálně rozšířené prvky do jednoho hybridního prostředí.

## 2.6 Výuka řízení na českých školách

V prostředí českých vysokých škol se výuka automatizace a teorie řízení opírá o kombinaci tří hlavních přístupů:

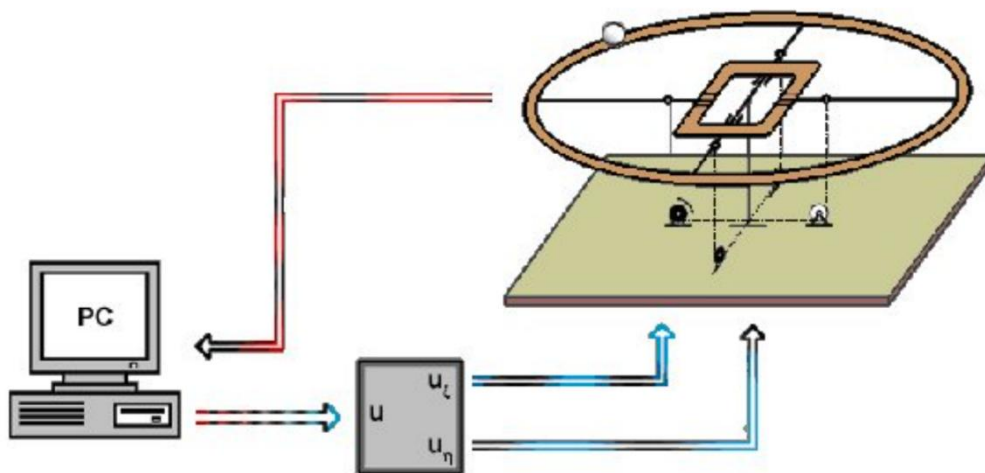
- hands-on laboratorní úlohy na reálných soustavách [24],
- modelování a simulace v profesionálních nástrojích (zejména MATLAB/Simulink) [25],
- virtuální a vzdálené laboratoře dostupné přes webové rozhraní. [26]

### 2.6.1 ČVUT v Praze (hands-on výuka)

Na Fakultě strojní ČVUT je výuka základů zpětnovazebního řízení významně podpořena specializovanou Laboratoří automatického řízení, která je určena primárně studentům úvodního kurzu Automatické řízení. Důraz je kladen na praktické zvládnutí klíčových kroků [24]:

1. určení dynamických vlastností reálného zařízení (identifikace/odhad modelu),
2. návrh a seřízení regulátoru, typicky PID,
3. ověření výsledného chování v uzavřené smyčce.

Příkladem experimentální úlohy realizované v této laboratoři je systém „Kulička na elipse“, kde je eliptická dráha aktivně naklápěna ve dvou osách. Úkolem studenta je navrhnout regulátor, který zajistí řízený průjezd kuličky po celé trajektorii elipsy při zachování stability systému viz obrázek. [27]



Obr. 5 Schéma laboratorní úlohy "Kulička na elipse"

### 2.6.2 VUT v Brně: simulace v MATLAB/Simulink

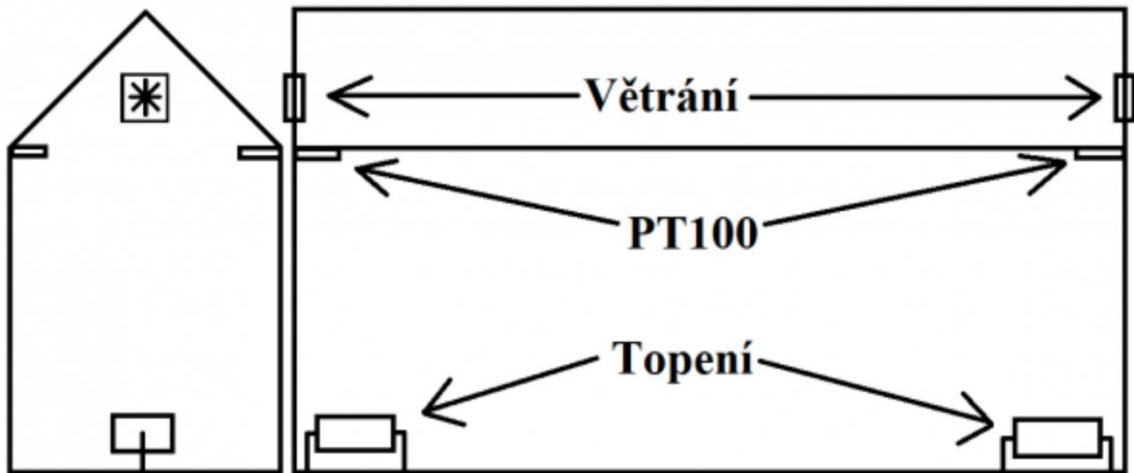
Na VUT v Brně je typický důraz na modelování dynamických systémů a jejich simulaci v MATLAB/Simulink. V popisu předmětu „Modelování a simulace I“ (FSI) je explicitně uvedeno, že hlavním pracovním nástrojem je MATLAB/Simulink a že teoretické poznatky jsou v laboratorním cvičení demonstrovány na konkrétních reálných modelech řízených ze Simulinku pomocí I/O karty MF624. [25]

### 2.6.3 ZU v Praze: virtuální laboratoř automatizace s úlohami a dohledem

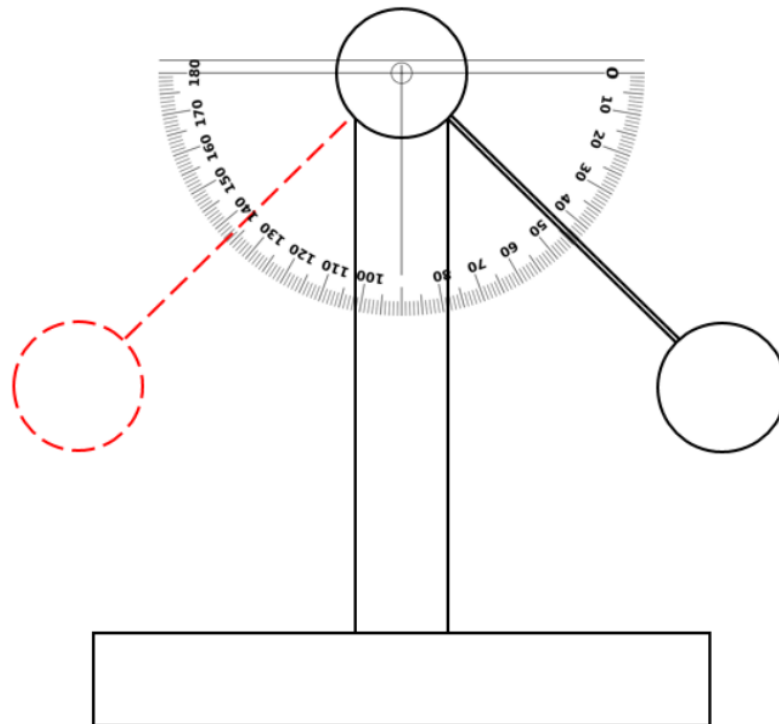
Technická fakulta ČZU provozuje projekt Virtuální laboratoř, kde je dostupná sekce „Automatizace“ s více konkrétními úlohami. Ve veřejném přehledu je uvedeno, že úlohy obsahují propojení PLC systému Siemens LOGO a simulačních úloh pro různé mechanické veličiny a stavy, přičemž PLC je spojen s IP kamerami pro možnost monitorování chodu aplikace. V rámci řešení jsou uvedeny modely křižovatky, skleníku, dopravníku a kyvadla. [26]

Konkrétní zadání ilustrují typické učební situace. Například úloha „Skleník“ pracuje s regulací teploty pomocí akčních členů (topení, větráky) a cílovou hodnotou 28°C, přičemž student realizuje řídicí logiku/program pro regulaci viz obrázek 6. [28] Úloha „Kyvadlo“ popisuje řízení

soustavy s ramenem kyvadla poháněným DC motorem a snímaným inkrementálním snímačem, kde student sestavuje a ověřuje regulaci polohy či chování systému viz obrátek 7. [29]



Obr. 7 Schéma laboratorní úlohy "skleník"



Obr. 6 Laboratorní úloha "kyvadlo"

#### 2.6.4 UTB ve Zlíně: laboratorní úlohy zaměřené na reálné dynamické systémy

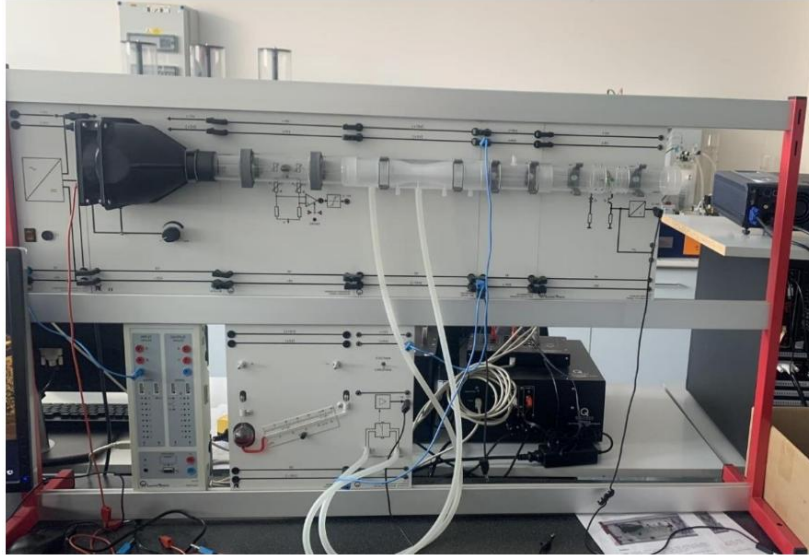
Na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně jsou laboratorní úlohy v oblasti řízení orientovány na konkrétní fyzikální soustavy, na nichž jsou demonstrovány základní i pokročilé principy regulace a dynamiky systémů. Jednotlivé práce ukazují široké spektrum řešených úloh – od jednoduché regulace průtoku vzduchu [30] až po více rozměrové mechanické systémy.[31]

Jednou z úloh je regulace průtoku vzduchu potrubím pomocí procesního regulátoru. V této úloze je řízeným systémem laboratorní soustava od společnosti LD Didactic (viz Obr. 8), kde vstupem

je ventilátor regulovaný stejnosměrným napětím a výstupem průtok vzduchu měřený čtyřmi senzory (Fotočlen, snímač teploty, Manometr a tlakoměr). [30] Úloha se zaměřuje na:

- určení statických parametrů,
- identifikace matematického modelu. [30]

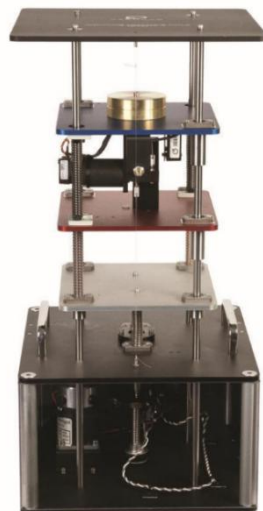
Součástí je i porovnání různých typů regulace, zejména PID a dvoupolohové regulace, a jejich vlivu na stabilitu a kvalitu řízení. [30]



**Obr. 8 Laboratorní soustava LD Didactic**

Další skupinu tvoří úlohy zaměřené na mechanické soustavy s dynamickým chováním, konkrétně laboratorní soustava aktivního tlumení od značky Quanser (viz Obr.9). Jedná se o systém reprezentující odpružení „vozidla“, kde vstupem je akční zásah pomocí motoru řízený napětím a výstupem pohyb systému. [32]

Na tomto systému se vykonává řada úloh od určení statické charakteristiky systému, přes identifikaci systému až po PID regulaci. Tyto úlohy reprezentují reálné technické problémy spojené s vibracemi a tlumením v mechanických systémech.[32]



**Obr. 9 Laboratorní soustava aktivního tlumení**

Poněkud specifickou laboratorní úlohu představuje gyroskop se třemi stupni volnosti od společnosti Quanser (viz Obr. 10). Tato soustava se vyznačuje vzájemnou vazbou mezi jednotlivými osami pohybu, což významně komplikuje návrh řízení. Konstrukce zařízení navíc umožňuje mechanickou aretaci jednotlivých os pomocí šroubů, čímž lze soustavu upravit postupným odebíráním stupňů volnosti.[31]

Jedná se o pokročilé úlohy, které ilustrují problematiku MIMO systémů (Multiple Input – Multiple Output) a jejich řízení. [31]



**Obr. 10 Gyroskop od firmy Quansar3**

Další oblastí jsou úlohy vycházející z předmětů zaměřených na teorii řízení, které kombinují matematické modely se simulačními experimenty. Tyto úlohy zahrnují[33]:

- analýzu stability systémů,
- návrh regulátorů na základě přenosových funkcí,
- simulaci odezvy systému na různé typy vstupů,
- porovnání teoretických výsledků se simulací.

Z uvedeného přehledu je patrné, že laboratorní úlohy na UTB ve Zlíně pokrývají široké spektrum problémů. Společným prvkem, je důraz na reálné fyzikální soustavy a jejich chování, které slouží jako základ pro pochopení principů automatického řízení.[31]

## 3 Interaktivita jako nástroj moderního učení

Vzdělávání v technických oborech prošlo v posledních desetiletích zásadní proměnou. Zatímco dříve byl důraz kladen na přednáškový výklad a reprodukci postupů, dnešní přístup se zaměřuje na aktivní učení, při němž studenti získávají znalosti prostřednictvím experimentování, manipulace s modely a řešení problémů. Interaktivní výukové nástroje se staly přirozeným rozšířením těchto trendů a představují klíčový prvek moderní výuky automatizace.

Interaktivní simulace umožňují studentům aktivně manipulovat s parametry, pozorovat odpovědi systémů a okamžitě vyhodnocovat výsledky. Podle řady autorů podporují současně kognitivní, motivační a kontextové faktory učení – tedy tři pilíře úspěšného vzdělávacího procesu. [8]

Rossiter a kol [9] upozorňuje, že principy interaktivity ve výuce analogicky odpovídají principům automatického řízení: akce → odezva → korekce. Tento cyklus studenti zažívají přímo při práci s modelem a přirozeně tak chápou dynamiku systémů.

Metaanalýza Brinsona [11] ukazuje, že interaktivní experimenty – ať už simulační, nebo online – vedou k vyšší míře pochopení, motivace a dlouhodobé retence než tradiční laboratorní cvičení. Interaktivita tedy nepředstavuje pouze technický doplněk, ale zásadní didaktický princip podporující hlubší pochopení a samostatnost.

### 3.1 Motivace studentů a role experimentu

Motivace hraje v učení zásadní roli, zejména v technických předmětech, které mohou působit abstraktně nebo matematicky náročně. Jedním z nejsilnějších způsobů, jak motivaci zvýšit, je vizualizace a aktivní experimentace. Student tak může vidět jevy, které jsou jinak skryté – například přechodovou odezvu, oscilace, zpoždění nebo stabilizaci systému.

Münz a kol [34] ukazuje, že využití gamifikace – soutěžních úloh, skórování nebo optimalizačních výzev – může výrazně zvýšit motivaci studentů a současně prohloubit jejich schopnost intuitivně ladit regulátory.

Rossiter [9] i Serbezov [7] doporučují poskytovat studentům možnost samostatné práce mimo laboratoř, což zvyšuje míru autonomie a podporuje tzv. self-paced learning. Tento způsob učení umožňuje studentům opakovat experimenty, porovnávat různé postupy a přebírat odpovědnost za vlastní proces učení.

Důležitý je i psychologický aspekt: jak ukazují novější práce v oblasti kognitivní psychologie technického vzdělávání, interaktivita přispívá k vyšší vnitřní motivaci, protože vyvolává pocit kompetence a kontroly nad učením. [35]

Student není pouze posluchačem, ale experimentátorem, což odpovídá současnému konstruktivistickému pojetí výuky.

### 3.2 Didaktické zásady výuky automatizace

Úspěšná výuka automatizace vyžaduje propojení teoretických znalostí s praktickou zkušeností. Podle Dormida [19] by měl být celý výukový proces cyklický a měl by zahrnovat následující fáze:

- Modelování – abstraktní popis systému,
- Testování – ověření chování modelu,
- Vizualizaci – převedení odezvy do grafické podoby,
- Experiment – aktivní manipulaci s parametry,
- Reflexi – vyhodnocení správnosti a chyb.

Každý krok má specifický didaktický účel: od osvojování teorie, přes pochopení dynamiky až po vlastní kreativní řešení problémů.

Z didaktického hlediska jsou klíčové zejména tyto zásady:

a) Zásada názornosti

Grafy, animace a vizualizace podporují rychlejší pochopení vztahů mezi veličinami. V technickém vzdělávání je vizualita jedním z nejdůležitějších faktorů porozumění dynamickým procesům. [36]

b) Zásada aktivního učení

Student musí být aktérem, nikoliv divákem. Pouhé sledování demonstrace má výrazně nižší pedagogickou hodnotu než samostatný experiment. [37]

c) Zásada okamžité zpětné vazby

System by měl okamžitě reagovat na změny parametrů regulátoru. Okamžitá odezva posiluje učení a umožňuje rychle identifikovat chyby. [37]

d) Zásada postupnosti a scaffolding

Učení by mělo začínat na jednoduchých modelech (např. lineární systém 1. řádu) a postupně přecházet ke složitějším úlohám, jako jsou vícerozměrné (MIMO) systémy nebo stavové řízení. [37]

Tento přístup odpovídá principu tzv. scaffolding, tedy postupného zvyšování obtížnosti v souladu s možnostmi studenta. Pedagogické a kognitivní studie ukazují, že taková struktura výuky je nezbytná pro efektivní učení, protože omezuje nadměrnou kognitivní zátěž a podporuje hlubší porozumění. [37] [38]

e) Otevřenost a sdílení zdrojů

Serbezov [7] zdůrazňuje důležitost open-access nástrojů a sdílení mezi školami. Přispívá to k demokratizaci technického vzdělávání i rychlejšímu vývoji kvalitních materiálů.

### 3.3 Metodika návrhu interaktivních výukových modulů

Návrh interaktivního výukového modulu musí vycházet nejen z technických, ale především z didaktických zásad. Modul by měl být strukturován do tří vrstev:

- Výpočtová vrstva – numerická simulace systému (Python, Scilab, Modelica, Unity).
- Vizualizační vrstva – převod výstupů do grafů, animací nebo 3D scén.
- Interaktivní vrstva – parametry, ovládací prvky, reset, přepínání režimů.

Žáková et al. [16] uvádějí, že moderní modul by měl umožnit:

- simultánní zobrazení více odezev,
- srovnání různých nastavení regulátoru,
- výpočet výkonových kritérií ( $ISE^1$ ,  $IAE^2$ ,  $ITAE^3$ ),
- snadnou konfiguraci parametrů.

Žáková, Andrejko a Matišák [22] ukazují, že 3D vizualizace dále zvyšuje didaktickou hodnotu, protože student vidí nejen numerickou odezvu, ale i pohybový kontext systému (např. kyvadlo, rotor, nádrže).

Matišák a Žáková [20] doporučují doplnit modul o integrovaný uživatelský manuál nebo výukové vysvětlivky, které ulehčují vstup začátečníkům a podporují self-directed learning.

Pro návrh vyučovacího modulu je nakonec klíčová také ergonomie rozhraní – jednoduchost, přehlednost a jasné ovládání. Studie z oblasti human–computer interaction ukazují, že kvalita UI významně ovlivňuje učení i motivaci. [39]

### 3.4 Hodnocení efektivity interaktivních simulací

Zavedení interaktivních simulací vyžaduje nejen technické řešení, ale i pedagogické vyhodnocení. Brinson [11] doporučuje sledovat tři základní oblasti:

- Porozumění – do jaké míry studenti pochopili klíčové pojmy.
- Motivaci – zda se zvýšil jejich zájem a angažovanost.
- Dovednosti – schopnost aplikovat teorii při řešení úloh.

Studie ukazují, že studenti používající interaktivní simulace dosahují lepších výsledků ve všech třech oblastech. [7] [11]

Campos [8] zdůrazňuje, že nejlepších výsledků dosahuje blended learning.

Pro úspěšné zavedení modulu se doporučuje:

- pilotní testování s malou skupinou studentů,
- sběr zpětné vazby od studentů i vyučujících,
- následné úpravy UI, funkcí i didaktických prvků,
- průběžná evaluace v dalších semestrech.

---

<sup>1</sup> ISE – Integral Square Error (integrál kvadrátu chyby)

<sup>2</sup> IAE – Integral of Absolute Error (integrální kritérium absolutní chyby)

<sup>3</sup> Integral of Time-weighted Absolute Error (časově vážená absolutní chyba)

## 4 Návrh aplikace

Tato kapitola se zabývá návrhem interaktivní simulační aplikace určené pro výuku základních principů teorie řízení a teorie systémů. Na základě poznatků uvedených v předchozích kapitolách byl navržen systém, který umožňuje studentům experimentovat s dynamickými systémy, měnit parametry regulátorů a pozorovat chování systému v reálném čase.

Cílem návrhu bylo vytvořit prostředí, které propojuje matematický model řízeného systému s vizuální reprezentací jeho chování. Takové prostředí podporuje intuitivní pochopení dynamiky systémů a principů zpětnovazebního řízení. Aplikace je koncipována jako sada samostatných simulačních modulů, které reprezentují různé typy dynamických systémů a různé úlohy řízení.

Návrh aplikace vychází z didaktických principů uvedených v kapitole 3, zejména ze zásady názornosti, principu aktivního učení a principu okamžité zpětné vazby. Student má možnost měnit parametry systému i regulátoru a okamžitě sledovat změnu odezvy systému. Tím se vytváří prostředí vhodné pro experimentální výuku, které umožňuje aktivní objevování principů regulace.

### 4.1 Cíle a požadavky aplikace

Při návrhu aplikace bylo nutné definovat základní požadavky, které by měl výukový nástroj splňovat. Tyto požadavky vycházejí jak z technických možností současných simulačních nástrojů, tak z didaktických potřeb výuky teorie řízení.

Hlavním cílem aplikace je vytvořit interaktivní prostředí, ve kterém mohou studenti experimentovat s regulačními systémy a sledovat důsledky svých rozhodnutí v reálném čase. Aplikace by měla sloužit jako doplněk k teoretické výuce a pomoci studentům lépe pochopit dynamiku systémů a principy zpětné vazby.

Z hlediska funkčních požadavků bylo stanoveno, že aplikace musí umožňovat:

- interaktivní změnu parametrů regulátoru (např. PID parametrů),
- vizualizaci odezvy systému v čase,
- simulaci dynamických systémů v reálném čase,
- reset simulace a opakování experimentů,
- srovnání různých nastavení parametrů.

Důležitým požadavkem bylo také vytvoření prostředí, které bude pro studenty intuitivní a přehledné. Uživatelské rozhraní musí umožňovat rychlou orientaci v parametrech systému a současně zobrazovat důležité informace o aktuálním stavu simulace.

Dalším cílem návrhu bylo vytvořit modulární architekturu aplikace. Každý simulační modul je navržen jako samostatná scéna, která reprezentuje konkrétní dynamický systém. Tento přístup umožňuje aplikaci snadno rozšiřovat o další moduly nebo nové typy experimentů.

## 4.2 Konceptce výukových modulů

Simulační aplikace je navržena jako sada výukových modulů, z nichž každý představuje specifickou úlohu z oblasti teorie řízení. Jednotlivé moduly reprezentují různé typy dynamických systémů a umožňují studentům experimentovat.

Při návrhu modulů byl uplatněn princip postupného zvyšování obtížnosti. Studenti mají k dispozici jednoduché systémy, jejichž chování je relativně snadno pochopitelné, i složitější. Tento přístup odpovídá didaktickému principu postupnosti a umožňuje studentům budovat znalosti krok za krokem.

Každý modul je navržen tak, aby splňoval několik základních didaktických funkcí:

- demonstrace konkrétního principu řízení,
- možnost experimentovat s parametry regulátoru,
- vizualizace dynamiky systému,
- možnost simulovat poruchy (např. v modulu 1 vítr se jedná o vítr) nebo změny podmínek.

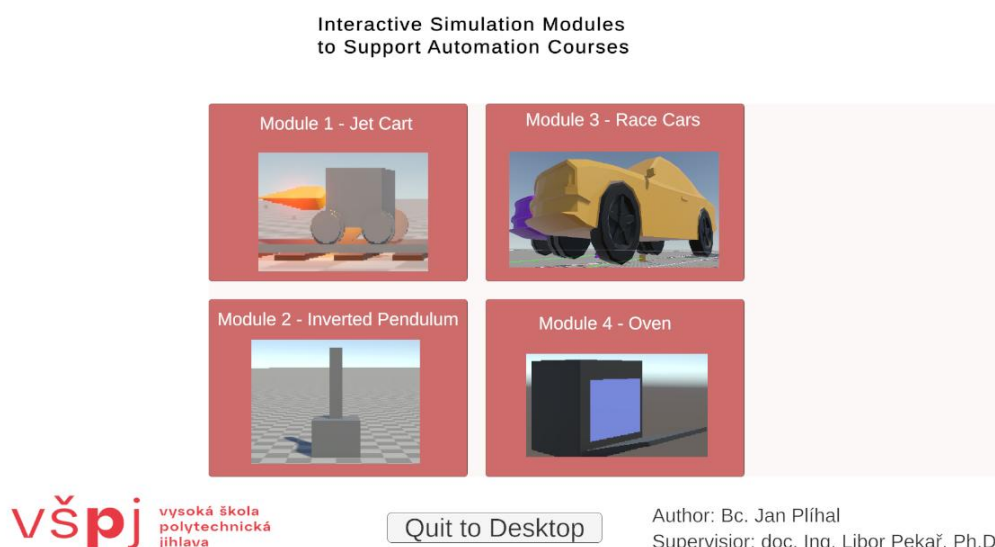
Simulace jsou navrženy tak, aby student mohl sledovat nejen výslednou odezvu systému, ale také jednotlivé veličiny, které se na řízení podílejí. Tím je možné lépe pochopit vztah mezi vstupy, výstupy a stavovými veličinami systému.

## 4.3 Architektura aplikace

Architektura aplikace je navržena modulárním způsobem. Základní strukturu aplikace tvoří hlavní menu a jednotlivé simulační moduly, které jsou implementovány jako samostatné scény.

Hlavní menu slouží jako vstupní bod aplikace. Uživatel zde může zvolit konkrétní simulační modul, který chce spustit. Každý modul je poté načten jako samostatná scéna, která obsahuje všechny komponenty potřebné pro simulaci.

Architektura aplikace může být schematicky znázorněna následovně:



Obr. 11 Menu aplikace

Každý modul obsahuje několik základních částí:

- model dynamického systému,
- implementaci regulátoru,
- grafické rozhraní pro ovládání simulace,
- vizualizaci systému.

Díky této architektuře je možné moduly vyvíjet a testovat nezávisle na sobě. Zároveň lze aplikaci v budoucnu rozšířit o další moduly bez nutnosti zásadních změn v základní struktuře programu.

## 4.4 Vývojové prostředí Unity

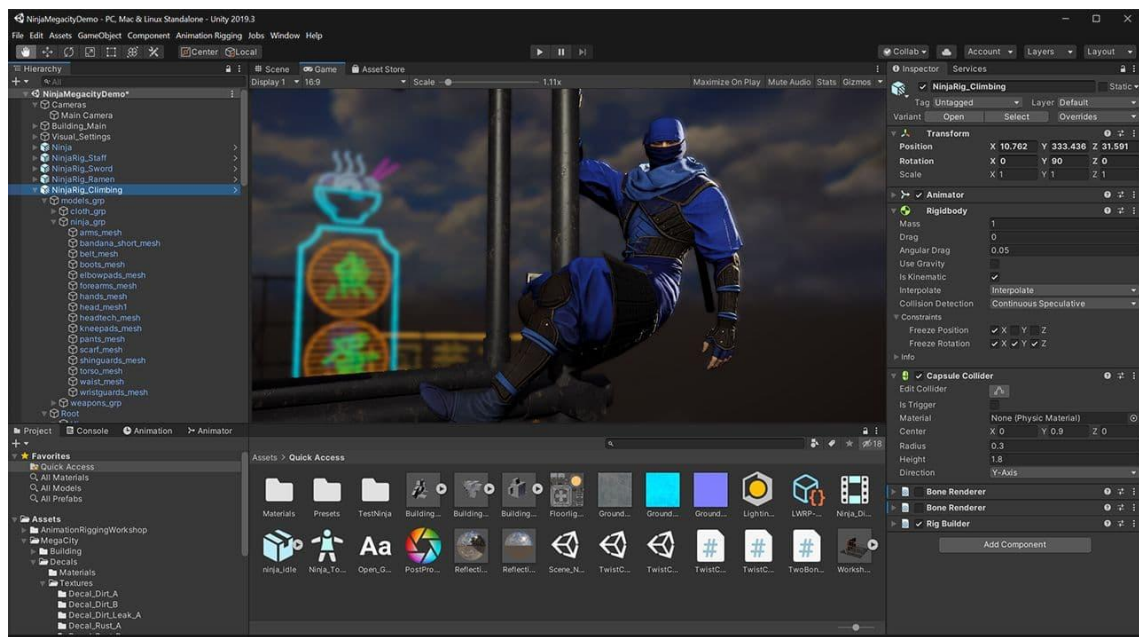
Pro realizaci simulační aplikace byl zvolen herní engine Unity. Jedná se o multiplatformní vývojové prostředí, které je běžně používáno pro vývoj počítačových her, simulací a interaktivních aplikací.[40]

Unity poskytuje řadu nástrojů, které jsou vhodné pro tvorbu interaktivních simulací. Mezi hlavní výhody tohoto prostředí patří [40]:

- integrovaný fyzikální engine,
- podpora 3D grafiky,
- možnost tvorby interaktivního uživatelského rozhraní,
- multiplatformní export aplikací,
- rozsáhlá komunita a dokumentace.

Použití herního engine ve vzdělávacích aplikacích je stále častější, protože umožňuje kombinovat realistickou vizualizaci s interaktivní simulací. Studenti tak mohou sledovat chování systému nejen v grafické podobě, ale také prostřednictvím animovaného modelu.[40]

Unity umožňuje vytvářet aplikace pomocí konceptu scén, objektů a komponent. Každý objekt ve scéně může obsahovat různé komponenty, které určují jeho vlastnosti a chování. Tento přístup umožňuje vytvářet komplexní simulace z relativně jednoduchých stavebních prvků.[40]



Obr. 12 Unity Editor

## 4.5 Fyzikální simulace v Unity

Jednou z klíčových vlastností prostředí Unity je integrovaný fyzikální engine, který umožňuje simulovat pohyb objektů a jejich vzájemné interakce. Fyzikální simulace je založena na řešení rovnic pohybu v diskrétních časových krocích.

Unity využívá komponentu Rigidbody, která reprezentuje fyzikální objekt podléhající silám a momentům. Pomocí této komponenty je možné simulovat pohyb těles v prostoru, jejich kolize a interakce s dalšími objekty.

Fyzikální engine umožňuje aplikovat na objekty různé typy sil, například:

- konstantní síly,
- impulzy,
- momenty síly.

Tyto vlastnosti jsou využívány při simulaci dynamických systémů v jednotlivých modulech aplikace. Například pohyb vozíku, rotace kyvadla nebo pohyb vozidla po trajektorii jsou realizovány pomocí fyzikální simulace.

Výhodou tohoto přístupu je realistické chování objektů, které odpovídá fyzikálním zákonům. Student tak může sledovat nejen matematickou odezvu systému, ale také fyzickou reprezentaci jeho chování.

## 4.6 Programování aplikace v jazyce C#

Logika aplikace je implementována pomocí skriptů napsaných v programovacím jazyce C#. Tento jazyk je standardním programovacím jazykem používaným v prostředí Unity.

Skripty jsou připojeny k jednotlivým objektům ve scéně a definují jejich chování během simulace. Pomocí skriptů je možné implementovat například:

- výpočet regulačního zásahu,
- aktualizaci stavu systému,
- zpracování vstupů od uživatele,
- řízení průběhu simulace.

Programová logika aplikace je rozdělena do několika typů skriptů. Některé skripty jsou zodpovědné za simulaci dynamického systému, jiné implementují regulátor nebo zajišťují komunikaci s uživatelským rozhraním.

Tento přístup umožňuje oddělit jednotlivé části aplikace a zvyšuje přehlednost zdrojového kódu. Každý skript má jasně definovanou funkci a je možné jej upravovat nebo rozšiřovat nezávisle na ostatních částech systému.

## 4.7 Návrh uživatelského rozhraní

Důležitou součástí aplikace je uživatelské rozhraní, které umožňuje ovládání simulace a změnu parametrů systému. Při návrhu rozhraní byl kladen důraz na jednoduchost, přehlednost a intuitivní ovládání.

Rozhraní obsahuje několik základních typů prvků:

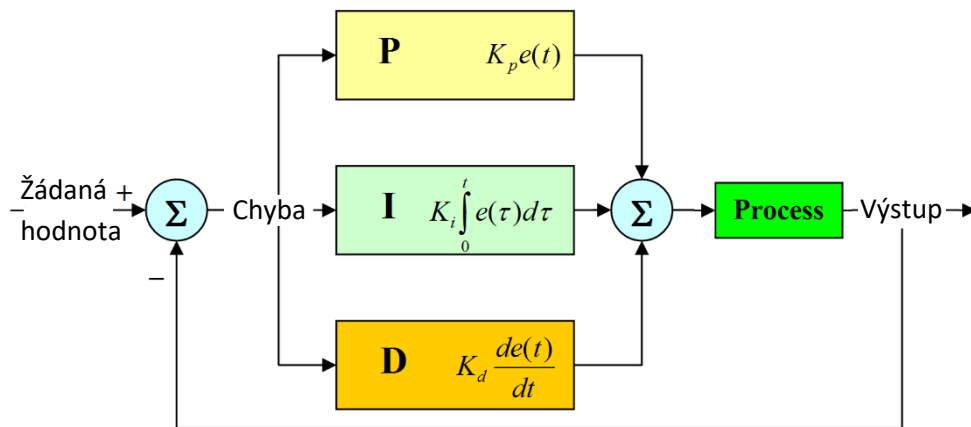
- ovládací tlačítka pro spuštění, zastavení a reset simulace,
- posuvníky pro změnu parametrů regulátoru,
- textová pole pro zobrazení aktuálních hodnot,
- grafy zobrazující průběh veličin v čase.

Důležitou součástí rozhraní je také vizualizace simulovaného systému. Studenti tak mohou sledovat nejen numerické hodnoty, ale také pohyb objektů v simulaci. Tento přístup podporuje intuitivní pochopení dynamiky systému.

Při návrhu rozhraní byly zohledněny také principy human–computer interaction, které zdůrazňují význam přehledného uspořádání ovládacích prvků a minimalizace kognitivní zátěže uživatele. Přehledné rozhraní umožňuje studentům soustředit se na samotný princip řízení, nikoli na ovládání aplikace.

## 4.8 Regulátor PID v simulaci

Pro řízení dynamických systémů v jednotlivých simulačních modulech je použit proporcionálně-integračně-derivační regulátor (PID). Tento typ regulátoru patří mezi nejrozšířenější regulační algoritmy používané v průmyslové praxi. Jeho popularita je dána především relativně jednoduchou strukturou a schopností poskytovat dobré regulační vlastnosti pro širokou škálu systémů. Obrázek 10 ukazuje PID regulátor ve zpětnovazební smyčce. [41]



Obr. 13 PID regulátor

PID regulátor generuje regulační zásah na základě regulační odchylky mezi požadovanou hodnotou a skutečnou hodnotou regulované veličiny. Regulační odchylka je definována jako [42]:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

Kde

- $r(t)$  představuje požadovanou hodnotu (setpoint),
- $y(t)$  je aktuální hodnota výstupu systému,
- $e(t)$  je regulační odchylka.

Výstup regulátoru je tvořen kombinací tří složek: proporcionální, integrační a derivační.

#### 4.8.1 Proporcionální složka

Proporcionální složka je přímo úměrná aktuální regulační odchylce. Jejím hlavním účelem je zajistit rychlou reakci systému na změnu požadované hodnoty nebo na vznik poruchy.

Proporcionální část regulátoru lze vyjádřit vztahem [42]:

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (2)$$

kde

- $K_p$  je proporcionální zesílení regulátoru.

Zvýšení hodnoty  $K_p$  vede obecně k rychlejší odezvě systému, avšak příliš vysoké zesílení může způsobit nestabilitu nebo výrazné oscilace systému.

#### 4.8.2 Integrační složka

Integrační složka slouží k eliminaci trvalé regulační odchylky. Tato složka integruje regulační odchylku v čase a postupně zvyšuje regulační zásah, dokud není odchylka odstraněna.

Matematicky lze integrační část vyjádřit jako [42]:

$$u_i = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

kde

- $K_i$  je integrační zesílení regulátoru.

Integrační složka regulátoru slouží k eliminaci ustálené regulační odchylky, která může vznikat vlivem poruch nebo nedokonalosti modelu systému. Její význam se projevuje zejména při působení konstantních poruch, kdy umožňuje dosáhnout nulové ustálené odchylky mezi skutečnou a požadovanou hodnotou.

V případě časově proměnných poruch však integrační složka nedokáže chybu zcela eliminovat a její působení může vést ke zpoždění odezvy systému nebo ke vzniku oscilací. Integrační složka rovněž ovlivňuje reakci systému na změnu žádané veličiny, kdy přispívá k dosažení přesné hodnoty v ustáleném stavu.

#### 4.8.3 Derivační složka

Derivační složka reaguje na rychlost změny regulační odchylky. Jejím cílem je zlepšit stabilitu systému a potlačit oscilace.

Derivační část regulátoru lze vyjádřit vztahem [42]:

$$u_d = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

kde

- $K_d$  představuje derivační zesílení regulátoru.

Derivační složka působí jako prediktivní člen, který reaguje na změnu regulační odchylky v čase a může výrazně zlepšit přechodové vlastnosti regulace, zejména snížením překmitu a zlepšením stability systému.

Nevýhodou derivační složky je její vysoká citlivost na měřicí šum, protože derivace zesiluje vysokofrekvenční složky signálu. V praktických aplikacích proto bývá derivační člen doplněn o filtrační prvek. Dalším omezením je skutečnost, že derivační složka neovlivňuje ustálenou regulační odchylku a její nevhodné nastavení může vést k nestabilitě nebo k nežádoucím oscilacím systému.

#### 4.8.4 Celkový tvar PID regulátoru

Paralelní kombinací jednotlivých složek získáme celkový tvar PID regulátoru:

$$u(t) = u_p + u_i + u_d = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Každá z jednotlivých složek ovlivňuje chování regulačního systému jiným způsobem. Proporcionální část zajišťuje rychlou reakci systému, integrační část odstraňuje trvalou regulační odchylku a derivační část zlepšuje stabilitu systému.

V praxi se běžně nejprve nastavuje proporcionální zesílení  $K_p$ , a poté integrační a derivační časové konstanty  $T_i$  a  $T_d$ . Integrační a derivační zesílení tedy lze přepočítat jako [42]:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (6)$$

$$K_d = K_p \cdot T_d \quad (7)$$

Po dosažení dostaneme celkový tvar PID regulátoru jako:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (8)$$

#### 4.8.5 Diskrétní implementace regulátoru

V simulační aplikaci je regulátor implementován v diskrétní podobě, protože výpočet regulace probíhá v jednotlivých časových krocích simulace. Regulátor tedy pracuje s diskrétními hodnotami regulační odchylky vypočtenými v každém simulačním kroku.

Vzorkovací perioda je dána nastavením fyzikálního enginu prostředí Unity, konkrétně parametrem `Time.fixedDeltaTime`. Tento parametr určuje interval mezi jednotlivými kroky fyzikální simulace, ve kterých je současně prováděn výpočet regulátoru. Standardní hodnota tohoto parametru je 0,02 s, což odpovídá vzorkovací frekvenci 50 Hz. Tato hodnota může být změněna v nastavení projektu, není však přímo nastavována uživatelem v rámci aplikace.

V modulu 4 má uživatel možnost ji nastavit, což umožňuje demonstrovat vliv vzorkování na chování diskrétní regulační smyčky.

Diskrétní implementace PID regulátoru může být vyjádřena například ve tvaru [42]

$$u_k = K_p e_k + K_i \sum_{i=0}^k e_i \Delta t + K_d \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t} \quad (9)$$

$$u_k = K_p \left( e_k + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^k e_i \Delta t + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t} \right) \quad (10)$$

kde

- $k$  označuje index časového kroku,
- $\Delta t$  je velikost časového kroku simulace.

Tento přístup odpovídá způsobu, jakým jsou regulátory implementovány v digitálních řídicích systémech.

V aplikaci je PID regulátor implementován jako samostatná třída v jazyce C#, která je využívána ve všech simulačních modulech. Regulátor pracuje v diskretním čase a jeho implementace odpovídá vztahu (6).

Proporcionální složka je realizována přímo jako násobek regulační odchylky. Integrační složka je implementována jako akumulace regulační odchylky v čase s omezením její maximální hodnoty (anti-windup). Derivační složka je v aplikaci počítána jako derivace regulační odchylky.

Konkrétní význam regulované veličiny a akčního zásahu se liší podle jednotlivých simulačních modulů, jak je popsáno v kapitole 5.

#### 4.8.6 Omezení výstupu regulátoru

V reálných systémech je výstup regulátoru omezen fyzikálními vlastnostmi aktuátoru. Z tohoto důvodu je v simulaci implementováno omezení maximálního regulačního zásahu.

Výstup regulátoru je omezen na interval  $u \in [-1, 1]$ .

Tato hodnota je následně převedena na akční veličinu působící na objekt simulovaného systému. Omezení výstupu umožňuje demonstrovat situace, kdy regulátor dosáhne limitu aktuátoru, což může ovlivnit dynamiku systému.

#### 4.8.7 Ochrana proti integrátorovému nasycení

Při dlouhodobé saturaci výstupu regulátoru může docházet k jevu označovanému jako integrátorové nasycení (integral windup). Tento jev nastává v případě, kdy integrační složka regulátoru roste i v situaci, kdy již není možné zvýšit regulační zásah, případně jej analogicky snižovat pod minimální možnou hodnotu.

V simulaci je proto implementován mechanismus ochrany proti tomuto jevu, označovaný jako anti-windup. Tento mechanismus omezuje maximální hodnotu integrační složky a zabraňuje tak nekontrolovanému růstu integrátoru.

Integrace regulační odchylky je v diskrétním čase realizována vztahem:

$$I_k^i = I_{k-1} + e_k \Delta t \quad (11)$$

kde  $I_k^i$  představuje neomezenou hodnotu integrátoru. Tato hodnota je následně omezena na definovaný interval.

$$I_k = \text{sat}(I_k^i, -I_{max}, I_{max}) \quad (12)$$

kde  $\text{sat}(\cdot)$  označuje saturační funkci, která omezuje hodnotu vstupní proměnné na zadaný interval. Pokud hodnota překročí horní mez, je nastavena na tuto mez, a pokud klesne pod dolní mez, je nastavena na dolní mez. V opačném případě zůstává hodnota nezměněna.

Výsledná integrační složka regulátoru je pak dána vztahem:

$$u_i = K_i * I_k \quad (13)$$

## 5 Implementace simulačních modulů

Tato kapitola se zabývá implementací jednotlivých simulačních modulů, které tvoří hlavní funkční část navržené aplikace. Každý modul reprezentuje konkrétní dynamický systém nebo typ regulační úlohy a umožňuje studentům experimentovat s parametry regulátoru a sledovat odezvu systému v reálném čase.

Simulační moduly byly navrženy tak, aby pokrývaly různé typy systémů a regulačních problémů. Jejich cílem je demonstrovat základní principy teorie řízení prostřednictvím interaktivních experimentů. Studenti tak mohou pozorovat vliv parametrů regulátoru na chování systému, analyzovat dynamickou odezvu a lépe pochopit princip zpětné vazby.

Každý modul je implementován jako samostatná scéna v prostředí Unity. Tento přístup umožňuje moduly vyvíjet a testovat nezávisle na sobě a současně usnadňuje jejich případné rozšiřování. Jednotlivé moduly sdílejí společnou architekturu aplikace popsanou v předchozí kapitole, přičemž se liší zejména typem simulovaného systému a způsobem jeho vizualizace.

Z hlediska struktury obsahují všechny moduly několik společných částí:

- model dynamického systému, který popisuje chování simulovaného objektu,
- implementaci regulátoru, který na základě regulační odchylky vypočítává regulační zásah,
- mechanismus simulace, který zajišťuje výpočet systému v diskrétních časových krocích,
- uživatelské rozhraní, které umožňuje měnit parametry simulace a sledovat její průběh.

Přestože jednotlivé moduly vycházejí z podobné architektury, jejich implementace se liší podle typu simulovaného systému. Některé moduly využívají především fyzikální simulaci prostředí Unity, zatímco jiné pracují s matematickým modelem systému.

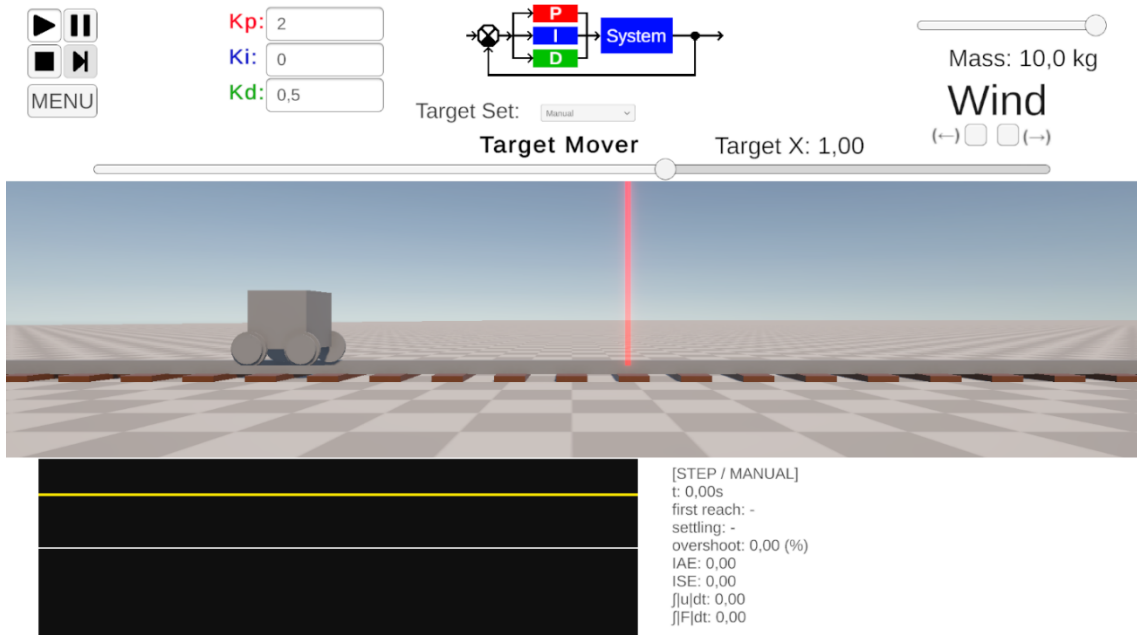
V následujících podkapitolách jsou jednotlivé moduly popsány podrobněji. U každého modulu je nejprve uveden matematický model simulovaného systému a následně způsob jeho implementace v prostředí Unity, včetně popisu uživatelského rozhraní a dostupných experimentů.

### 5.1 Modul 1 – Jet Cart

Tato kapitola popisuje první simulační modul aplikace, který slouží jako úvodní experimentální úloha pro demonstraci principů zpětnovazebního řízení. Modul simuluje pohyb hmotného bodu v jedné dimenzi a umožňuje studentům experimentovat s parametry PID regulátoru a sledovat dynamickou odezvu systému.

Simulovaný objekt je reprezentován tělesem s fyzikální komponentou rigidbody, jehož pohyb je omezen na osu X. Cílem regulace je přivést objekt do požadované polohy a udržet jej v její blízkosti. Student může během simulace měnit parametry regulátoru a sledovat vliv těchto změn na chování systému. Modul zároveň umožňuje simulovat poruchy působící na systém, například konstantní sílu reprezentující vítr.

Z didaktického hlediska je modul navržen jako jednoduchá laboratorní úloha, která studentům umožňuje pochopit základní principy regulace, jako je vliv jednotlivých složek PID regulátoru, překmit systému nebo ustálení odezvy.



Obr. 14 Modul 1 - Jet Cart

### 5.1.1 Matematický modul systému

Simulovaný systém představuje pohyb hmotného bodu v jedné dimenzi. Dynamika systému vychází ze základního vztahu druhého Newtonova zákona, podle něhož je výsledná síla působící na objekt rovna součinu jeho hmotnosti a zrychlení.

V ideálním případě bez tření lze dynamiku systému popsat rovnicí pohybu:

$$m\ddot{x} = F \quad (14)$$

kde

- $m$  je hmotnost objektu,
- $x$  je poloha objektu,
- $F$  je výsledná síla působící na objekt.

V simulaci je síla generována regulátorem na základě regulační odchylky mezi požadovanou polohou a aktuální polohou systému.

a) Přenosová funkce

Pro analýzu systému v oblasti řízení je vhodné vyjádřit jeho dynamiku pomocí přenosové funkce. Po aplikaci Laplaceovy transformace na rovnici pohybu dostaneme vztah:

$$ms^2X(s) = F(s) \quad (15)$$

kde

- $X(s)$  je Laplaceův obraz polohy,
- $F(s)$  je Laplaceův obraz síly.

Přenosovou funkci systému mezi vstupní silou a polohou lze tedy vyjádřit jako:

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2} \quad (16)$$

Tento model odpovídá ideálnímu systému bez tření. Dynamika systému je tedy druhého řádu a obsahuje dva integrátory. V otevřené smyčce je systém nestabilní, protože jakákoli konstantní síla způsobí neomezený růst polohy.

b) Poruchy působící na systém

Kromě regulační síly může na systém působit také porucha reprezentující vlivy prostředí. V simulaci je tato porucha modelována jako dodatečná síla působící na objekt.

$$F = F_u + F_d \quad (17)$$

kde

- $F_u$  je síla generovaná regulátorem,
- $F_d$  je poruchová síla reprezentující vítr.

Porucha může mít kladný nebo záporný směr a její velikost může uživatel měnit během simulace. Tento prvek umožňuje demonstrovat schopnost regulátoru kompenzovat vnější vlivy.

### 5.1.2 Matematický model uzavřené regulační smyčky

Uzavřená regulační smyčka modulu vychází z přenosové funkce řízené soustavy uvedené v kapitole 5.1.1 a z přenosu PID regulátoru popsaného v kapitole 4.8. Řízená soustava je tvořena hmotným bodem pohybujícím se v jedné dimenzi, jehož vstupem je síla a výstupem poloha. Regulátor vytváří akční zásah na základě regulační odchylky mezi požadovanou a skutečnou polohou.

Pro otevřenou smyčku tedy platí vztah:

$$L(s) = C(s)G(s) \quad (18)$$

kde

$G(s)$  je přenos řízené soustavy a  $C(s)$  je přenos PID regulátoru.

Přenosová funkce uzavřené regulační smyčky mezi žádanou polohou a skutečnou polohou má standardní tvar:

$$T(s) = \frac{X(s)}{R(s)}, d(t) = 0$$

$$T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (19)$$

Po dosazení přenosu soustavy z kapitoly 5.1.1 a přenosu PID regulátoru z kapitoly 4.8 lze uzavřenou smyčku zapsat ve tvaru:

$$T(s) = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) \frac{1}{ms^2}}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) \frac{1}{ms^2}} \quad (20)$$

Po algebraické úpravě dostaneme výsledný přenos uzavřené soustavy:

$$T(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{m s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i} \quad (21)$$

Z výsledného tvaru je patrné, že uzavřená soustava je při použití PID regulátoru soustavou třetího řádu. Jmenovatel přenosu určuje charakteristický polynom systému, a tedy i jeho dynamické vlastnosti, jako jsou stabilita, rychlost odezvy a míra překmitu. Změnou parametrů  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$  lze tyto vlastnosti ovlivňovat.

Je však nutné poznamenat, že v případě řízené soustavy obsahující integrační členy, například u systému typu dvojitého integrátoru, nemusí být integrační složka regulátoru nezbytná pro dosažení nulové ustálené odchylky při sledování žádané hodnoty. Na druhou stranu má integrační složka význam při potlačení poruch, kdy umožňuje eliminovat ustálenou regulační odchylku vzniklou vlivem vnějších vlivů nebo nepřesností modelu.

Vzhledem k tomu, že modul umožňuje také simulaci poruchové síly působící na objekt, je vhodné uvést i přenos mezi poruchou a výstupem systému. Pokud je porucha přičítána na vstupu soustavy stejně jako akční zásah regulátoru, pak přenos od poruchy k výstupu lze vyjádřit vztahem:

$$T_d(s) = \frac{X(s)}{D(s)}, r(t) = 0$$

$$T_d(s) = \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (22)$$

Po dosazení dostaneme:

$$T_d(s) = \frac{s}{m s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i} \quad (23)$$

Tento vztah ukazuje, jak uzavřená regulační smyčka potlačuje vliv poruchy na polohu objektu, neboť přenos poruchy na výstup je ovlivněn jmenovatelem  $1 + C(s)G(s)$ , jehož velikost roste se zesílením regulátoru, čímž dochází ke snížení vlivu poruchy na výstup systému. Právě schopnost kompenzace vnějších vlivů je jedním z hlavních didaktických přínosů tohoto modulu, protože umožňuje názorně demonstrovat význam jednotlivých složek PID regulátoru při stabilizaci systému.

Přestože je v samotné aplikaci regulátor implementován diskrétně, spojitý model uzavřené smyčky je vhodný pro teoretický popis systému a pro interpretaci jeho dynamického chování. Diskrétní realizace v prostředí Unity je pak praktickou aproximací tohoto modelu v numerické simulaci.

### 5.1.3 Implementace modulu

Simulační modul byl implementován v prostředí Unity jako samostatná scéna aplikace. Scéna obsahuje objekt reprezentující řízený systém, komponenty zajišťující výpočet regulace a uživatelské rozhraní umožňující interakci s parametry simulace.

Základním prvkem simulace je objekt reprezentující hmotný bod, jehož pohyb je omezen na jednu prostorovou osu. Tento objekt využívá fyzikální komponentu Rigidbody, která zajišťuje

výpočet pohybu na základě působících sil. Díky tomu je možné modelovat dynamiku systému pomocí fyzikálního engine prostředí Unity.

Řídicí logika modulu je implementována pomocí skriptů napsaných v jazyce C#. Hlavní skript připojený k objektu reprezentujícímu řízený systém zajišťuje výpočet regulačního zásahu a aplikaci výsledné síly na objekt. V každém kroku simulace je nejprve získána aktuální poloha objektu a vypočtena regulační odchylka vůči požadované hodnotě. Na základě této odchylky je pomocí PID regulátoru vypočten regulační zásah.

Výstup regulátoru je normalizovaná veličina, která je následně převedena na fyzikální sílu působící na objekt. Tato síla je aplikována prostřednictvím komponenty RigidBody. Velikost aplikované síly je omezena maximální hodnotou definovanou parametrem výkonu aktuátoru.

Součástí implementace je také model poruchy reprezentující vnější vlivy prostředí. Porucha je realizována jako dodatečná síla působící na objekt ve směru osy pohybu. Směr a velikost této síly mohou být během simulace měněny prostřednictvím uživatelského rozhraní.

Řízení průběhu simulace je zajištěno samostatným skriptem, který koordinuje jednotlivé kroky simulace. Tento skript umožňuje spouštět, pozastavovat a resetovat simulaci a současně zajišťuje správnou synchronizaci výpočtu regulace s fyzikální simulací. Simulace probíhá v diskrétních časových krocích, v nichž je postupně vypočten regulační zásah a aktualizován stav systému.

Pro potřeby výuky obsahuje modul také několik vizuálních prvků, které pomáhají studentům interpretovat chování systému. Mezi tyto prvky patří například indikátory směru působící síly nebo grafické znázornění regulační odchylky v čase. Tyto prvky umožňují studentům lépe pochopit dynamiku systému a vztah mezi regulační odchylkou a akčním zásahem regulátoru.

Díky využití fyzikálního engine prostředí Unity je možné simulovat chování systému v reálném čase a současně poskytovat uživateli okamžitou vizuální zpětnou vazbu. Tato kombinace matematického modelu a grafické reprezentace systému významně zvyšuje názornost simulace a podporuje experimentální charakter výuky.

#### 5.1.4 Uživatelské rozhraní

Součástí simulačního modulu je uživatelské rozhraní, které umožňuje studentům interaktivně měnit parametry simulace a sledovat dynamickou odezvu systému. Rozhraní je implementováno pomocí grafických prvků prostředí Unity a je umístěno ve formě panelu překrývajícího simulační scénu.

Hlavním cílem návrhu uživatelského rozhraní bylo vytvořit přehledné prostředí, které umožňuje snadnou manipulaci s parametry systému a současně poskytuje okamžitou vizuální zpětnou vazbu o průběhu simulace. Jednotlivé ovládací prvky jsou proto logicky seskupeny podle své funkce.

Uživatelské rozhraní obsahuje několik skupin nastavitelných parametrů, které ovlivňují chování simulovaného systému.

a) Parametry regulátoru

Základní skupinu parametrů tvoří parametry PID regulátoru. Tyto parametry určují dynamické vlastnosti regulační smyčky a umožňují studentům experimentovat s různými nastaveními regulace.

Mezi nastavitelné parametry patří:

- proporcionální zesílení
- integrační zesílení
- derivační zesílení

Hodnoty těchto parametrů lze zadávat prostřednictvím vstupních polí uživatelského rozhraní. Po změně hodnoty je regulátor okamžitě aktualizován a změna parametrů se projeví v chování systému během simulace.



Obr. 15 Modul 1 - Parametry regulátoru

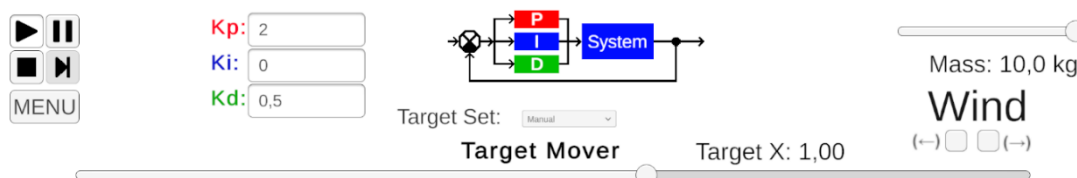
b) Parametry řízeného systému

Uživatelské rozhraní dále umožňuje měnit některé vlastnosti simulovaného systému. Tyto parametry ovlivňují dynamiku soustavy a umožňují demonstrovat vliv fyzikálních vlastností systému na chování regulační smyčky.

Mezi hlavní nastavitelné parametry patří:

- hmotnost simulovaného objektu,
- požadovaná poloha objektu.

Změnou těchto parametrů lze například demonstrovat, jak změna hmotnosti systému ovlivňuje rychlost odezvy nebo stabilitu regulačního obvodu. Požadovaná poloha objektu může být nastavena na „manual“, kde ji uživatel nastaví na konstantní hodnotu. Nebo může být nastavena na „sine“, což způsobí, že se cíl bude pohybovat ze strany na stranu. Při volbě této varianty lze nastavit i amplitudu a frekvenci tohoto pohybu.



Obr. 16 Modul 1 - Horní lišta

c) Nastavení poruch

Pro demonstraci schopnosti regulátoru kompenzovat vnější vlivy obsahuje modul také možnost simulace poruchy působící na systém. Tato porucha je reprezentována „větrem“, který působí silou na objekt ve směru jeho pohybu. Uživatel zde může měnit směr jeho působení.

Tento mechanismus umožňuje studentům sledovat, jak regulační smyčka reaguje na vnější vlivy a jak jednotlivé složky PID regulátoru přispívají k potlačení poruch.

d) Režim simulace

Uživatelské rozhraní obsahuje také ovládací prvky pro řízení průběhu simulace. Tyto prvky umožňují spouštět, pozastavovat nebo resetovat simulaci.

Dále je možné využít režim krokování simulace, který umožňuje provádět jednotlivé kroky výpočtu postupně. Tento režim je vhodný zejména pro výukové účely, protože umožňuje podrobně sledovat vývoj stavových veličin systému v jednotlivých časových krocích

Režim krokování simulace je v aplikaci aktivován pozastavením běhu simulace, pomocí tlačítka „Pause“ v uživatelském rozhraní. V tomto stavu není simulace automaticky vykonávána a její další průběh je plně řízen uživatelem.

Jednotlivé kroky simulace lze následně provádět pomocí ovládacího prvku „Step“. Tlačítko „Step“ provede jeden diskretní krok simulace. Každým krokem dochází k výpočtu regulačního zásahu, aktualizaci stavových veličin systému a posunu simulace o jeden časový krok.

Tento způsob ovládání umožňuje uživateli detailně analyzovat chování systému v jednotlivých časových okamžicích a sledovat vliv jednotlivých složek regulátoru na vývoj systému.

e) Kritéria kvality regulace

Součástí uživatelského rozhraní jsou také metriky kvality regulace, které poskytují kvantitativní informaci o chování regulační smyčky. Tyto metriky umožňují objektivně hodnotit výsledky experimentů a porovnávat různé konfigurace regulátoru.

V simulaci jsou sledovány například následující ukazatele:

- relativní překmit systému,
- doba ustálení,
- rychlost odezvy
- Integrální kritérium absolutní chyby (IAE) [43]

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (24)$$

- Integrální kritérium kvadratické chyby (ISE) [43]

$$ISE = \int e(t)^2 dt \quad (25)$$

- RMS(e) – Efektivní hodnota [44]

$$RMS(e) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} \quad (26)$$

- $N$  – počet „vzorků“ chyby  $e$

- MAE – Průměrná absolutní chyba [45]

$$MEA = \frac{1}{t} \int |e(t)| dt \quad (27)$$

- $t$  – čas

- Peak  $|e(t)|$  – maximální absolutní chyba, která byla dosažena

- Poměr amplitud – poměr mezi amplitudou pohybu objektu a amplitudou pohybu cíle

$$Amp\ ratio = \frac{Amplituda(x)}{Amplituda(r)} \quad (28)$$

- $x$  – poloha objektu
- $r$  – poloha cíle
- Phase Lag – časový nebo fázový rozdíl, o který výstup systému zaostává za cílem

$$Phase\ Lag(^{\circ}) = 360 \cdot \frac{\Delta t}{t} \quad (29)$$

Tyto metriky jsou průběžně aktualizovány během simulace a zobrazovány v uživatelském rozhraní. Studenti tak mohou sledovat nejen vizuální průběh regulace, ale také numerické ukazatele popisující kvalitu řízení.

```
[STEP / MANUAL]
t: 0,00s
first reach: -
settling: -
overshoot: 0,00 (%)
IAE: 0,00
ISE: 0,00
```

**Obr. 17 Modul 1 - Metriky**

- f) Didaktický význam uživatelského rozhraní

Navržené uživatelské rozhraní hraje důležitou roli z hlediska výuky teorie řízení. Možnost interaktivně měnit parametry regulátoru a okamžitě sledovat důsledky těchto změn podporuje experimentální charakter výuky.

Studenti mohou pomocí simulace snadno ověřovat teoretické poznatky, například vliv jednotlivých složek PID regulátoru na stabilitu systému nebo schopnost regulátoru kompenzovat poruchy. Vizualizace dynamiky systému současně pomáhá lépe pochopit vztah mezi matematickým modelem a chováním reálného systému.

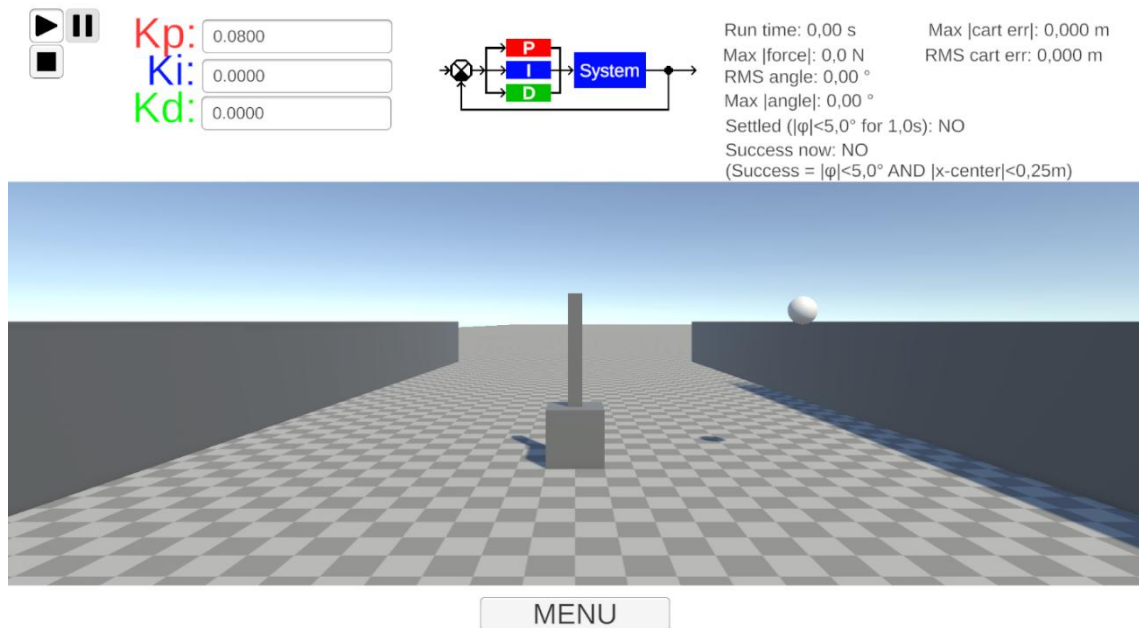
## 5.2 Modul 2 – Inverted Pendulum

Druhý simulační modul aplikace představuje klasickou úlohu řízení nestabilního systému – stabilizaci inverzního kyvadla. Tento problém patří mezi základní demonstrační úlohy v oblasti automatického řízení a je často využíván ve výuce pro ilustraci principů zpětnovazební regulace.

Simulovaný systém se skládá z vozíku pohybujícího se v horizontálním směru a tyče připojené k vozíku pomocí otočného kloubu. Cílem regulace je udržet tyč v nestabilní rovnovážné poloze ve svislé orientaci. Regulátor řídí horizontální pohyb vozíku tak, aby kompenzoval odchylky kyvadla od svislé polohy.

Z hlediska dynamiky se jedná o nelineární systém s nestabilní rovnovážnou polohou. I malé vychýlení kyvadla od svislé polohy vede bez regulace k jeho pádu. Stabilizace systému proto vyžaduje aktivní řízení založené na zpětné vazbě.

Simulační modul umožňuje studentům experimentovat s parametry regulátoru a sledovat dynamické chování systému. V průběhu simulace lze měnit parametry regulace a pozorovat vliv těchto změn na stabilitu systému.



Obr. 18 Modul 2 - Inverted Pendulum

### 5.2.1 Matematický modul systému

Stav systému lze popsat pomocí následujícího stavového vektoru [46]:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \quad (30)$$

kde

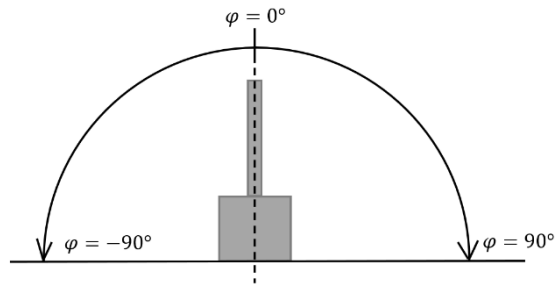
- $x$  představuje polohu vozíku,
- $\dot{x}$  je rychlost vozíku,
- $\varphi$  je úhel vychýlení tyče od svislé polohy,
- $\dot{\varphi}$  je úhlová rychlost kyvadla.

Vstupem systému je horizontální síla působící na vozík

$$u = F \quad (31)$$

která je generována regulátorem.

Úhel  $\varphi = 0$  odpovídá vzpřímené poloze kyvadla.



Obr. 19 Pendulum schéma

a) Parametry systému

Dynamika systému závisí na následujících fyzikálních parametrech:

$M$  — hmotnost vozíku

$m$  — hmotnost tyče

$l$  — vzdálenost mezi čepem a těžištěm tyče

$J$  — moment setrvačnosti tyče kolem jejího těžiště

$g$  — gravitační zrychlení.

Pro zjednodušení zápisu lze definovat pomocné konstanty [46].

$$A = J + ml^2 \quad (32)$$

$$B = ml \quad (33)$$

$$\Delta = J(M + m) - Mml^2 \quad (34)$$

Pro fyzikálně realizovatelné parametry musí platit  $\Delta > 0$ .

b) Linearizovaný model systému

Dynamika systému je obecně nelineární. Pro účely návrhu regulace je však model linearizován v okolí rovnovážné polohy, která odpovídá vzpřímené poloze kyvadla.

Po linearizaci lze rovnice pohybu vyjádřit ve tvaru [46]:

$$\ddot{x} = \frac{A}{\Delta}u - \frac{Bmgl}{\Delta}\varphi \quad (35)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{B}{\Delta}u - \frac{(M - m)mgl}{\Delta}\varphi \quad (36)$$

Tyto rovnice popisují dynamiku systému v okolí nestabilní rovnovážné polohy.

c) Stavový model systému

Linearizovaný model lze zapsat ve stavovém prostoru ve standardním tvaru

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (37)$$

kde stavový vektor je definován výše.

Matice systému mají tvar [46]:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Bmgl}{\Delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{(M+m)mgl}{\Delta} & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ A \\ \frac{A}{\Delta} \\ 0 \\ B \\ \frac{B}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (39)$$

d) Výstupní model

V simulaci jsou sledovány dvě veličiny: poloha vozíku a úhel kyvadla. Výstupní rovnice systému lze proto zapsat ve tvaru

$$y = \begin{bmatrix} x \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (40)$$

Což odpovídá vztahu [46]:

$$y = Cx + D\varphi \quad (41)$$

Kde

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

e) Model poruch

Pro demonstraci vlivu vnějších poruch je možné do modelu zahrnout také poruchovou sílu působící na vozík. Pokud porucha působí na systém stejným způsobem jako vstupní síla regulátoru, lze model rozšířit do tvaru

$$\dot{x} = Ax + Bu + Bd \quad (44)$$

kde

- $d(t)$  představuje poruchový vstup.

Tento model umožňuje analyzovat schopnost regulační smyčky potlačovat vnější poruchy a stabilizovat systém v nestabilní rovnovážné poloze.

f) Přenosová funkce „force-to-angle“

Přenosová funkce „force-to-angle“ popisuje vztah mezi vstupní silou působící na vozík  $u(t) = F(t)$  a výstupním úhlem kyvadla  $\varphi(t)$  pro linearizovaný model v okolí vzpřímené rovnovážné polohy ( $\varphi \approx 0$ ), při nulových počátečních podmínkách.

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{B}{\Delta s^2 - (M + m)mgl} \quad (45)$$

g) Přenosová funkce „Force-to-position“

Přenosová funkce „force-to-position“ popisuje vztah mezi vstupní silou působící na vozík  $u(t) = F(t)$  a výstupní polohou vozíku  $x(t)$  pro linearizovaný model v okolí vzpřímené rovnovážné polohy ( $\varphi \approx 0$ ), při nulových počátečních podmínkách

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{A\Delta s^2 - A(M + m)mgl - B^2mgl}{\Delta^2 s^4 - (M + m)mgl\Delta s^2} \quad (46)$$

## 5.2.2 Implementace modulu

Implementace modulu vychází z architektury aplikace popsané v kapitole 4.3 a z obecného principu implementace simulačních modulů uvedeného v kapitole 5.1.3. Tento modul rozšiřuje základní architekturu o model dynamického systému inverzního kyvadla.

Simulovaný systém je tvořen dvěma hlavními objekty: vozíkem a tyčí představující kyvadlo. Vozík je implementován jako fyzikální objekt s komponentou RigidBody, která umožňuje simulovat jeho pohyb v horizontálním směru na základě působících sil. Tyč je k vozíku připojena pomocí rotačního kloubu, který umožňuje její volnou rotaci kolem bodu uchycení.

Řídící logika modulu využívá stejnou implementaci PID regulátoru, která byla popsána v kapitole 4.8. Regulátor pracuje se stavovými veličinami systému, zejména s úhlem vychýlení kyvadla a jeho úhlovou rychlostí. Na základě těchto veličin je v každém kroku simulace vypočten regulační zásah.

Výstup regulátoru je převeden na horizontální sílu působící na vozík. Tato síla je aplikována prostřednictvím fyzikální komponenty vozíku. Regulátor tak nepřímo ovlivňuje dynamiku kyvadla změnou pohybu vozíku.

Simulace probíhá v diskretních časových krocích synchronizovaných s fyzikálním výpočtem prostředí Unity. V každém kroku je nejprve aktualizován stav systému, následně je vypočten regulační zásah a tento zásah je aplikován na vozík.

Na rozdíl od prvního modulu je zde regulovaný systém nestabilní. Bez aktivní regulace vede i malé vychýlení kyvadla od svislé polohy k jeho pádu. Implementace regulátoru proto musí zajistit dostatečně rychlou reakci systému, aby bylo možné tuto nestabilní rovnovážnou polohu stabilizovat.

Součástí implementace jsou také vizuální prvky zobrazující aktuální stav systému, zejména úhel vychýlení kyvadla a polohu vozíku. Tyto prvky umožňují uživateli intuitivně sledovat chování systému během simulace a analyzovat vliv parametrů regulátoru na stabilitu systému.

### 5.2.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní modulu vychází ze stejného návrhu rozhraní, který byl popsán v kapitole 5.1.4. Struktura ovládacích prvků je proto obdobná a umožňuje uživateli interaktivně měnit parametry simulace a sledovat průběh regulace v reálném čase. V tomto modulu jsou však některé prvky přizpůsobeny specifikům systému inverzního kyvadla.

Rozhraní obsahuje skupinu ovládacích prvků pro nastavení parametrů regulátoru. Tyto parametry odpovídají PID regulátoru popsanému v kapitole 4.8 a jejich význam je proto shodný jako v předchozím modulu. Změnou těchto parametrů může uživatel ovlivnit dynamiku regulace a stabilitu systému.

Součástí rozhraní jsou také ovládací prvky pro řízení průběhu simulace, které odpovídají funkcím popsaným v kapitole 5.1.4. Uživatel může simulaci spustit, pozastavit nebo resetovat. Reset simulace vrací systém do definovaného počátečního stavu.

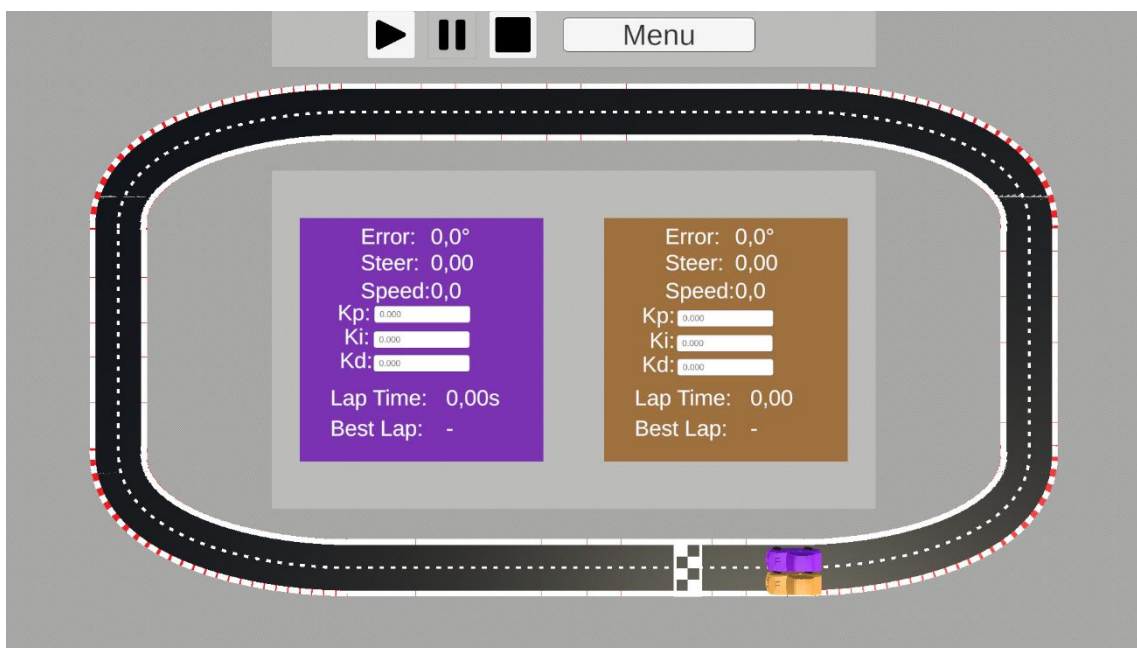
Pro lepší interpretaci chování systému obsahuje rozhraní také vizuální prvky zobrazující aktuální stav systému. Mezi hlavní sledované veličiny patří zejména úhel vychýlení kyvadla a poloha vozíku.

Vizualizace těchto veličin umožňuje uživateli sledovat stabilitu systému a reakci regulátoru na změny parametrů. Díky tomu je možné intuitivně pochopit dynamiku nestabilního systému a význam zpětnovazební regulace při jeho stabilizaci.

## 5.3 Modul 3 – Race Cars

Třetí simulační modul se zaměřuje na řízení směru vozidla pohybujícího se po předem definované trati. Cílem tohoto modulu je demonstrovat princip regulace rychlosti a vliv dynamiky vozidla na chování regulační smyčky.

Simulace umožňuje sledovat chování jednoho nebo více vozidel pohybujících se po trati. Student tak může pozorovat vliv parametrů regulátoru na dynamiku systému.



Obr. 20 Modul 3 - Race Cars

### 5.3.1 Matematický model systému

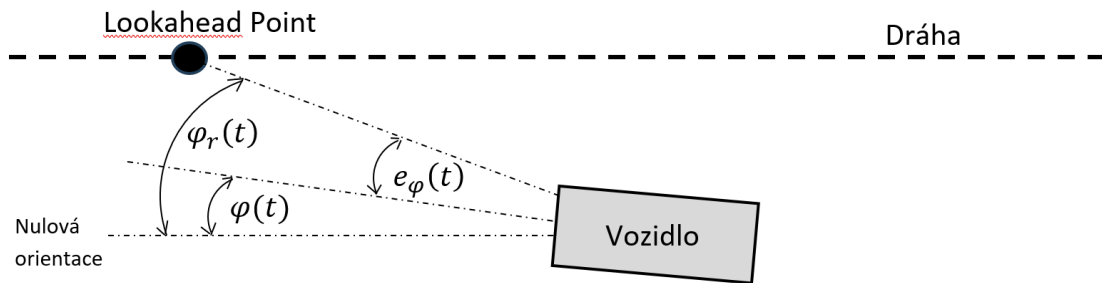
Pro vedení vozidla po trajektorii je v modulu využit princip „Pure Pursuit“, při kterém je na referenční dráze určen bod ležící ve zvolené vzdálenosti před vozidlem. Tento bod je označován jako „lookahead point“. Regulátor následně koriguje natočení kol tak, aby se vozidlo orientovalo směrem k tomuto bodu.

Regulovanou veličinou je v tomto případě úhlová odchylka mezi aktuálním směrem vozidla a směrem k lookahead bodu. Tuto veličinu lze vyjádřit jako

$$e_{\varphi}(t) = \varphi_r(t) - \varphi(t) \quad (47)$$

kde

- $e_{\varphi}(t)$  je úhlová odchylka,
- $\varphi_r(t)$  je požadovaný směr určený směrem k lookahead bodu,
- $\varphi(t)$  je aktuální orientace vozidla.



**Obr. 21 Race Cars schéma**

Akční zásah regulátoru představuje natočení říditelných kol vozidla

$$u(t) = \delta(t) \quad (48)$$

kde  $\delta(t)$  je řídicí zásah aplikovaný na mechanismus řízení.

Při předpokladu malých úhlových odchylek a přibližně konstantní dopředné rychlosti  $v$  lze změnu orientace vozidla aproximovat vztahem

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{v}{R} \delta(t) \quad (49)$$

kde  $L$  je rozvor vozidla. Po aplikaci Laplaceovy transformace dostaneme přenosovou funkci mezi natočením kol a úhlovou odchylkou ve tvaru

$$G(s) = \frac{v}{Rs}$$

Z uvedeného vztahu je patrné, že systém má integrační charakter. PID regulátor tak působí na systém prvního řádu, přičemž jeho cílem je eliminovat úhlovou odchylku a zajistit stabilní sledování trajektorie.

Je třeba zdůraznit, že uvedený model představuje zjednodušený popis dynamiky vozidla a nezahrnuje například vliv pneumatik, setrvačných účinků ani nelinearity řízení. Pro účely vytvořené simulace a didaktické demonstrace principu regulace je však tento model dostatečný.

V případě vypnutí regulátoru (nulové zesílení PID) vozidlo neprovádí korekci směru jízdy, což vede k postupnému zvětšování odchylky od požadované trajektorie.

### 5.3.2 Implementace modulu

Implementace modulu vychází z architektury aplikace popsané v kapitole 4.7 a z obecného principu implementace simulačních modulů uvedeného v kapitole 5.1.3.

V každém kroku simulace je nejprve určena aktuální orientace vozidla a vypočtena úhlová regulační odchylka mezi směrem vozidla a směrem k referenčnímu bodu. Tato odchylka představuje vstup do PID regulátoru.

Regulátor na základě této odchylky vypočítá akční zásah, který je interpretován jako natočení kol vozidla. Výstup PID regulátoru je tedy použit jako řídicí signál pro řízení.

Podélný pohyb vozidla je v modulu řízen samostatně pomocí konstantního nebo upravovaného plynu, přičemž v zatáčkách může docházet ke snížení rychlosti v závislosti na velikosti úhlové odchylky. Do tohoto již uživatel nezasahuje.

### 5.3.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní modulu vychází z návrhu popsaného v kapitole 5.1.4. Struktura rozhraní je proto obdobná jako u předchozích modulů, přičemž jednotlivé ovládací prvky jsou přizpůsobeny specifikům simulace vozidel.

Rozhraní umožňuje uživateli měnit parametry regulátoru a sledovat dynamiku systému během simulace. Uživatel může nastavovat parametry PID regulátoru.

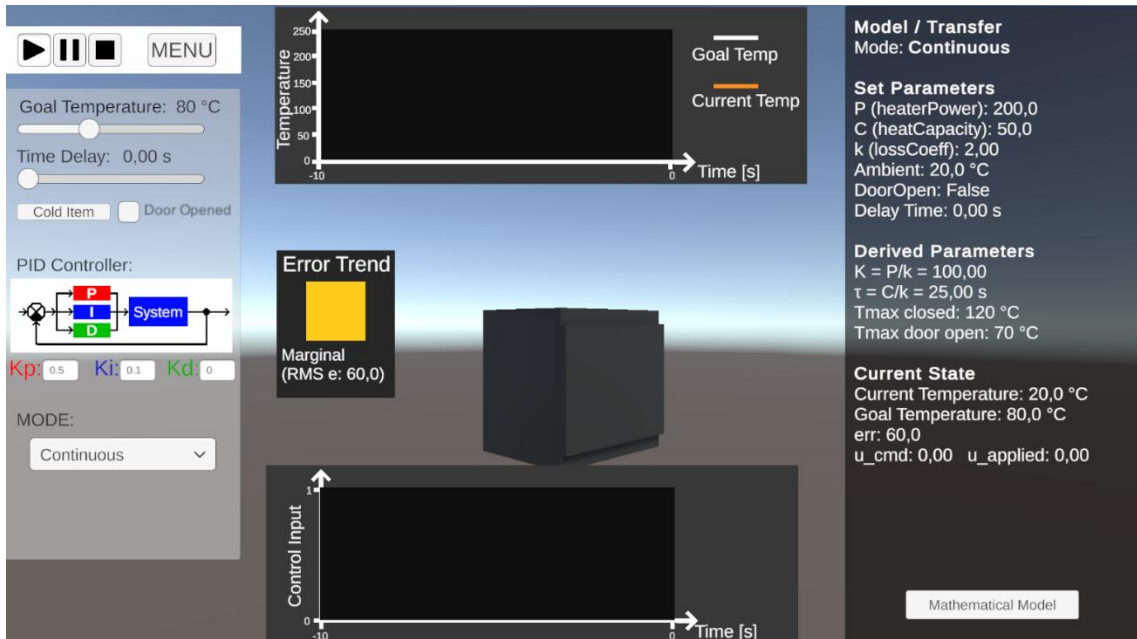
Součástí rozhraní jsou také vizuální prvky zobrazující aktuální rychlost a polohu vozidla na trati. Tyto prvky umožňují uživateli sledovat chování systému a analyzovat vliv změny parametrů regulátoru na dynamiku vozidla.

## 5.4 Modul 4 - Oven

Čtvrtý simulační modul je zaměřen na regulaci teploty v tepelném systému. Tento typ systému je typickým příkladem procesního řízení a často se používá při výuce regulace v průmyslových aplikacích.

Simulovaný systém představuje model pece, jejíž teplota je ovlivňována výkonem topného tělesa. Regulátor upravuje výkon ohřevu tak, aby bylo dosaženo požadované teploty.

Na rozdíl od předchozích modulů se jedná o systém s pomalou dynamikou, která je dána tepelnou kapacitou systému a tepelnými ztrátami do okolí. Tato dynamika je v matematickém modelu reprezentována systémem prvního řádu s časovou konstantou  $\tau$ . Modul navíc umožňuje uvažovat i dopravní zpoždění  $L$  mezi výstupem regulátoru a skutečným působením akční veličiny na systém. Toto zpoždění je v modelu reprezentováno exponenciálním členem  $e^{-Ls}$ .



Obr. 22 Module 4 - Oven

Simulace umožňuje studentům sledovat vliv parametrů regulátoru na dynamiku systému a analyzovat chování regulační smyčky při změnách požadované teploty nebo při působení poruch.

#### 5.4.1 Matematický model systému

Tepelný systém lze aproximovat jako dynamický systém prvního řádu, jehož stav je popsán aktuální teplotou pece.

Změna teploty systému závisí na dodávaném tepelném výkonu a na tepelných ztrátách do okolního prostředí. Zjednodušený model systému lze vyjádřit diferenciální rovnicí

$$C \frac{dT(t)}{dt} = P(t)u_{app}(t) - k(T(t) - T_{amb}) \quad (50)$$

kde

- $T(t)$  je teplota systému
- $P(t)$  je výkon topného tělesa
- $u_{app}$  je skutečně aplikovaná akční veličina
- $C$  je tepelná kapacita systému
- $k$  je koeficient tepelných ztrát
- $T_{amb}$  je teplota okolí (přímo v modulu označena jako *Ambient*).

Po úpravě lze model vyjádřit ve standardním tvaru systému prvního řádu.

Přenosová funkce mezi výkonem ohřevu a teplotou systému má tvar

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (51)$$

kde

- $K$  je statické zesílení systému

$$K = \frac{P}{k} \quad (52)$$

- $\tau$  je časová konstanta systému.

$$\tau = \frac{C}{k} \quad (53)$$

Tento model reprezentuje systém s pomalou dynamikou, kdy velikost časové konstanty  $\tau$  určuje rychlost odezvy systému na změnu vstupu.

V modulu je navíc uvažováno dopravní zpoždění mezi výstupem regulátoru a skutečným působením akční veličiny na systém. Toto zpoždění je v implementaci realizováno pomocí zpožďovacího bufferu, který uchovává předchozí hodnoty řídicího zásahu. Matematicky lze tuto vlastnost vyjádřit vztahem

$$u_{app}(t) = u(t - L) \quad (54)$$

kde  $L$  představuje dobu zpoždění.

V Laplaceově transformaci se toto zpoždění projeví jako exponenciální člen, takže výsledný přenos systému má tvar

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (55)$$

A pro uzavřenou smyčku má tvar

$$T_r(s) = \frac{C(s) \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}}{1 + C(s) \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}} \quad (56)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že systém kombinuje dvě odlišné vlastnosti: pomalou dynamiku reprezentovanou časovou konstantou  $\tau$  a dopravní zpoždění reprezentované parametrem  $L$ .

Regulace teploty je realizována pomocí PID regulátoru popsaného v kapitole 4.8.

Z uvedeného modelu je zřejmé, že dopravní zpoždění  $L$  má významný vliv na stabilitu regulační smyčky a může vést ke zhoršení regulačních vlastností, zejména ke zvýšení překmitu nebo vzniku oscilací. Tento jev je jedním z hlavních didaktických přínosů modulu.

#### 5.4.2 Implementace modulu

Implementace modulu vychází z architektury aplikace popsané v kapitole 4.8.5 a z obecného principu implementace simulačních modulů uvedeného v kapitole 5.1.3. V této kapitole jsou proto uvedeny pouze specifické aspekty implementace tepelného systému.

Simulace je realizována diskrétně, přičemž výpočet probíhá v jednotlivých časových krocích o délce  $\Delta t$ . V každém kroku je nejprve na základě aktuální regulační odchylky vypočten výstup PID regulátoru a následně je aktualizován stav systému numerickou integrací dynamického modelu (viz kapitola 5.4.1).

Regulátor generuje bezrozměrný řídicí signál  $u(t) \in \langle 0,1 \rangle$ , který reprezentuje relativní výkon topného tělesa. Tento signál však není vždy aplikován přímo na model systému. Modul umožňuje simulovat dopravní zpoždění mezi výstupem regulátoru a skutečným působením akční veličiny.

Zpoždění je v implementaci realizováno pomocí bufferu, který uchovává předchozí hodnoty řídicího zásahu. Velikost bufferu je určena na základě požadované doby zpoždění  $L$  a velikosti časového kroku  $\Delta t$  podle vztahu

$$N = \frac{L}{\Delta t} \quad (57)$$

kde  $N$  představuje počet vzorků odpovídajících danému zpoždění.

V každém kroku simulace je aktuální hodnota řídicího zásahu  $u(t)$  uložena do bufferu a současně je z bufferu odečtena hodnota odpovídající signálu  $u(t - L)$ , která je použita jako skutečně aplikovaná akční veličina  $u_{app}(t)$ . Tímto způsobem je realizováno diskrétní zpoždění signálu odpovídající dopravnímu zpoždění v reálném systému.

V případě, že zpoždění není aktivní ( $L \approx 0$ ), je akční veličina aplikována přímo bez zpoždění, tedy platí  $u_{app}(t) = u(t)$ .

V rámci modulu je možné přepínat mezi režimy označenými jako spojitý a diskrétní. Označení „spojitý režim“ však neznamená skutečně spojitou realizaci regulátoru, ale jeho diskrétní implementaci bez dodatečného vzorkování.

V obou režimech je regulátor implementován číslicově a jeho výpočet probíhá v každém kroku simulace s periodou  $\Delta t$  danou časovým krokem enginu Unity. Ve „spojitém“ režimu je tedy regulační zásah aktualizován v každém simulačním kroku, což odpovídá jemné diskrétní aproximaci spojitě regulace.

V diskrétním režimu je naproti tomu regulátor vyhodnocován pouze v násobcích vzorkovací periody  $T_s$ , přičemž mezi jednotlivými výpočty je jeho výstup držen konstantní. Tento princip odpovídá realizaci regulátoru se vzorkováním a následným držením hodnoty (Zero-Order Hold).

Z hlediska teorie řízení lze tedy oba režimy interpretovat jako číslicovou implementaci regulátoru, přičemž rozdíl spočívá v hustotě vzorkování. Spojitý režim představuje limitní případ s malou hodnotou  $\Delta t$ , zatímco diskrétní režim umožňuje explicitně studovat vliv vzorkovací periody na chování regulační smyčky.

Díky této implementaci je možné v rámci modulu analyzovat nejen vliv parametrů regulátoru, ale také vliv vzorkování a dopravního zpoždění na chování regulační smyčky.

### 5.4.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní modulu regulace teploty je navrženo jako hlavní prostředek interakce uživatele se simulací. Na rozdíl od předchozích modulů zde rozhraní neplní pouze ovládací

funkci, ale současně slouží jako informační a výukový panel, který propojuje matematický model systému, chování regulační smyčky a vizuální reprezentaci simulovaného procesu.

Rozhraní je rozděleno do několika logických částí. Levá část obrazovky obsahuje ovládací prvky simulace a nastavitelné parametry, střední část je věnována vizualizaci systému a průběhovým grafům a pravá část zobrazuje textové informace o matematickém modelu, parametrech soustavy a aktuálním stavu simulace. Toto uspořádání umožňuje současně měnit parametry, sledovat odezvu systému a interpretovat ji pomocí odvozených veličin.

#### a) Ovládání simulace

V levé horní části rozhraní se nachází základní ovládací prvky simulace. Ty umožňují spuštění, pozastavení a zastavení běhu modelu. Součástí této skupiny je také tlačítko návratu do hlavního menu aplikace. Tato část rozhraní plní stejnou funkci jako v předchozích modulech.

Možnost simulaci kdykoliv zastavit nebo znovu spustit je důležitá zejména při demonstraci vlivu dopravního zpoždění, změny parametrů PID regulátoru nebo působení poruchy. Uživatel tak může jednotlivé experimenty snadno opakovat a porovnávat výsledné průběhy.

#### b) Nastavení požadované teploty a poruch

Pod ovládacími tlačítky je umístěna část rozhraní sloužící k nastavení provozních podmínek systému. Prvním prvkem je posuvník požadované teploty, který určuje žádanou hodnotu regulované veličiny. Změna této hodnoty představuje základní vstup do regulační smyčky a umožňuje sledovat přechodovou odezvu systému na skokovou změnu žádané hodnoty.

Dalším prvkem je nastavení dopravního zpoždění. Tento parametr umožňuje modelovat situaci, kdy mezi výstupem regulátoru a skutečným působením akční veličiny na systém existuje časová prodleva. Z didaktického hlediska jde o velmi důležitý prvek, protože umožňuje názorně demonstrovat, jak zpoždění ovlivňuje stabilitu regulační smyčky, velikost překmitu a celkovou kvalitu regulace.

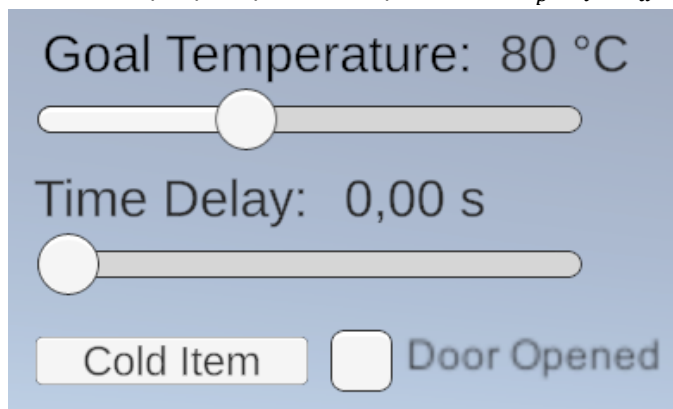
Součástí této části rozhraní je také tlačítko pro vložení chladného předmětu do pece. Tato funkce je implementována jako okamžitá změna stavové proměnné systému, tedy teploty  $T(t)$ . Při aktivaci dojde ke skokové změně teploty. Nejedná se tedy o poruchu ve formě dodatečného tepelného toku (výkonu), ale o přímý zásah do aktuálního stavu systému bez další dynamiky. Tento přístup přibližně odpovídá situaci, kdy do systému vstoupí objekt s nižší teplotou a způsobí okamžité ochlazení.

Velikost poklesu teploty je nastavena jako parametr simulace a reprezentuje efekt vložení předmětu o nižší teplotě, přičemž samotná teplota předmětu není v modelu explicitně uvažována. Jedná se tedy o zjednodušený model poruchy.

Vedle toho je k dispozici přepínač otevření dvířek pece. Otevření dvířek mění parametr modelu, konkrétně koeficient tepelných ztrát  $k$ , čímž dochází ke změně dynamiky systému. Tato porucha má trvalý charakter a ovlivňuje ustálený stav soustavy, což umožňuje demonstrovat schopnost regulátoru kompenzovat změny parametrů řízeného systému.

## c) Nastavení parametrů regulátoru

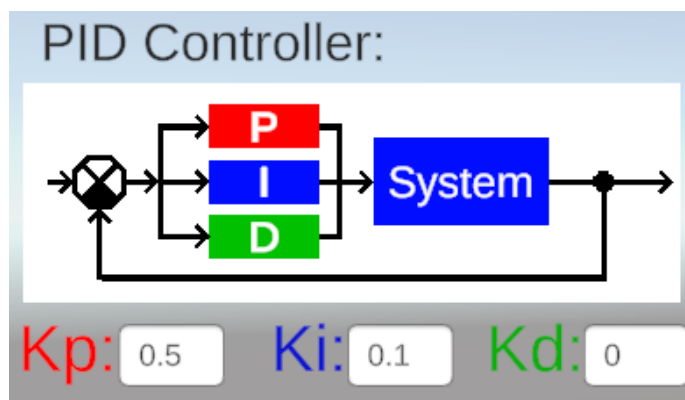
Další část levého panelu je věnována parametrům PID regulátoru. Je zde zobrazeno blokové schéma regulační smyčky, které názorně připomíná základní strukturu řízení. Pod tímto schématem jsou umístěna vstupní pole pro zadání parametrů  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$ .



Obr. 23 Modul 4 - nastavení teploty a poruch

Tato část rozhraní přímo navazuje na obecný popis PID regulátoru uvedený v kapitole 4.8. Její význam spočívá především v tom, že uživatel může okamžitě sledovat, jak změna jednotlivých parametrů ovlivní odezvu systému. Při změně proporcionální složky se projeví zejména rychlost reakce systému, při změně integrační složky schopnost odstranit ustálenou odchylku a při změně derivační složky míra tlumení a stabilizační efekt regulace.

Výuková hodnota této části rozhraní spočívá v přímém propojení teorie a experimentu. Student nepracuje pouze s abstraktními koeficienty, ale okamžitě vidí jejich vliv na časový průběh teploty a akční veličiny.



Obr. 24 Modul 4 - regulátor

## d) Volba režimu simulace

Ve spodní části levého panelu je umístěn přepínač režimu simulace. Modul umožňuje přepínat mezi spojitým a diskrétním režimem řízení. Tato funkce je z hlediska výuky velmi významná, protože umožňuje srovnání ideálního spojitého modelu s jeho diskrétní realizací.

V režimu spojitého řízení je systém interpretován pomocí spojitě přenosové funkce. V diskretním režimu se naopak uplatňuje vzorkování a princip zero-order hold, takže uživatel může sledovat rozdíl mezi spojitým a diskretním chováním akční veličiny. Přepínání mezi oběma režimy tak umožňuje názorně demonstrovat vliv digitalizace regulace na dynamiku systému.

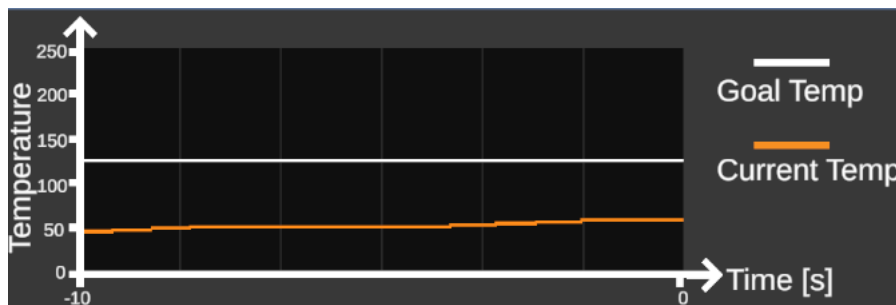


Obr. 25 Modul 4 - volba režimu

e) Horní graf – průběh teploty

V horní střední části obrazovky je umístěn graf zobrazující časový průběh teploty. Tento graf patří mezi nejdůležitější prvky rozhraní, protože přímo zobrazuje regulovanou veličinu a její vztah k požadované hodnotě. V grafu jsou současně zobrazeny dvě křivky: žádaná teplota a aktuální teplota systému.

Tento graf umožňuje sledovat klasické vlastnosti přechodové odezvy, jako jsou rychlost náběhu, překmit, ustálení nebo vliv poruch a zpoždění. Uživatel zde může přímo pozorovat, jak se systém



Obr. 26 Modul 4 - Horní graf

chová při změně požadované hodnoty, při otevření dveří nebo při vložení chladného předmětu. Graf tak představuje základní nástroj pro interpretaci dynamiky regulace.

f) Spodní graf – průběh řídicí veličiny

Ve spodní části obrazovky se nachází graf akční veličiny, tedy průběhu řídicího zásahu. Tento graf zobrazuje dvě hodnoty: výstup regulátoru a skutečně aplikovanou akční veličinu. Rozdíl mezi těmito dvěma veličinami je zvláště důležitý při aktivním dopravním zpoždění, kdy regulátor již generuje změnu akčního zásahu, ale systém ji ještě fyzicky nepřijal.

Tento graf má zásadní výukový význam, protože umožňuje studentům oddělit rozhodnutí regulátoru od reakce řízeného systému. V diskretním režimu je navíc možné pozorovat schodovitý charakter akční veličiny, který odpovídá vzorkované implementaci regulace. Právě tento prvek činí modul vhodným pro demonstraci rozdílu mezi spojitým a diskretním řízením.



Obr. 27 Modul 4 - Dolní graf

g) Indikátor „Error Trend“

V centrální části obrazovky je umístěn indikátor stavu regulace. Tento prvek zobrazuje aktuální kvalitu regulačního procesu pomocí barevného pole a textového popisu.

Indikátor „Error Trend“ nevyhodnocuje stabilitu ve striktním smyslu teorie řízení, ale pracuje s heuristickým kritériem založeným na efektivní hodnotě regulační odchylky v časovém okně. Pro každé časové okno je vypočtena RMS hodnota chyby

$$RMS_e = \sqrt{\frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} e_i^2} \quad (58)$$

kde  $N_k$  představuje počet vzorků v daném okně.

Následně je porovnána RMS hodnota aktuálního okna s hodnotou z předchozího okna pomocí poměru

$$\rho_k = \frac{RMS_e^k}{RMS_e^{k-1}} \quad (59)$$

Na základě této hodnoty je určen stav regulace:

- Stabilní -  $\rho_k < 0,95$
- Mezní -  $0,95 \leq \rho_k \leq 1,05$
- Nestabilní -  $\rho_k > 1,05$

Indikátor tedy vyjadřuje, zda RMS chyba v čase klesá, zůstává přibližně konstantní, nebo roste. Jeho účelem je poskytnout studentovi rychlou orientační informaci o trendu chování regulační smyčky. Nejedná se však o exaktní posouzení stability na základě půlů charakteristické rovnice nebo jiného formálního kritéria stability.



Obr. 28 Modul 4 - Indikátor "Error Trend"

h) Vizualizace pece

Ve střední části obrazovky je zobrazen samotný objekt pece. Tato část rozhraní plní především názornou a motivační funkci. Přestože nejde o hlavní zdroj analytických informací, vizuální model umožňuje intuitivně vnímat chování systému. Změna teploty může být spojena se změnou vzhledu pece, intenzitou žáru nebo dalšími vizuálními efekty.

Tato reprezentace pomáhá překlenout rozdíl mezi matematickým modelem a představou reálného fyzikálního systému. Student tak nevnímá simulaci pouze jako soubor grafů a rovnic, ale jako chování konkrétního technologického objektu.

i) Textový panel modelu a aktuálního stavu

Pravá část rozhraní obsahuje textový informační panel, který slouží jako průběžný souhrn matematického modelu a aktuálního stavu systému. Panel je rozdělen do několika částí. V horní části je zobrazen zvolený režim simulace a odpovídající tvar přenosové funkce. Pokud je aktivní spojitý režim, je zde uveden tvar spojitě přenosové funkce systému. V případě diskretního režimu je zobrazena odpovídající diskretní reprezentace.

Pod tímto údajem následuje výpis základních parametrů systému, mezi které patří maximální topný výkon, tepelná kapacita, koeficient tepelných ztrát, teplota okolí, stav otevření dveří a hodnota dopravního zpoždění. Tato část panelu poskytuje uživateli přehled o tom, v jakých podmínkách simulace právě probíhá.

Další část panelu obsahuje odvozené parametry systému. Zde jsou zobrazeny zejména statické zesílení a časová konstanta modelu, případně maximálně dosažitelná ustálená teplota za daných podmínek. Tato část je z didaktického hlediska velmi přínosná, protože propojuje vstupní fyzikální parametry modelu s vlastnostmi přenosové funkce.

Ve spodní části panelu je uveden aktuální stav systému, tedy současná teplota, požadovaná teplota, regulační odchylka a hodnoty akční veličiny. Tento souhrn umožňuje rychlou orientaci v právě probíhající simulaci a doplňuje informace z obou grafů.

**Model / Transfer**  
**Mode: Continuous**

**Continuous**  
 $G(s) = K / (\tau s + 1)$   
 $K = 100,00, \tau = 25,00 \text{ s}$

**Set Parameters**  
P (heaterPower): 200,0  
C (heatCapacity): 50,0  
k (lossCoeff): 2,00  
Ambient: 20,0 °C  
DoorOpen: False  
Delay Time: 0,00 s

**Derived Parameters**  
 $K = P/k = 100,00$   
 $\tau = C/k = 25,00 \text{ s}$   
Tmax closed: 120 °C  
Tmax door open: 70 °C

**Current State**  
Current Temperature: 55,7 °C  
Goal Temperature: 80,0 °C  
err: 24,3  
u\_cmd: 1,00 u\_applied: 1,00

Obr. 29 Modul 4 - textový panel

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a implementovat interaktivní simulační aplikaci určenou pro podporu výuky základních principů teorie řízení. Aplikace byla vytvořena v prostředí Unity, které umožňuje propojit matematické modely dynamických systémů s interaktivní vizualizací a uživatelským rozhraním.

V rámci práce byl nejprve analyzován význam výuky automatizace a teorie řízení v technických oborech a byly diskutovány současné přístupy k využívání simulačních nástrojů ve vzdělávání. Na základě této analýzy byla navržena struktura výukové aplikace obsahující několik samostatných simulačních modulů. Tyto moduly reprezentují různé typy dynamických systémů a umožňují studentům experimentovat s nastavením regulátoru a sledovat chování systému v reálném čase.

Součástí aplikace jsou čtyři simulační moduly zaměřené na různé typy regulačních úloh. Každý modul obsahuje matematický model řízené soustavy, implementaci regulační smyčky a uživatelské rozhraní umožňující interaktivní práci se simulací. Studenti mohou měnit parametry regulátoru, sledovat průběh regulační odchylky a analyzovat dynamickou odezvu systému.

Významnou součástí práce byla implementace PID regulátoru, který je využíván ve všech modulech aplikace. Tento regulátor představuje jeden z nejpoužívanějších typů regulátorů v průmyslové praxi a jeho implementace umožňuje studentům experimentálně ověřovat vliv jednotlivých složek regulátoru na stabilitu a kvalitu regulace.

Vytvořená aplikace poskytuje názorný nástroj pro demonstraci základních principů řízení dynamických systémů. Díky kombinaci matematického modelu, grafické vizualizace a interaktivního uživatelského rozhraní umožňuje studentům lépe porozumět vztahu mezi teorií regulace a praktickým chováním systémů.

Do budoucna je možné aplikaci dále rozšiřovat o další simulační moduly nebo pokročilejší regulační metody. Zajímavým směrem dalšího vývoje může být například implementace stavového řízení, adaptivních regulátorů nebo rozšíření aplikace o vzdělávací scénáře a automatické vyhodnocování experimentů.

Vytvořený simulační nástroj tak může představovat užitečný doplněk výuky automatizace a teorie řízení a přispět ke zvýšení názornosti a atraktivity technického vzdělávání.

## Seznam použité literatury

- [1] *Soubor:Regulacni smycka.svg* – *Wikipedie*. Webové sídlo. 2018. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Regulacni\\_smycka.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Regulacni_smycka.svg). [citováno 2026-03-31].
- [2] Wattův odstředivý regulátor. online. In: *Wikipedie*. 2021. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Watt%C5%AFv\\_odst%C5%99ediv%C3%BD\\_regul%C3%A1tor&oldid=20241305](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Watt%C5%AFv_odst%C5%99ediv%C3%BD_regul%C3%A1tor&oldid=20241305). [citováno 2026-03-31]. Page Version ID: 20241305.
- [3] KHAKI-SEDIGH, Ali. A Concise History of Control Systems: From Classical to Modern Control Era. In: Anonym. *Control Systems: A Historical and Philosophical Perspective: History and philosophy of control systems*, s. 61–88. Springer, 2025.
- [4] GOLDSMAN, David; Richard E. NANCE a James R. WILSON. A brief history of simulation revisited. online. 2010. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679129>.
- [5] MAGANA, Alejandra J. a Ton DE JONG. Modeling and simulation practices in engineering education. *Computer Applications in Engineering Education*, roč. 26 (2018), č. 4, s. 731–738. ISBN 1061-3773.
- [6] ROSSITER, Anthony; Atanas SERBEZOV; Antonio VISIOLI; Katarína ŽÁKOVÁ a Mikulas HUBA. A survey of international views on a first course in systems and control for engineering undergraduates. online. *IFAC Journal of Systems and Control*, roč. 13 (2020), s. 100092. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2020.100092>.
- [7] SERBEZOV, Atanas; K. ZAKOVA; A. VISIOLI; J. A. ROSSITER; B. DOUGLAS et al. Open access resources to support the first course in feedback, dynamics and control. *IFAC-PapersOnLine*, roč. 55 (2022), č. 17, s. 1–6. ISBN 2405-8963.
- [8] CAMPOS, Neila; María NOGAL; Cristina CALIZ a Angel JUAN. Simulation-based education involving online and on-campus models in different European universities. online. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, roč. 17 (2020). Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s41239-020-0181-y>.
- [9] ROSSITER, John Anthony. Future Trends for a First Course in Control Engineering. online. *Frontiers in Control Engineering*, roč. Volume 3-2022 (2022). Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fcteg.2022.956665>.
- [10] MATIŠÁK, Jakub a Katarina ZAKOVA. Online Tool for Creating Simple Models of Mechanical Systems. online. 11. 2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICETA.2018.8572249>.
- [11] BRINSON, James R. Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. online. *Computers & Education*, roč. 87 (2015), s. 218–237. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003>.
- [12] NEGAHBAN, Ashkan. Simulation in engineering education: The transition from physical experimentation to digital immersive simulated environments. online. *SIMULATION*, roč. 100 (2024), č. 7, s. 695–708. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/00375497241229757>.

- [13] KROUMOV, Valeri; K. SHIBAYAMA a A. INOUE. Interactive learning tools for enhancing the education in control systems. online. 12. 2003. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/FIE.2003.1263384>.
- [14] *How water-based clocks revolutionised the way we measure time | Aeon Videos*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://aeon.co/videos/how-water-based-clocks-revolutionised-the-way-we-measure-time>. [citováno 2025-12-22].
- [15] Differential analyser. online. In: *Wikipedia*. 2025. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Differential\\_analyser&oldid=1317209481](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Differential_analyser&oldid=1317209481). [citováno 2025-12-22]. Page Version ID: 1317209481.
- [16] ŽÁKOVÁ, Katarína; Jakub MATIŠÁK a Ján ŠEFČÍK. Contribution to PID and PIDA Interactive Educational Tools. online. *IFAC-PapersOnLine*, roč. 58 (2024), č. 7, s. 115–119. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.020>.
- [17] *Home Page | Resourcium*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://resourcium.org/>. [citováno 2026-03-25].
- [18] JANO, Miroslav a Katarína ZÁKOVÁ. SciLab Based Remote Control of Thermo-Optical Plant. online. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, roč. 7 (2011), č. 4, s. 10–15. Dostupné z: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v7i4.1783>.
- [19] DORMIDO, S.; Hector VARGAS a Jhonnatan SANCHEZ. AutomatL@bs Consortium: A Spanish Network of Web-Based Labs for Control Engineering Education. online. In: Anonym. *Internet Accessible Remote Laboratories: Scalable E-Learning Tools for Engineering and Science Disciplines*, s. 206–225. 2012. Dostupné z: <https://doi.org/10.4018/978-1-61350-186-3.ch011>.
- [20] MATIŠÁK, Jakub a Katarína ŽÁKOVÁ. 3D Visualization Methods in Online Control Experimentation. online. *IFAC-PapersOnLine*, roč. 53 (2020), č. 2, s. 17234–17239. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1762>.
- [21] BLÁHA, Marek a Katarína ŽÁKOVÁ. WebGL Presentation of Three Tank System. online. 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/KI48306.2020.9039872>.
- [22] ANDREJKO, Peter; Katarína ŽÁKOVÁ a Jakub MATIŠÁK. Educational Interactive Models for Control Courses. online. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/exp.at2358782.2023.10545797>.
- [23] MENEZES, Paulo; Fátima CHOUZAL; Diana URBANO a Teresa RESTIVO. *Augmented reality in engineering*. 2016. Springer.
- [24] *Laboratoř automatického řízení – Ústav přístrojové a řídicí techniky*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://control.fs.cvut.cz/cs/studenti/laboratore/laborator-automatickeho-řízení/>. [citováno 2025-12-22].
- [25] *Modelování a simulace I (RDO-A) [2024/2025]* ▪ FSI VUT v Brně. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.fme.vutbr.cz/studenti/predmety/277719>. [citováno 2025-12-22].
- [26] *Virtuální laboratoř TF*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://virtualab.tf.czu.cz/cs/r-17837-automatizace/obsah-uloh.html>. [citováno 2025-12-22].

- [27] *Laboratorní úloha „Kulička na elipse“ – Ústav přístrojové a řídicí techniky*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://control.fs.cvut.cz/cs/laboratore/laborator-automatickeho-řízení/laboratorni-uloha-kulicka-na-elipse/>. [citováno 2025-12-22].
- [28] *Virtuální laboratoř TF*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://virtualab.tf.czu.cz/cs/r-17837-automatizace/r-17839-sklenik/sklenik.html>. [citováno 2025-12-22].
- [29] *Virtuální laboratoř TF*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://virtualab.tf.czu.cz/cs/r-17837-automatizace/r-17841-kyvadlo/kyvadlo.html>. [citováno 2025-12-22].
- [30] REHUŠ, Lukáš. Návrh laboratorních úloh pro procesní regulátory. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*. 2022.
- [31] KALANDŘÍK, Michal. Modelování a regulace gyroskopu se třemi stupni volnosti. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*. 2022.
- [32] NÁČINÁK, Lukáš. Laboratorní soustava aktivního tlumení. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*. 2022.
- [33] GERLICH, Vladimír. Podpora cvičení předmětu "Teorie automatického řízení II". *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*. 2006.
- [34] MÜNZ, Ulrich; Peter SCHUMM a Frank ALLGÖWER. Educational Games in Control. online. *IFAC Proceedings Volumes*, roč. 41 (2008), č. 2, s. 12625–12630. Dostupné z: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02136>.
- [35] BUSTAMANTE-MORA, Ana; Mauricio DIÉGUEZ-REBOLLEDO; Yemsy HORMAZÁBAL; Yolanda VALDÉS a Rodrigo CADENA. Learning Models for Higher Education in Engineering: Motivation, Self-Determination, and the Role of Information and Communication Technologies. online. *Sustainability*, roč. 15 (2023), č. 17. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su151712869>.
- [36] MAYER, Richard E. Multimedia learning. online. In: Anonym. s. 85–139. *Psychology of Learning and Motivation*. Academic Press, 2002. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(02\)80005-6](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(02)80005-6).
- [37] VYGOTSKY, Lev S. *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard university press, 1978.
- [38] SWELLER, John; Jeroen JG VAN MERRIËNBOER a Fred PAAS. Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational psychology review*, roč. 31 (2019), č. 2, s. 261–292. ISBN 1040-726X.
- [39] NORMAN, Donald A. *Of everyday things*. New York City, NY, USA: *Doubleday*. 1988.
- [40] Unity: Develop, Deploy, and Grow | The World's Leading Game Engine. online. In: *Unity*. Dostupné z: <https://unity.com>. [citováno 2026-03-15].
- [41] PID regulátor. online. In: *Wikipedie*. 2025. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=PID\\_regul%C3%A1tor&oldid=25507715](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=PID_regul%C3%A1tor&oldid=25507715). [citováno 2026-03-15]. Page Version ID: 25507715.

- [42] ŠVARC, Ivan; Radomil MATOUŠEK; Miloš ŠEDA a Miluše VÍTEČKOVÁ. Automatické řízení. *Akademické nakladatelství CERM, sro Brno*. 2011.
- [43] *Číslicová regulace - katedra 352, VŠB - Technická univerzita Ostrava*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/data/kapitola7.html>. [citováno 2026-03-30].
- [44] *Charakteristické hodnoty online*. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/ped/jaro2007/Fy2BP\\_ENKA/um/efektHodnoty\\_proudu.pdf](https://is.muni.cz/el/ped/jaro2007/Fy2BP_ENKA/um/efektHodnoty_proudu.pdf). [citováno 2026-03-30].
- [45] *Střední absolutní chyba (MAE) | FlowHunt*. Webové sídlo. 2025. Dostupné z: <https://www.flowhunt.io/cs/slovník/mean-absolute-error-mae/>. [citováno 2026-03-30].
- [46] *Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Inverted Pendulum: System Modeling*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum&section=SystemModeling>. [citováno 2026-03-30].

## Přílohy

Příloha A: User\_Manual\_ISSAC – uživatelský manuál

Příloha B: Application\_ISSAC – Aplikace