

# **Návrh a realizace virtuální a vzdálené laboratoře pro výuku automatického řízení**

Design and Implementation of Virtual and Remote Laboratories  
Designed for Education of Automatic Control

**Michal Guldan**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Štěpán Ožana, Ph.D.

Ostrava, 2021

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací virtuální a vzdálené laboratoře pro výuku automatického řízení. Fyzikální model magnetické levitace MagnetoShield je popsán soustavou diferenciálních rovnic. Soustava diferenciálních rovnic a regulátor jsou namodelovány v prostředí Matlab. Ve virtuální laboratoři probíhá řízení modelu magnetické levitace a jeho vizualizace v Rexygen studio. Fyzikální model magnetické levitace MagnetoShield je ovládán ve vzdálené laboratoři v Rexygen Studio. Vizualizace je doplněna o kameru pro vzdálené sledování.

**Klíčová slova:** virtuální laboratoř, vzdálená laboratoř, magnetická levitace, Rexygen, MagnetoShield

## Abstract

This bachelor thesis deals with design and implementation of virtual and remote laboratories designed for education of automatic control. The physical model of magnetic levitation MagnetoShield is described by a set of differential equations. The system and controller are modeled in Matlab. In the virtual laboratory the magnetic levitation model is controlled and visualized in the Rexygen Studio. The physical model of magnetic levitation MagnetoShield is controlled in remote laboratory in Rexygen Studio. The visualization is complemented by the camera for remote monitoring.

**Keywords:** virtual laboratory, remote laboratory, magnetic levitation, Rexygen, MagnetoShield

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Štěpánovi Ožanovi, Ph.D. za poskytnuté rady a čas strávený konzultacemi.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	5
Seznam ilustrací .....	6
Seznam tabulek.....	8
<b>1 Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Teoretická část .....</b>	<b>10</b>
2.1 Princip automatického řízení.....	10
2.2 Použité HW prostředky .....	11
2.2.1 Arduino .....	11
2.2.2 Raspberry PI.....	11
2.2.3 MagnetoShield .....	12
2.3 Použité SW prostředky .....	14
2.3.1 Rexduino.....	14
2.3.2 Rxygen .....	15
2.3.3 RexHMI .....	15
2.3.4 Virtuální laboratoř .....	16
2.3.5 Vzdálená laboratoř .....	17
<b>3 Návrh a realizace virtuální laboratoře .....</b>	<b>18</b>
3.1 MIL simulátor.....	19
3.2 SIL simulátor .....	22
3.3 Vizualizace virtuální laboratoře .....	26
<b>4 Návrh a realizace vzdálené laboratoře .....</b>	<b>29</b>
4.1 Přenos signálu mezi Arduino a MagnetoShield.....	29
4.2 Přenos signálu mezi Raspberry PI a Arduino .....	30
4.3 Úprava signálu ze snímače skutečné výšky magnetu .....	31
4.4 Řízení reálného modelu.....	32
4.5 Zpracování signálu z Raspberry PI kamery .....	33
4.6 Vizualizace vzdálené laboratoře .....	33
4.7 Provedení vzdálené laboratoře .....	35
<b>5 Porovnání virtuální a vzdálené laboratoře.....</b>	<b>36</b>
<b>Závěr.....</b>	<b>37</b>
<b>Seznam literatury.....</b>	<b>38</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>40</b>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

A/D	–	Analogově digitální)
CSI	–	Camera serial interface
D/A	–	Digitálně analogový
FBD	–	Function block diagram
GPIO	–	General purpose input/output
HMI	–	Human machine interface
HTML	–	Hypertext Markup Language
HW	–	Hardware
I <sup>2</sup> C	–	Inter-integrated circuit
IP	–	Internet protocol
MIL	–	Model in loop
MIMO	–	Multiple input multiple output
PLC	–	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
RX	–	Receiver
SCL	–	Serial clock
SDA	–	Serial data
SIL	–	Software in loop
SW	–	Software
TRND	–	Real-time trend recording
TX	–	Transmitter
UART	–	Universal asynchronous receiver-transmitter
USB	–	Universal serial bus

## Seznam ilustrací

Obrázek 1: Řízení v otevřené smyčce.....	10
Obrázek 2: Řízení v uzavřené smyčce.....	10
Obrázek 3: Arduino Uno REV3 [7] .....	11
Obrázek 4: Raspberry PI 3 Model B+ [9] .....	12
Obrázek 5: Model MagnetoShield [2] .....	12
Obrázek 6: Funkcionalita zařízení MagnetoShield .....	13
Obrázek 7: Schéma zapojení MagnetoShield [2].....	14
Obrázek 8: Mechanický popis .....	14
Obrázek 9: Elektrický popis .....	14
Obrázek 10: Princip zařízení Rexduino [4].....	15
Obrázek 11: Příklad FBD kódu v TIA Portal.....	15
Obrázek 12: Příklad FBD kódu v Rexygen.....	15
Obrázek 13: Příklad virtuální laboratoře[17].....	16
Obrázek 14: Příklad vzdálené laboratoře[17].....	17
Obrázek 15: Regulační obvod systému magnetické levitace .....	19
Obrázek 16: Princip MIL simulace .....	20
Obrázek 17: Kompletní MIL simulátor.....	20
Obrázek 18: Blokové schéma regulované soustavy .....	21
Obrázek 19: Průběh žádané a skutečné výšky magnetu – MIL simulátor – autotune .....	21
Obrázek 20: Průběh žádané a skutečné výšky magnetu – MIL simulátoru-ruční regulátor .....	22
Obrázek 21: Princip Virtuální laboratoře.....	22
Obrázek 22: Regulovaná soustava v prostředí Rexygen – SIL simulátor .....	23
Obrázek 23: Kompletní SIL simulátor .....	23
Obrázek 24: Průběh žádané a skutečné výšky a akčního zásahu v SIL simulátoru – MIL regulátor.....	25
Obrázek 25: Průběh žádané a skutečné výšky a akčního zásahu v SIL simulátoru – ruční regulátor....	25
Obrázek 26: Přihlašovací obrazovka virtuální laboratoře .....	26
Obrázek 27: Úvodní obrazovka virtuální laboratoře .....	26
Obrázek 28: Obrazovka virtuální laboratoře pro nastavení regulátoru .....	27
Obrázek 29: Obrazovka virtuální laboratoře pro nastavení zdroje výšky magnetu .....	28
Obrázek 30: Obrazovka virtuální laboratoře pro zobrazování sledovaných veličin .....	28
Obrázek 31: Blokové schéma vzdálené laboratoře .....	29
Obrázek 32: Realizace přepočtu vstupního signálu v prostředí Rexygen [11] .....	30
Obrázek 33: Blokové schéma přenosu dat mezi Raspberry PI a Arduino .....	31
Obrázek 34: Úprava signálu ze snímače výšky .....	32
Obrázek 35: Řízení reálného modelu v prostředí Rexygen .....	32
Obrázek 36: Ověření řízení reálného modelu .....	33
Obrázek 37: Raspberry PI Camera module V2 .....	33
Obrázek 38: Úvodní obrazovka vzdálené laboratoře .....	34
Obrázek 39: Obrazovka vzdálené laboratoře pro nastavení regulátoru .....	34
Obrázek 40: Nastavení prvku Custom HTML.....	35
Obrázek 41: Zapojení vzdálené laboratoře .....	35

Obrázek 42: Porovnání funkce průběhů funkce sinus v obou laboratořích .....	36
Obrázek 43: Porovnání funkce průběhů funkce obdélník v obou laboratořích .....	36

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Možnosti zařízení REXduino.....	15
Tabulka 2: Konstanty fyzikálních veličin [2].....	20
Tabulka 3: Složky PID regulátoru pro MIL podle autotune .....	21
Tabulka 4: Složky PID regulátoru pro MIL – ruční nastavení.....	22
Tabulka 5: Složky regulátoru pro SIL podle MIL - autotune .....	24
Tabulka 6: Složky PID regulátoru pro SIL ruční nastavení .....	25
Tabulka 7: První byte MCP4725 .....	30
Tabulka 8: Druhý byte MCP4725.....	30
Tabulka 9: Třetí byte MCP4725 .....	30



# 1 Úvod

Dnešní svět se velmi rychle vyvíjí a jeho budoucnost je spojena s automatizací a s automatickým řízením procesů. Automatizace poskytuje průmyslovým podnikům nové příležitosti, jak rychle reagovat na individuální požadavky zákazníků.

Ve své bakalářské práci se zabývám návrhem a realizací virtuální a vzdálené laboratoře pro výuku automatického řízení. Důležitým prvkem je výběr soustavy, která je předmětem virtuálního i reálného zprovoznění. V mém případě je to fyzikální model magnetické levitace MagnetoShield vycházející z rodiny AutomationShield. Reálný model se skládá z horizontální trubičky, ve které je magnet. Nad trubičkou je cívka, která podle velikosti protékajícího proudu budí magnetické pole. Magnetické pole poté přitahuje magnet, který se vznáší v prostoru trubičky.

Bakalářská práce je členěna chronologicky, přesně tak, jak jsem na ní pracoval. Nejprve byla soustava popsána systémem nelineárních rovnic. Rovnice, včetně předřazeného regulátoru, jsem nechal vypočítávat v programu Matlab-Simulink. Toto je nazýváno jako MIL (model in loop) simulace. Výsledkem je grafický průběh skutečné výšky magnetu při skokové změně žádané výšky magnetu.

Dalším krokem bylo vytvoření řídicího a vizualizačního programu ve vývojovém prostředí REXYGEN pro řídicí počítač Raspberry PI, tedy vytvořením virtuální laboratoře. Tento způsob simulace je nazýván jako SIL (software in loop). Zde je skutečná soustava opět nahrazena jejím matematickým popisem. Pro nastavení regulátoru byly použity konstanty získané z předchozí simulace.

Finálním krokem je potom nahradit virtuální soustavu skutečným modelem a porovnat, zda odpovídají výsledky regulace výšky magnetu ve virtuálním a reálném modelu, tedy vytvořením vzdálené laboratoře. Řídicí počítač Raspberry PI v tomto případě komunikuje s mikropočítačem Arduino, který je spojen s fyzikálním modelem magnetické levitace. Systém je doplněn kamerou, pomocí níž lze ve vizualizaci sledovat skutečné vznášení magnetu. Všechny hardware prostředky jsem umístil a propojil na společnou desku tak, aby se daly snadno přenášet. Výsledky regulace jsou opět vidět na grafických průbězích přechodových charakteristik při použití různých zdrojů žádané výšky polohy magnetu.

Metody virtuálního zprovoznění nacházejí stále širší uplatnění i v průmyslové praxi. Pokud se podaří regulovanou soustavu dostatečně přesně matematicky popsat, potom může být dosaženo i poměrně vysoké shody mezi výsledkem virtuálního a reálného zprovoznění.

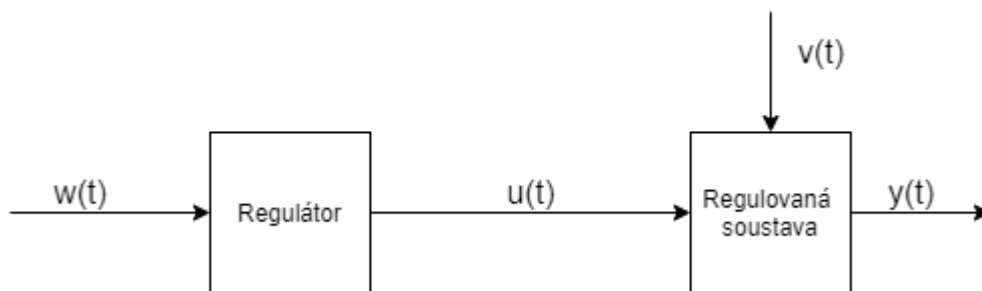
## 2 Teoretická část

### 2.1 Princip automatického řízení

Řízení je působení na objekt s cílem dosažení žádaného stavu. Pokud toto řízení probíhá automaticky, jedná se o automatické řízení. Regulované soustavy mohou mít jeden vstup a jeden výstup. Takové soustavy se nazývají SISO (Single Input, Single Output). Když mají více než jeden vstup a jeden výstup, nazýváme je MIMO (Multi Input, Multi Output). Soustava, která je popisována v této práci, je SISO. V systémech, které chceme automaticky řídit, se používají tyto veličiny:

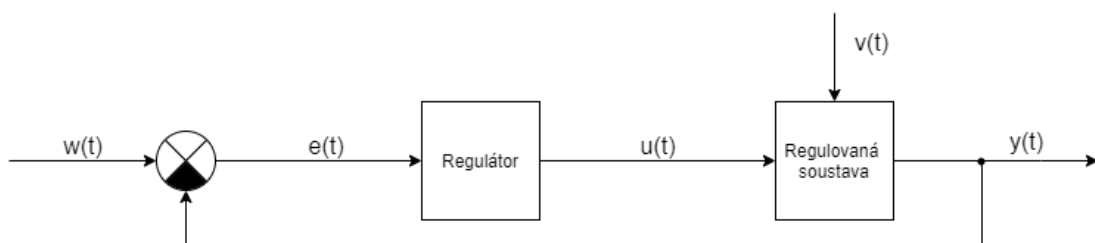
- Regulovaná veličina je výstupní veličina regulované soustavy.
- Řídicí veličina je žádaná hodnota a určuje velikost regulované veličiny.
- Regulační odchylka je rozdíl mezi žádanou a regulovanou veličinou.
- Akční veličina je výstupní veličina regulátoru a vstupní veličina regulované soustavy.
- Porucha je veličina, která působí na libovolném místě regulované soustavy.

Řízení v otevřené smyčce je řízení bez zpětné vazby. Tento proces nazývá ovládání. Skládá se z regulátoru a regulované soustavy. Žádost představuje veličina  $w(t)$ , výstupní veličina je označována jako  $y(t)$ . Výstupní veličinu lze měnit akčním zásahem  $u(t)$ . Tím, že systém nemá informace o výstupní veličině, je toto ovládání nepřesné.



Obrázek 1: Řízení v otevřené smyčce

Řízení v uzavřené smyčce je řízení se zpětnou vazbou. Řídicí veličina  $w(t)$  se porovnává s regulovanou veličinou  $y(t)$ . Rozdíl těchto hodnot ve formě regulační odchylky  $e(t)$  vstupuje do regulátoru. [18]



Obrázek 2: Řízení v uzavřené smyčce

Regulovaná veličina v této práci představuje skutečnou výšku, ve které se magnet pohybuje. V tomto případě je to rozsah 13 až 17 mm. Tento rozsah je dán technickým provedením fyzikálního modelu. Řídicí veličina je žádaná výška, ve které se má magnet pohybovat. Regulační odchylka je rozdíl

mezi skutečnou a žádanou výškou. Akční veličina je výstup regulátoru a představuje napětí, které je na cínce elektromagnetu. Porucha v tomto případě může být změna polohy celé soustavy. Cílem je, aby na základě rozdílu žádané výšky a skutečné výšky, regulátor vykonal takový akční zásah, aby udržel magnet v požadované výšce.

## 2.2 Použité HW prostředky

### 2.2.1 Arduino

Arduino je open-source elektronická platforma založena na použití jednoduchého hardware a software. Jednodeskový minipočítač Arduino je vybaven vstupně-výstupními digitálními a analogovými periferiemi. Řídící program načte stavy vstupních signálů, zpracuje je a zapíše na výstupy. V průběhu let se Arduino stalo mozkiem mnoha projektů, které pokrývají aplikace každodenního použití až po složité vědecké přístroje.

Pro tuto práci je zvoleno Arduino Uno REV3. Arduino Uno je deska mikrokontroléru založena na procesoru ATmega328P. Má 14 digitálně vstupně/výstupních pinů, 6 analogových vstupů, rozhraní USB, napájecí konektor, resetovací tlačítko. Jedná se o nejpoužívanější typ desky. Propojení s počítačem je realizováno přes USB port.[7][8]



Obrázek 3: Arduino Uno REV3 [7]

### 2.2.2 Raspberry PI

Raspberry PI je levný počítač velikosti platební karty, který se připojuje k monitoru nebo televizi a používá standardní klávesnici a myš. Zařízení slouží všem věkovým skupinám k prozkoumání výpočetní techniky a naučení se programovat v programovacích jazycích Scratch nebo Python. Raspberry PI je schopno dělat vše, co očekáváte od stolního počítače, od procházení internetových stránek, přehrávání videí ve vysokém rozlišení, vytváření tabulek až po zpracování textu a hraní her.

Pro tuto práci je vybrán typ Raspberry PI 3 Model B+. Tento model je nejnovější v řadě Raspberry PI 3. Model obsahuje 64bitový čtyřjádrový procesor běžící na frekvenci 1,4 GHz, dvoupásmové 2,4 GHz a 5 GHz bezdrátové LAN připojení, Bluetooth připojení, Ethernet připojení, GPIO piny. Model si zachovává stejné mechanické rozměry jako předchozí modely Raspberry PI 2 Model B a Raspberry PI 3 Model B. [9][10]

Raspberry PI je v této práci použito jako nadřazený řídicí počítač. Arduino poskytuje pro Raspberry PI vstupně-výstupní rozhraní. Vzájemná komunikace mezi oběma systémy je podrobněji popsána v kapitole 4.2 Přenos signálu mezi Raspberry PI a Arduino.



Obrázek 4: Raspberry Pi 3 Model B+ [9]

### 2.2.3 MagnetoShield

MagnetoShield vychází z rodiny AutomationShield. AutomationShield je open-source projekt zaměřený na vytváření hardware a software produktů pro výuku automatického řízení a mechatroniky. Hlavním cílem projektu jsou návrhy rozšiřujících modulů pro mikrokontroléry Arduino. Tato hardware rozšíření, která jsou známá jako shields, jsou experimentální systémy na desce plošných spojů (DPS). Ceny komerčních zařízení určených pro výuku automatického řízení se pohybují v cenách od desetitisíců až statisíců korun. To znamená vysoké pořizovací náklady pro vybavení laboratoří. I přes pořízení komerčních zařízení pak studenti nemohou plnohodnotně využívat vybraná zařízení a možnost realizace vlastních experimentů téměř neexistuje. Použití těchto levnějších zařízení je pro potřeby výuky velmi vhodné. [1]

Kromě modelu magnetické levitace (MagnetoShield) jsou nabízeny i jiné typy modelů určených pro výuku automatického řízení. Jsou to tyto modely:

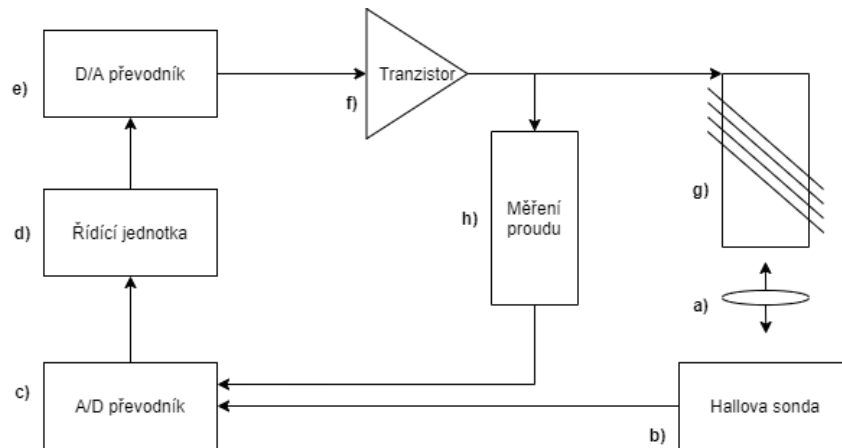
- HeatShield – model tepelného systému
- MotoShield – model regulace rychlosti a pozice
- OptoShield – model optické soustavy
- FloatShield – model vzduchové levitace.

Zařízení MagnetoShield (Obrázek 5) představuje velmi levnou variantu miniaturní magnetické levitace. Systém magnetické levitace je nelineární, v otevřené smyčce nestabilní a s rychlou dynamikou.



Obrázek 5: Model MagnetoShield [2]

Obrázek 6 znázorňuje funkcionalitu zařízení. Poloha levitujícího magnetu **a)** je snímána Hallovou sondou **b)**. Analogový napěťový signál ze snímače je převeden A/D převodníkem **c)** do řídicí jednotky **d)**. Hodnoty vypočítané v řídicí jednotce jsou převedeny D/A převodníkem **e)** na digitální napěťový signál. Tento signál projde do zesilovače, který je použit v podobě tranzistoru **f)**, a na cívku **g)**. Měření proudu **h)** slouží pro získání dalšího údaje pro dynamické procesy za účelem identifikace.

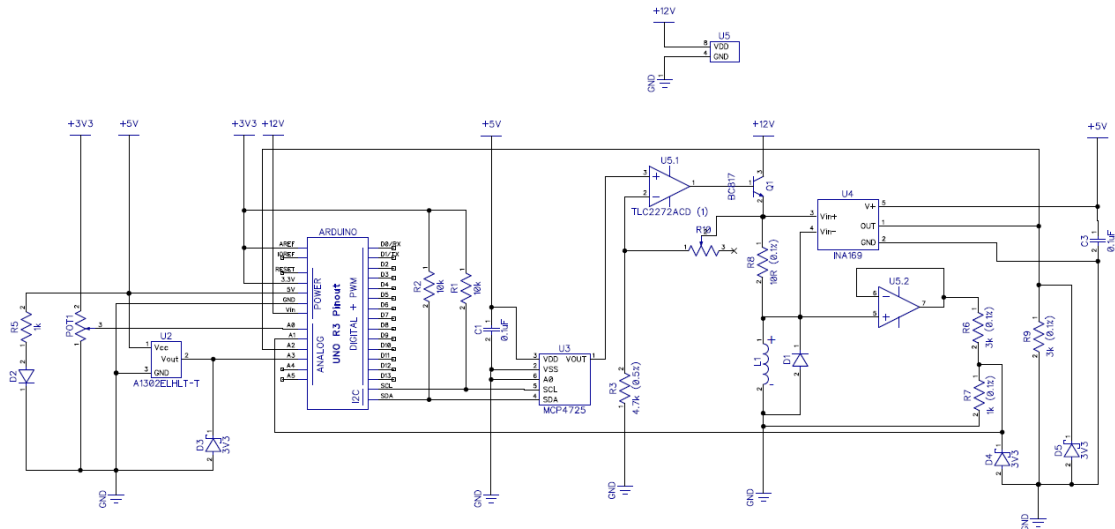


Obrázek 6: Funkcionalita zařízení MagnetoShield

Obrázek 7 popisuje princip činnosti zařízení. Signál z mikrokontroléru je připojen k 12bitovému D/A převodníku MCP4725 přes sběrnici I<sup>2</sup>C. Přes rezistory R1 a R2 má signál hodnotu 5 V. Napájecí napětí 12 V, které je použito z pinu VIN Arduino, slouží k napájení elektromagnetu. To znamená, že pro napájení elektromagnetu je použit síťový adaptér. Výstupní napětí z D/A převodníku je zesíleno pomocí operačního zesilovače TLC2272ACD. Tento obvod obsahuje dva zabudované operační zesilovače. Výstupní signál prvního operačního zesilovače je přiveden na NPN tranzistor BC817. Výška magnetu je snímána pomocí Hallovy sondy. Použitá sonda je zařízení Allegro MicrosystemsA1302KUA.

Tento model magnetické levitace je navržen tak, aby byl kompatibilní s deskami ARM-Cortex řady M, a proto se používá k ochraně analogových vstupů 3,3 V Zenerova dioda před přepětím. Hallova sonda je bipolární a je napájena 5 V, proto by náhodná výměna polarit magnetů mohla vést k přepětí na těchto zařízeních. Ostatní snímající obvody používají stejný typ Zenerových stabilizátorů. Výstup Hallovy sondy je připojen přímo na pin A13 Arduino, které obsahuje integrované periferie A/D převodu. Měření proudu je z hlediska regulace nepodstatná funkce, ale snímání proudu elektromagnetem může pomoci matematickému modelování a poskytnout údaje pro identifikaci. Elektromagnet je napájen přes přesný boční rezistor se známým odporem. Tento vstupní signál je zesílen pomocí měřiče proudu INA169 se zesílením nastaveným přesným rezistorem. Výstup tohoto zesilovače je přiveden do A/D převodníku Arduino, který je také chráněn Zenerovou diodou.

Jsou zde také další jednoduché pomocné obvody, které rozšiřují funkčnost MagnetoShield. Potenciometrem můžeme ručně upravovat trajektorii polohy magnetu. Signál z potenciometru je přiveden na pin A10 Arduino. Je zde obvod děliče napětí, který monitoruje napájecí napětí. Nakonec je zde LED, která signalizuje napájení desky.[2]



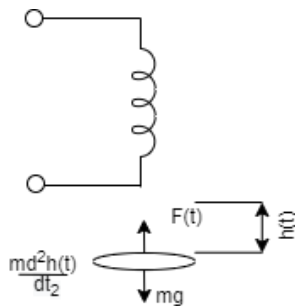
Obrázek 7: Schéma zapojení MagnetoShield [2]

Systém magnetické levitace lze popsat mechanickým pohledem a elektrickým pohled. První pohled popisuje fyzikální síly, které působí na magnet.

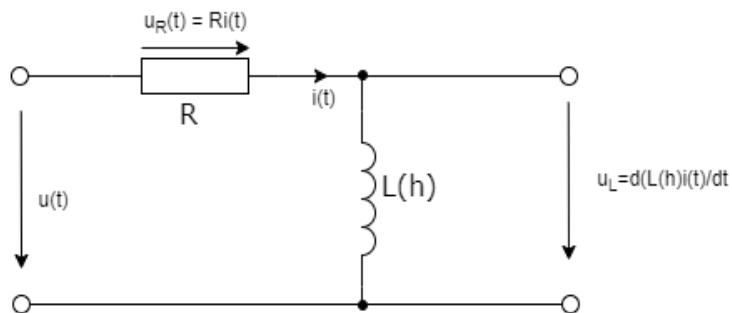
$$\frac{d^2h(t)}{dt^2} = g - \frac{K i(t)^2}{m h(t)^2} \quad (1)$$

Druhý pohled popisuje magnetickou levitaci jako sériový RL obvod.

$$u(t) = \frac{2K i(t)}{L h(t)^2} \frac{dh(t)}{dt} - \frac{R}{L} i(t) + \frac{1}{L} u(t) \quad (2)$$



Obrázek 8: Mechanický popis



Obrázek 9: Elektrický popis

## 2.3 Použité SW prostředky

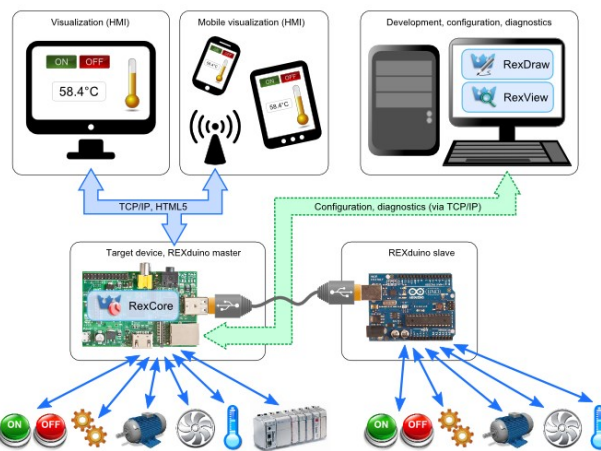
### 2.3.1 REXduino

Platforma REXduino se skládá z mikrokontroléru Arduino a minipočítače Raspberry PI s nainstalovaným řídicím systémem REX. Vzájemná spolupráce obou částí probíhá na komunikaci master/slave. Aby slave zařízení fungovalo správně, je nutné do něho nahrát speciální program, který zpracuje informace z master zařízení a posílá je zpět. Slave zařízení pracuje jako vstupně/výstupní

jednotka. Na master zařízení, v tomto případě Raspberry PI, běží runtime jádro RexCore. Zde je vykonáván uživatelský program. Platforma REXDuino přináší i možnost zapojení jiných zařízení než dvojice Raspberry PI a Arduino. Tabulka 1 uvádí i jiná možná zapojení.[4]

Tabulka 1: Možnosti zařízení REXduino

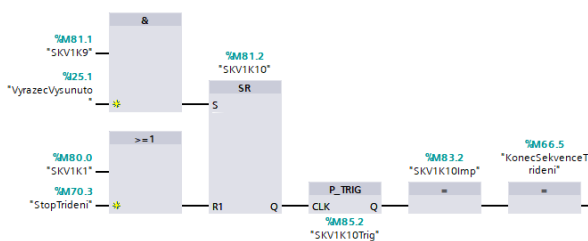
Master zařízení	Slave zařízení
PC	Raspberry PI
Raspberry PI	PC
Raspberry PI	Raspberry PI
PLC	Raspberry PI
Raspberry PI	PLC



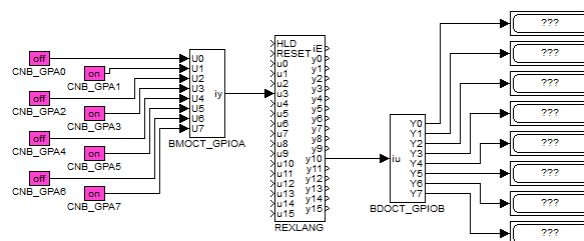
Obrázek 10: Princip zařízení REXduino [4]

### 2.3.2 REXygen

Řídicí program master zařízení je programován v prostředí REXygen studio, které je dále používáno ve všech typech navrhovaných laboratoří. Programování probíhá propojováním funkčních bloků. Tento způsob je velmi podobný programovacímu jazyku FBD u PLC nebo prostředí simulink. Knihovna REXygen studia obsahuje potřebné bloky pro vytvoření řídicího algoritmu.



Obrázek 11: Příklad FBD kódu v TIA Portal



Obrázek 12: Příklad FBD kódu v REXygen

### 2.3.3 RexHMI

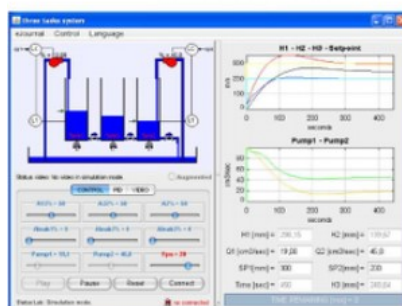
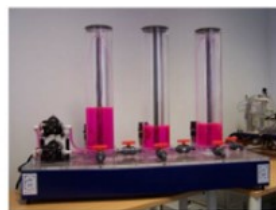
RexHmi je součástí programu REXygen a slouží pro tvorbu a pro vytváření HMI (Human Machine Interface) rozhraní. Na výběr jsou tři různé typy vizualizace:

- WebWatch je automaticky vygenerované HMI z REXYGEN studio během kompilace projektu. Má podobný vzhled, atributy a funkce jako watch mód v REXYGEN studiu. Toto HMI je ideální nástroj pro okamžité vytvoření vizualizace. Poskytuje také interakci téměř se všemi druhy signálů.
- REXYGEN HMI Designer vytváří standardní SVG soubor s rozšířeným HMI. REXYGEN HMI Designer je výborný nástroj pro vytvoření grafického HMI, které se používá jako operátorský panel nebo jako jiné koncové zařízení.
- WebBuDi označuje slova web, buttons a displays, česky tedy web, tlačítka a displeje. Je to jednoduchý JavaScript s několika deklarovanými bloky, které popisují datové body, ke kterým je HMI připojeno, a sestavují tabulku, ve které jsou prezentována všechna data. Toto HMI také poskytuje textovou interakci s vybranými signály a může sloužit jako záložní HMI pro nestandardní situace.

Všechny tyto metody vychází do podoby HTML5 webové stránky, která je poskytována webovým serverem REXYGEN. Rozhraní může být spuštěno na stolních počítačích, tabletech a také na mobilních telefonech. Doporučeným webovým prohlížečem je Google Chrome. HMI je založeno na HTML5, CSS3, JavaScript a WebSocket.[14] REXYGEN HMI Designer je zvolen pro tvorbu vizualizací v rámci této práce.

### 2.3.4 Virtuální laboratoř

Virtuální laboratoř je internetová nebo jiná software platforma určená pro interaktivní učení založeném na simulaci skutečných jevů. Ve virtuálních laboratořích jsou simulována dynamická chování daných systémů. Používají se v případě přípravy studentů na praktickou výuku nebo při nedostatku daného laboratorního vybavení. Na obrázku 13 je příklad virtuální laboratoře. Na příkladu může uživatel ovládat experiment soustavy tří nádrží. Uživatel může regulovat výšku hladiny v daných nádržích, měnit konstanty regulátoru apod. Změny zvolených parametrů se objeví v příslušných grafech a na panelu, který znázorňuje soustavu tří nádrží.[15][17]

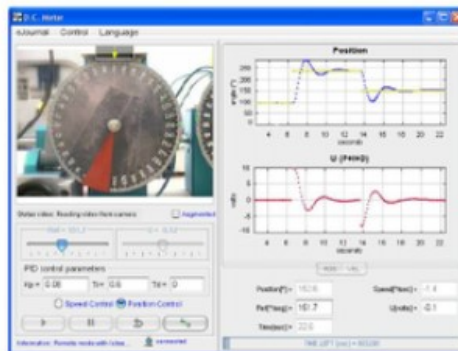
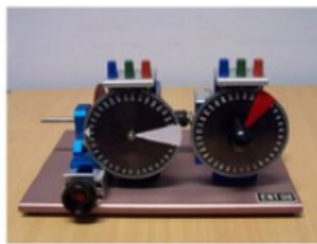


Obrázek 13: Příklad virtuální laboratoře[17]



### 2.3.5 Vzdálená laboratoř

Vzdálená laboratoř umožňuje uživatelům provádět experimenty a laboratorní úlohy přes internet bez toho, aby se uživatel nacházel u laboratorního zařízení. Vzdálená laboratoř poskytuje možnost monitorovat a provozovat experimentální zařízení, spravovat přístup do laboratoře tak, aby experiment byl používán najednou pouze jedním uživatelem. Prostřednictvím kamer, mikrofonů a dalších senzorů vzniká monitorování daného experimentu. Interakce uživatele s experimentem probíhá přes vstupně/výstupní jednotky, motory nebo jiné akční členy. Na obrázku 14 je příklad vzdálené laboratoře. Na příkladu může uživatel ovládat experiment stejnosměrného motoru. Uživatel může regulovat polohu motoru, rychlost motoru nebo měnit konstanty regulátoru apod. Změny zvolených parametrů se objeví v příslušných grafech a na rozdíl od virtuální laboratoře se ve vizualizaci zobrazí změny na skutečném modelu, který je snímán kamerou.[16][17]



Obrázek 14: Příklad vzdálené laboratoře[17]

### 3 Návrh a realizace virtuální laboratoře

Model dynamického systému je popsán pomocí matematického popisu využívajícího sadu diferenciálních rovnic, které přesně nebo alespoň dostatečně přesně aproximují dynamiku systému. Matematický model není pro daný systém jedinečný, a proto může být systém reprezentován mnoha různými způsoby. Dynamiku mnoha systémů lze popsat pomocí diferenciálních rovnic. Takové rovnice lze získat použitím fyzikálních zákonů, kterými se řídí konkrétní systém. Odvození přesného matematického modelu je nejdůležitější předpoklad pro úspěšnou simulaci systému.[19]

Simulace je definována jako proces vytváření modelu stávajícího nebo navrhovaného systému za účelem identifikace a porozumění faktorů, které řídí systém, nebo k předvídání budoucího chování systému. Existuje řada simulací téměř ze všech oborů. V praxi se můžeme také setkat se simulací řídicích systémů jako je např. PLC-Sim u řídicích systému Siemens nebo Automation Runtime Simulation u řídicích systémů B&R. Zde je simulace výrazně jednodušší, protože nemusíme vytvářet model soustavy, ale pouze ověřujeme chování řídicího algoritmu ve virtuálním prostředí simulátoru. Tato práce se zabývá simulací reálné soustavy magnetické levitace.

Prvním krokem návrhu virtuální laboratoře je simulace systému na základě jeho matematického popisu. Systém magnetické levitace je popsán třemi nelineárními stavovými rovnicemi, které vychází z mechanického a elektrického popisu. První rovnice popisuje polohu magnetu jako derivaci dráhy v čase.

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (3)$$

kde:

$x_1$  – Poloha magnetu [m]

$x_2$  – Rychlost magnetu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

Druhá rovnice popisuje rychlost pohybu magnetu jako derivaci rychlosti v čase.

$$\dot{x}_2(t) = g - \frac{K x_3(t)^2}{m x_1(t)^2} \quad (4)$$

kde:

$x_1$  – Poloha magnetu [m]

$x_3$  – Proud [A]

$g$  – Gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

$K$  – Konstanta magnetické síly [-]

$m$  – Hmotnost magnetu [kg]

Třetí rovnice popisuje proud, který protéká cívkou. Cívka vytvoří magnetické pole, pomocí kterého se začne magnet vznášet.

$$\dot{x}_3(t) = \frac{2K x_3(t)x_2(t)}{L x_1(t)^2} - \frac{R x_3(t)}{L} + \frac{1}{L}u_L(t) \quad (5)$$

kde:

$x_1$  – Poloha magnetu [m]

$x_2$  – Rychlost magnetu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

$x_3$  – Proud [A]

$K$  – Konstanta magnetické síly [-]

$R$  – Odpor cívky [ $\Omega$ ]

$L$  – Indukčnost cívky [H]

$u_L$  – Napětí na cívce [V]

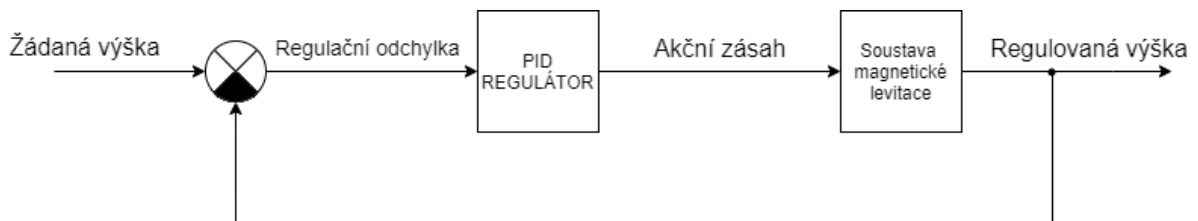
Stavové veličiny pro systém magnetické levitace jsou následující:

$$x_1(t) = h(t) \quad (6)$$

$$x_2(t) = \dot{h}(t) \quad (7)$$

$$x_3(t) = i(t) \quad (8)$$

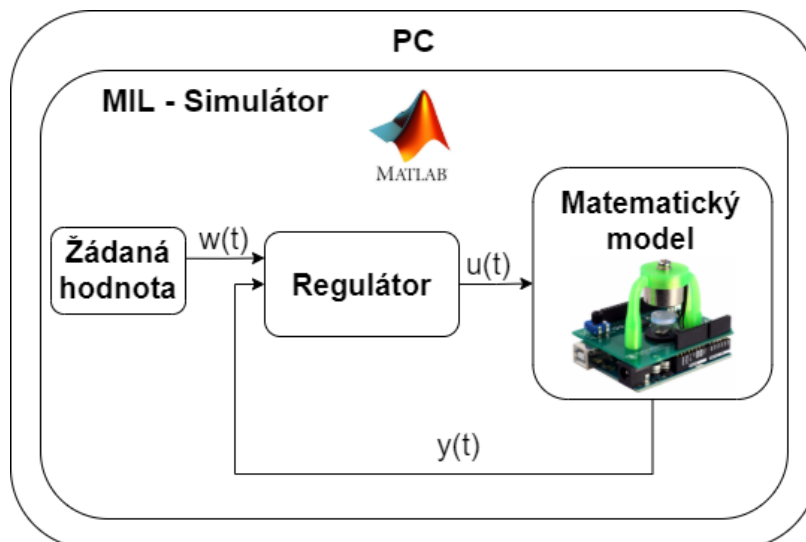
Na základě výše uvedených rovnic, které popisují systém magnetické levitace a příslušného schématu regulačního obvodu budou vytvořeny modely pro MIL simulátor a SIL simulátor. Obrázek 15 popisuje regulační obvod systému magnetické levitace.



Obrázek 15: Regulační obvod systému magnetické levitace

### 3.1 MIL simulátor

Model in loop (MIL) je typ simulace, kdy matematický model a řídicí systém jsou simulovány ve zvoleném simulačním prostředí na jednom počítači v definovaném čase. [5] Prostředí, ve kterém bude simulace probíhat je prostředí Matlab a jeho nadstavba simulink, která slouží k simulaci systémů.



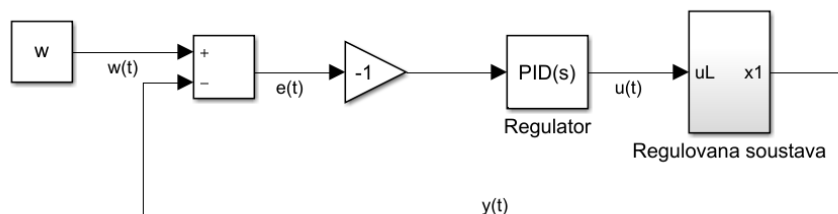
Obrázek 16: Princip MIL simulace

Podle rovnic (3), (4), (5) se vymodeluje soustava magnetické levitace. Pro namodelování soustavy jsou použity základní bloky pro matematické operace jako je součet, rozdíl, součin a podíl. Dále jsou zde použity bloky pro integraci stavových veličin. Konstanty fyzikálních veličin použitých ve výpočtech jsou zaznamenány v tabulce 2.

Tabulka 2: Konstanty fyzikálních veličin [2]

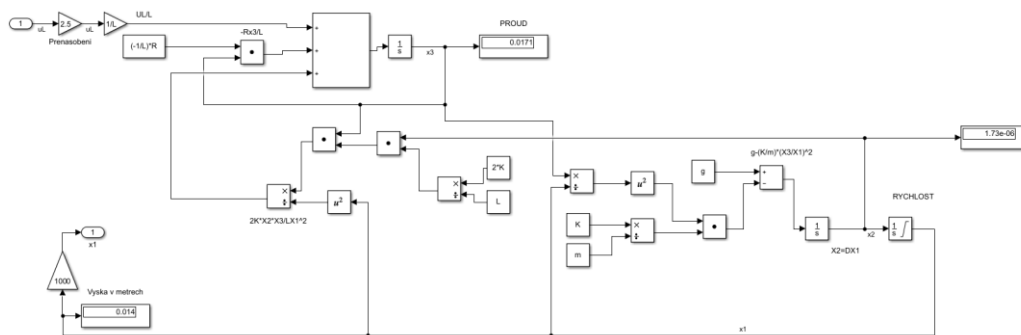
Konstanta	Hodnota	Jednotka
g	9.81	$m \cdot s^{-2}$
K	$5 \cdot 10^{-3}$	-
m	$0,76 \cdot 10^{-3}$	kg
L	0,239	H
R	198,3	
$h_0$	0,0136	m

Obrázky 17 a 18 popisují regulační vytvořený obvod v prostředí simulink. V bloku je změněna polarita regulační odchylky z toho důvodu, že v reálném modelu bude dolní hodnota výšky označena jako nejvyšší vzdálenost magnetu od cívky. A naopak horní hodnota výška je označena jako nejnižší vzdálenost magnetu od cívky. Toto se označuje jako reverzační mód regulátoru. Pro zvýšení přehlednosti je zde regulovaná soustava vytvořena jako vnořený blok v celém regulačním obvodu.



Obrázek 17: Kompletní MIL simulátor

Na obrázku 18 je detail regulované soustavy. Akční zásah vstupuje do soustavy a vynásobí se zesílením 2,5. Výstupem soustavy je regulovaná výška magnetu. Tato výška se pohybuje v rozsahu 13 až 17 mm. To se zajistí použitím saturace u výstupu z integrátoru.



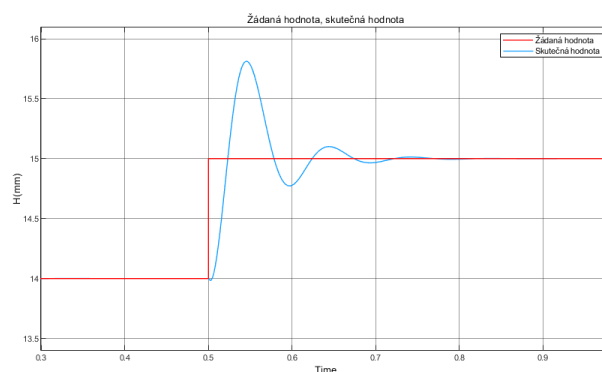
Obrázek 18: Blokové schéma regulované soustavy

Blok PID regulátoru v prostředí simulink obsahuje funkci autotune, která na základě regulačního obvodu navrhne optimální regulátor. Navrhnuté konstanty regulátoru jsou uvedené v tabulce 3.

Tabulka 3: Složky PID regulátoru pro MIL podle autotune

Složka	Hodnota složky
P	0,522
I	22,55
D	0,01

Obrázek 19 popisuje vykreslení žádané a skutečné výšky magnetu v prostředí simulink při použití automaticky navrhnutého PID regulátoru. Při zadání jednotkového skoku žádané hodnoty na výšku 14 mm se skutečná hodnota ustálí za 0,3 s. Skutečná hodnota výšky překmitne žádanou hodnotu výšky o 5 %.



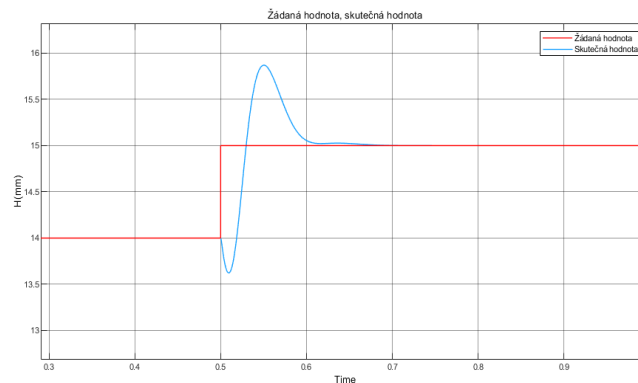
Obrázek 19: Průběh žádané a skutečné výšky magnetu – MIL simulátor – autotune

Přechodový děj PID regulátoru lze v prostředí simulink ručně upravit pomocí dvou vlastností. Jsou to čas odezvy a přechodné chování. Výsledkem jsou následující hodnoty uvedené v tabulce Složky PID regulátoru pro MIL – ruční nastavení.

Tabulka 4: Složky PID regulátoru pro MIL – ruční nastavení

Složka	Hodnota složky
P	0,7
I	19,73
D	0,012

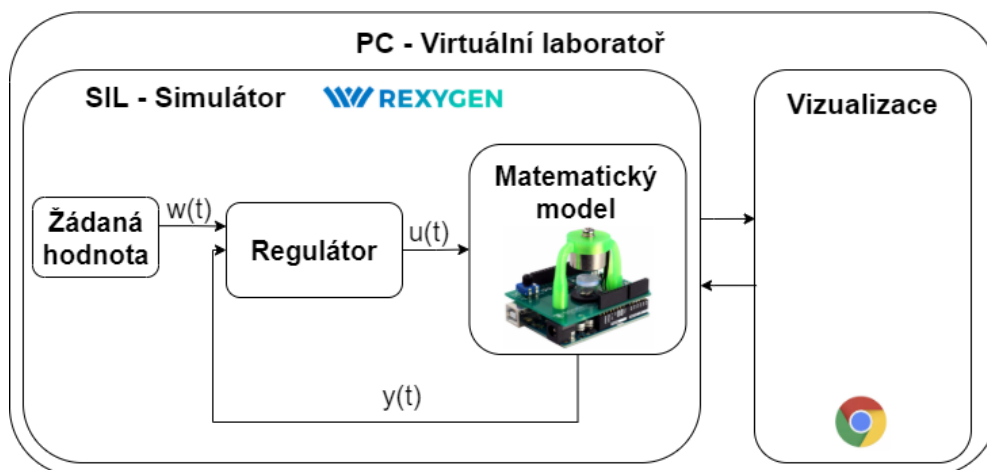
Obrázek 20 popisuje vykreslení žádané a skutečné výšky magnetu v prostředí simulink při použití ručně upraveného PID regulátoru. Při stejné žádané výšce je průběh skutečné výšky magnetu bez překmitu. Čas ustálení je stejný jako u automaticky navrženého regulátoru.



Obrázek 20: Průběh žádané a skutečné výšky magnetu – MIL simulátoru-ruční regulátor

### 3.2 SIL simulátor

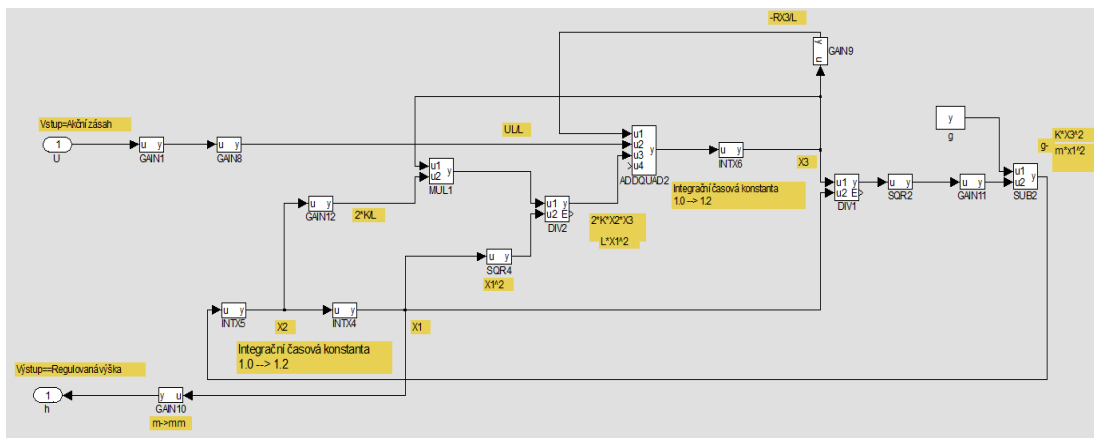
Software in loop (SIL) je typ simulace, kdy matematický model a řídicí systém běží v reálném čase na jednom počítači.[6] Simulace probíhá v prostředí REXYGEN Studio. Princip SIL simulátoru popisuje Obrázek 21. SIL simulátor obsahuje namodelovanou soustavu magnetické levitace a předřazený regulátor. Na základě SIL simulátoru je vytvořena virtuální laboratoř. Součástí virtuální laboratoře je i vizualizace, která je dále popsána v kapitole 3.3 Vizualizace virtuální laboratoře.



Obrázek 21: Princip Virtuální laboratoře

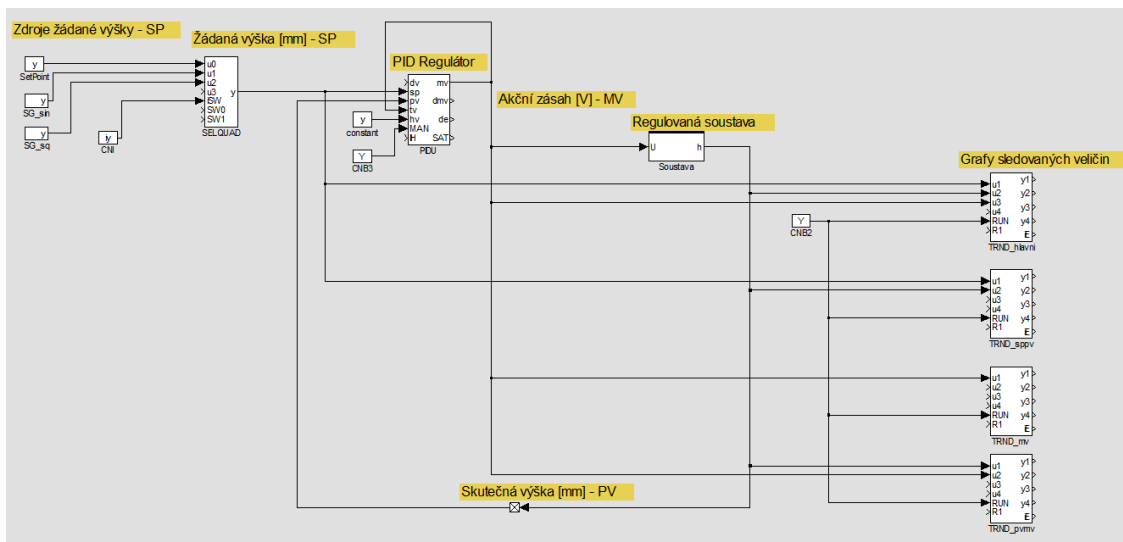
Pro zvýšení přehlednosti jsou zvýrazněny jednotlivé kroky výpočtu tak, aby byly zřejmé použité rovnice regulované soustavy. Konstanty fyzikálních veličin pro SIL simulátor jsou stejné jako pro MIL

simulátor v předchozím bodě. Vstupem regulované soustavy je akční zásah z regulátoru. Výstupem soustavy je skutečná výška magnetu vyjádřena v mm. Soustava je zapouzdřena do funkčního bloku. Tento funkční blok je pak vložen do SIL simulátoru.



Obrázek 22: Regulovaná soustava v prostředí REXYGEN – SIL simulátor

Blok PIDU je základní blok pro vytvoření úplného regulátoru. Oproti regulátoru v MIL simulaci je převrácení regulační odchylky možné realizovat přímo v bloku regulátoru povolením parametru RACT (reverse action). Simulace SIL se liší od simulace MIL přidáním bloku pro výběr signálu žádané výšky. Dále jsou zde přidány grafy pro sledování reálných průběhů. Záznam trendů v reálném čase se v prostředí REXYGEN realizuje funkcí TRND. Tato funkce umožňuje zobrazovat současně až 4 průběhy. Pro správné fungování simulace je změněna perioda vykonávání programu v prostředí REXYGEN. Výchozí perioda vykonávání programu 100 ms byla změněna na periodu 2 ms. Úloha tedy nebude vykonávána jako standardní úloha TASK, ale jako rychlá úloha QTASK.



Obrázek 23: Kompletní SIL simulátor

Použitý regulátor PIDU v prostředí REXYGEN nedisponuje funkcí autotune. Tato funkce je k dispozici až u regulátoru PIDMA, který je obsažen v jiné samostatně licencované verzi. Pro výchozí nastavení regulátoru jsou použity konstanty, které byly navrženy v MIL simulátoru funkcí autotune. Vztahy (9) a (10) uvádějí způsob výpočtu algoritmu regulátoru v prostředí simulink a v prostředí

Rexygen. Ze vztahů vyplývá, že integrační konstanta v prostředí simulink je umístěna ve vzorci v čitateli. Integrační složka u výpočtu regulátoru v prostředí Rexygen je umístěna ve vzorci ve jmenovateli. Integrační složka je proto v případě SIL simulátoru použita jako obrácená hodnota původní hodnoty integrační složky v MIL simulátoru.

Výpočet výstupu regulátoru v prostředí simulink počítá s integrační složkou v čitateli (9).

$$P \left( 1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right) \quad (9)$$

kde:

P – zesílení regulátoru

I – Integrační zesílení

D – Derivační zesílení

N – Filtr koeficientu

Výpočet výstupu regulátoru v prostředí Rexygen počítá s integrační složkou ve jmenovateli (10).

$$U(s) = \pm K \left\{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_i s} [W(s) - Y(s)] + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} [cW(s) - Y(s)] \right\} + Z(s) \quad (10)$$

kde:

U(s) – Laplaceova transformace řídicí veličiny

W(s) – Laplaceova transformace požadované hodnoty

Y(s) – Laplaceova transformace regulované veličiny

K – zesílení regulátoru

T<sub>i</sub> – Integrační časová konstanta

T<sub>d</sub> – Derivační časová konstanta

N – Parametr N filtru derivační složky

b – Váhový faktor pro proporcionální složku

c – Váhový faktor pro derivační složku

Hodnoty složek regulátoru pro simulaci SIL jsou uvedené v tabulce Složky regulátoru pro SIL podle MIL - autotune.

Tabulka 5: Složky regulátoru pro SIL podle MIL - autotune

Složka	Hodnota složky
P	0,7
I	19,73
D	0,012

Obrázek 24 znázorňuje průběh žádané a skutečné výšky a akčního zásahu s použitím konstant regulátoru z MIL simulace. Průběh signálu skutečné výšky není optimální.





Obrázek 24: Průběh žádané a skutečné výšky a akčního zásahu v SIL simulátoru – MIL regulátor

Při zadání jednotkového skoku žádané hodnoty se manuálním doladěním konstant dosáhlo průběhu skutečné výšky, který je téměř bez překmitu. Při použití sinusového signálu je průběh skutečné výšky ještě příznivější, protože signál žádané hodnoty se mění pozvolna. Nově nastavené konstanty regulátoru jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Složky PID regulátoru pro SIL ruční nastavení

Složka	Hodnota složky
P	1,05
I	0,17
D	0,0084

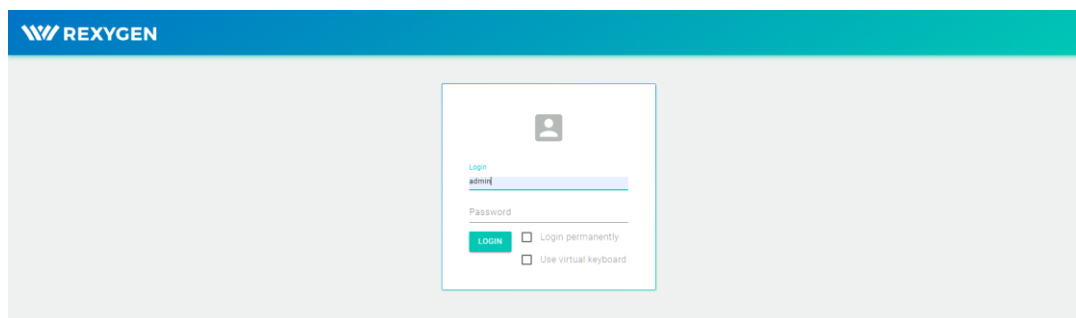
Obrázek 25 zobrazuje průběh s takto nastavenými konstantami regulátoru.



Obrázek 25: Průběh žádané a skutečné výšky a akčního zásahu v SIL simulátoru – ruční regulátor

### 3.3 Vizualizace virtuální laboratoře

Vizualizace virtuální laboratoře je vytvořena v prostředí REXYGEN HMI designer. Vizualizace je rozdělena na jednotlivé obrazovky, které se mezi sebou dají libovolně přepínat. REXYGEN HMI designer vygeneruje příslušné soubory ve formátu html. V REXYGEN studiu se do projektu přidá objekt HMI s odkazem na vygenerované soubory. Spuštění aplikace se provede zadáním lokální adresy a portu 8008 ve webovém prohlížeči. Přihlašovací login je výchozí – admin, bez hesla.



Obrázek 26: Přihlašovací obrazovka virtuální laboratoře

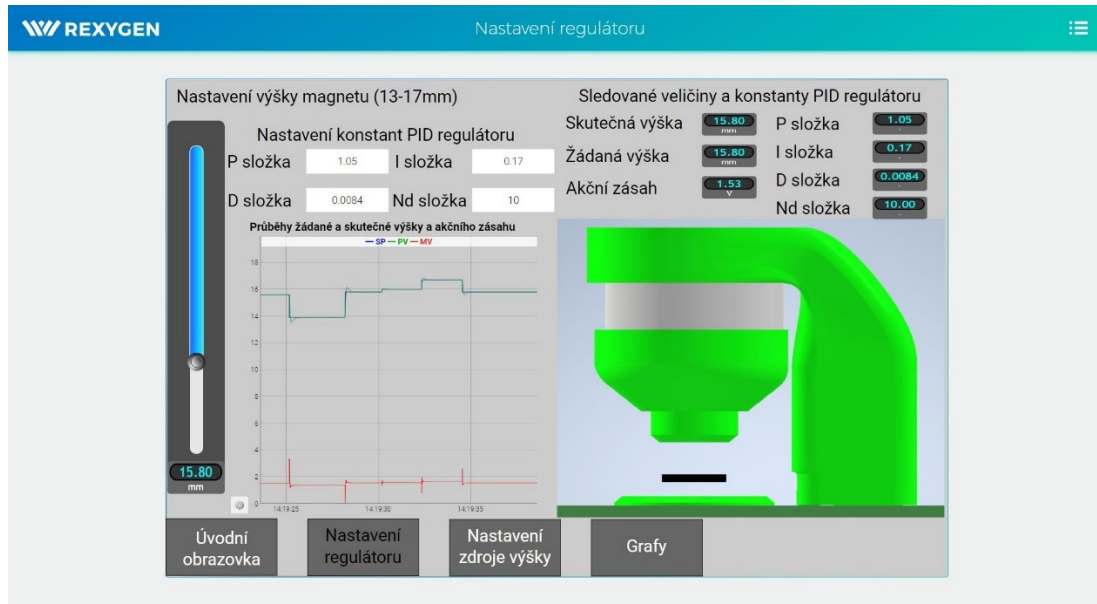
Po přihlášení se načte úvodní obrazovka virtuální laboratoře. V dolní části obrazovky jsou umístěna tlačítka, která slouží k přepínání mezi jednotlivými obrazovkami virtuální laboratoře. Tato tlačítka vyvolávají jednotlivé obrazovky virtuální laboratoře. Zadávací pole na všech obrazovkách mají bílý podklad a černý text. Prvky, které slouží jen pro zobrazení hodnot, mají černý podklad a modrý text.



Obrázek 27: Úvodní obrazovka virtuální laboratoře

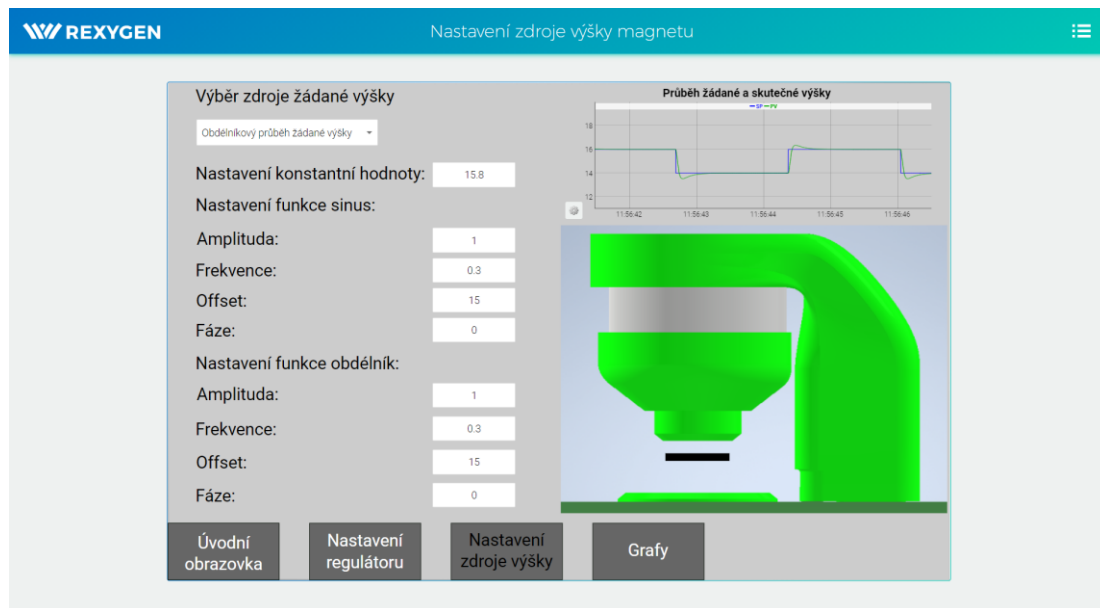
Na obrázku 28 je obrazovka je určená pro nastavení polohy simulace magnetu a nastavení parametrů PID regulátoru. V levé části obrazovky je umístěn vertikální posuvník, pomocí kterého se ručně nastaví žádaná výška magnetu pro simulaci. První způsob zobrazení výšky magnetu je graf. V grafu se zobrazuje průběh akčního zásahu, žádané výšky a skutečné výšky magnetu. Druhým způsobem zobrazení výšky magnetu je dynamický pohyb obdélníku, který je umístěn do obrázku

fyzikálního modelu magnetické levitace. Tento způsob zobrazení odpovídá reálnému zařízení. Vedle vertikálního posuvníku jsou 4 zadávací pole, kterými lze upravovat konstanty regulátoru. Záměrně zde nejsou nastavena omezení pro velikost zadaných hodnot. Nad modelem magnetické levitace jsou v číselné formě zobrazovány hodnoty sledovaných veličin a jednotlivé složky PID regulátoru.



Obrázek 28: Obrazovka virtuální laboratoře pro nastavení regulátoru

Obrazovka na obrázku 29 slouží ke změně zdroje žádané výšky magnetu pro simulaci. V levé části obrazovky je umístěno výběrové pole, které obsahuje prvky pro výběr zdroje žádané výšky. Na výběr jsou 3 varianty zdroje žádané výšky. První varianta je konstantní průběh žádané výšky v rozsahu 13 až 17 mm s přesností na jedno desetinné místo. Oproti předchozí obrazovce, kde se žádaná výška měnila vertikálním posuvníkem, se zde žádaná výška zadává číselně z klávesnice. Druhou variantou je sinusový průběh žádané výšky magnetu. Funkci sinus lze měnit tyto parametry: amplituda, frekvence, offset a fáze. Třetí variantou žádané výšky magnetu je obdélníkový průběh. Podobně jako u funkce sinus lze upravovat tyto parametry: amplituda, frekvence, offset a fáze. Zvolený zdroj výšky magnetu pro simulaci znázorňuje graf žádané a skutečné výšky. Zdroj výšky lze přepínat během používání aplikace. Na této obrazovce je také model magnetické levitace. Velikosti zadaných hodnot jednotlivých polí jsou v programu omezeny.



Obrázek 29: Obrazovka virtuální laboratoře pro nastavení zdroje výšky magnetu

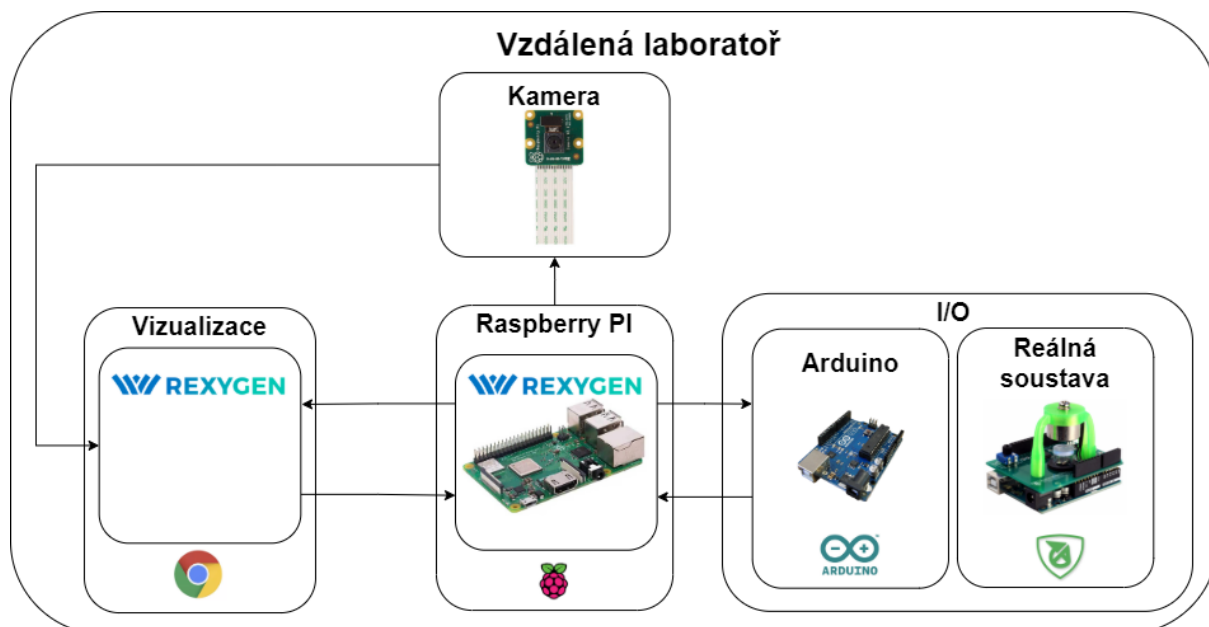
Na obrázku 30 je obrazovka s grafy, které obsahují všechny sledované veličiny regulace. Jsou to žádaná výška magnetu, skutečná výška magnetu a akční zásah.



Obrázek 30: Obrazovka virtuální laboratoře pro zobrazování sledovaných veličin

## 4 Návrh a realizace vzdálené laboratoře

Teoretický návrh soustavy a simulace v prostředí REXYGEN je dokončen ověřením funkčnosti na reálném zařízení. Blokové schéma vzdálené laboratoře v cílovém stavu je zřejmé z následujícího obrázku 31. Schéma je složeno z těchto použitých prvků: Raspberry PI, Arduino s reálnou soustavou, kamera a vizualizace.



Obrázek 31: Blokové schéma vzdálené laboratoře

Dále je popsána realizace laboratoře v jednotlivých krocích. Jsou to:

- Přenos signálu mezi Arduino a řídicí deskou MagnetoShield
- Přenos signálu mezi Raspberry PI a Arduino
- Úprava signálu ze snímače skutečné výšky magnetu
- Tvorba algoritmu pro řízení reálného modelu
- Zpracování signálu z Raspberry PI kamery
- Tvorba vizualizace.

### 4.1 Přenos signálu mezi Arduino a MagnetoShield

Model magnetické levitace MagnetoShield je vybaven na vstupu obvodem MCP4725, což je převodník digitálního signálu na sběrnici I<sup>2</sup>C na výstupní analogový signál. Analogovým signálem se dále budí magnet v modelu. Nutností použití tohoto převodu je to, že Arduino UNO nedisponuje analogovým výstupem, kterým by se dalo přímo řídit napětí na cívce.

I<sup>2</sup>C je sériová obousměrná dvou vodičová komunikační sběrnice s polovičním duplexem. Piny serial data (SDA) a serial clock (SCL) přenášejí informace mezi připojenými zařízeními po sběrnici. Každé zařízení je rozpoznáno podle unikátní adresy. Master je zařízení, které iniciuje přenos dat na sběrnici a generuje signál SCL, který synchronizuje přenos dat. Během přenosu dat mohou být kterákoliv zařízení považována za slave zařízení. [12] Převodník MCP4725 je 12bitový D/A převodník. Převodník pracuje jako slave zařízení. Adresa převodníku se skládá ze čtyř bitů (1100 – kód převodníku) a tři

adresových bitů (A2, A1, A0). Adresové piny A2 a A1 jsou fixně nastaveny na hodnotu 0. Stav pinu A0 se odvíjí podle zapojení převodníku. V tomto případě je zapojen na pin GND minipočítače Arduino. Poslední bit slouží pro zápis (stav 0) nebo čtení (stav 1).

Tabulka 7: První byte MCP4725

Kód zařízení				A2	A1	A0	R/W
1	1	0	0	0	0	0	0

Druhý a třetí byte převodníku slouží pro přenos dat. Převodník pracuje s hodnotami 0 až 4095, to je  $2^{12}$  hodnot, které se mohou objevit na výstupu převodníku. Poslední čtvrtý byte je prázdný.[13]

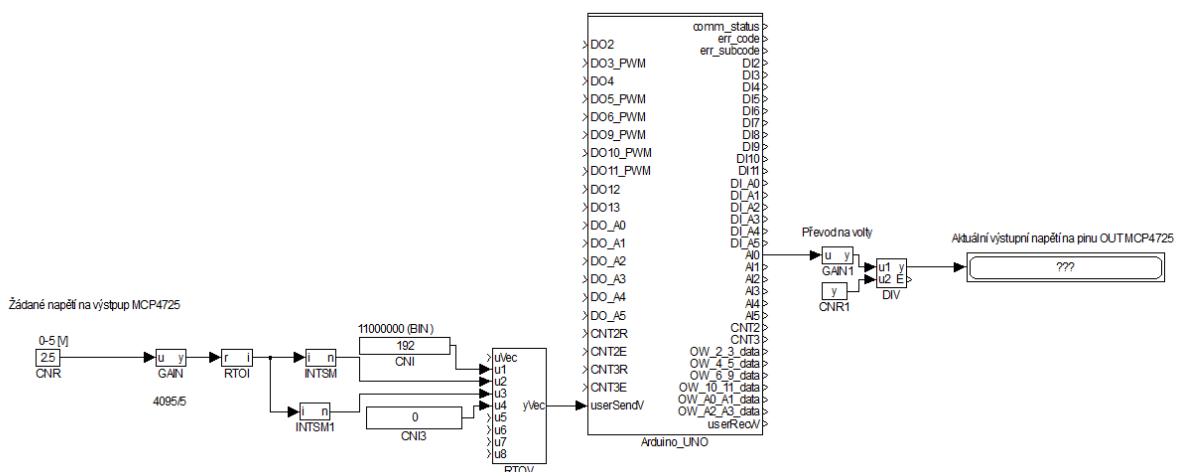
Tabulka 8: Druhý byte MCP4725

Zápis hodnot				Data pro výstup			
0	0	0	0	D11	D10	D9	D8

Tabulka 9: Třetí byte MCP4725

Data pro výstup							
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Realizace popsané přípravy signálu v programu REXYGEN je uvedena dále. Žádané napětí v rozsahu 0 až 5 V je převedeno do rozsahu 0 až 4095. To odpovídá rozlišení D/A převodníku. Tato hodnota je přetypována na datový typ integer. První byte je adresový, hodnota  $(192)_{10}$  odpovídá  $(11000000)_2$ , druhý a třetí byte je pro žádanou hodnotu napětí a poslední byte je prázdný. Jednotlivé položky jsou vektorově sečteny v bloku vector multiplexer a jsou zapsány na vstup bloku Arduino. Zápis je poté převeden zpět na volty.[11]

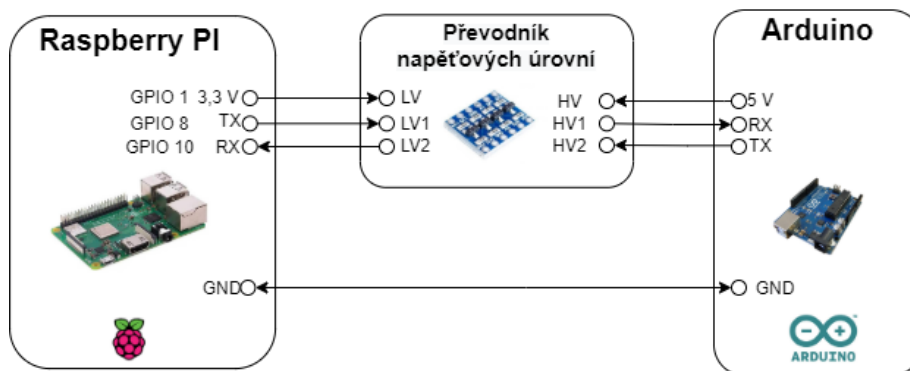


Obrázek 32: Realizace přepočtu vstupního signálu v prostředí REXYGEN [11]

## 4.2 Přenos signálu mezi Raspberry PI a Arduino

Při testování řízení reálné soustavy se zjistilo, že spojení mezi Raspberry PI a Arduino s reálným modelem MagnetoShield přes USB rozhraní nedosahuje dostatečné rychlosti pro periodu 2 ms, kterou

je vykonáván program v Raspberry PIO Z tohoto důvodu budou obě zařízení komunikovat prostřednictvím komunikačního rozhraní UART. Přitom Raspberry PI disponuje jinou napěťovou úrovní než Arduino. Proto je nutné použít obousměrný napěťový převodník, který převádí napěťovou úroveň 5 V na úroveň 3,3 V a ve stejném čase úroveň 3,3 V na úroveň 5 V. Konkrétně je použit převodník BSS138 od firmy Fairchild. Obousměrný převodník zprostředkuje vyšší rychlost přenosu dat mezi řídicí jednotkou (Raspberry PI) a vstupně/výstupním zařízením (Arduino+MagnetoShield). GPIO piny 8 (TX) a 10 (RX) na Raspberry PI jsou ve výchozím stavu používány pro komunikaci Bluetooth. Aby tyto piny mohly fungovat jako UART komunikace je nutné deaktivovat Bluetooth komunikaci na těchto pinech. Úprava se provede v konfiguračním souboru Rasperry PI. Piny 8,10 a napětí 3,3 V se připojí na LV piny převodníku. Piny RX, TX a napětí 5 V ze strany Arduino se připojí na HV piny převodníku. Vzájemně se pak propojí GND piny Raspberry PI a Arduino. Obrázek 33 schematicky popisuje uvedené propojení.



Obrázek 33: Blokové schéma přenosu dat mezi Raspberry PI a Arduino

### 4.3 Úprava signálu ze snímače skutečné výšky magnetu

Na místě snímače skutečné výšky magnetu je použita Hallova sonda. Zpracování jejího signálu probíhá v několika krocích. Postup zpracování signálu je převzat ze zdroje [1].

Analogový signál z Hallovy sondy je převeden do digitální podoby. Arduino obsahuje na svých vstupech 10bitový A/D převodník s maximálním rozsahem 3,3 V. Prvním krokem je normování signálu na hodnotu 0 až 1023. Druhým krokem je přepočítání uvedeného napětí na magnetickou indukci vyjádřenou v Gaussech.

Přepočítání Hallova napětí na Gaussy:

$$B = (2,5 - U_H) \cdot HS \quad (11)$$

kde:

B – magnetická indukce [G]

$U_H$  – Hallovo napětí [V]

HS – senzitivita Hallovy sondy [ $G \cdot V^{-1}$ ]

Hodnota HS označuje parametr Hallovy sondy, která je vyjádřena jako senzitivita v  $G/V^{-1}$ . Velikost senzitivity je  $800 G \cdot V^{-1}$ .

Dalším krokem je převedení magnetické indukce vyjádřené v Gaussech na výšku vyjádřenou v milimetrech. Pro tento převod jsou použity hodnoty konstanty 3,2331 a 0,220571 a jsou převzaty ze zdrojového kódu [1].

Přepoččet magnetické indukce na výšku:

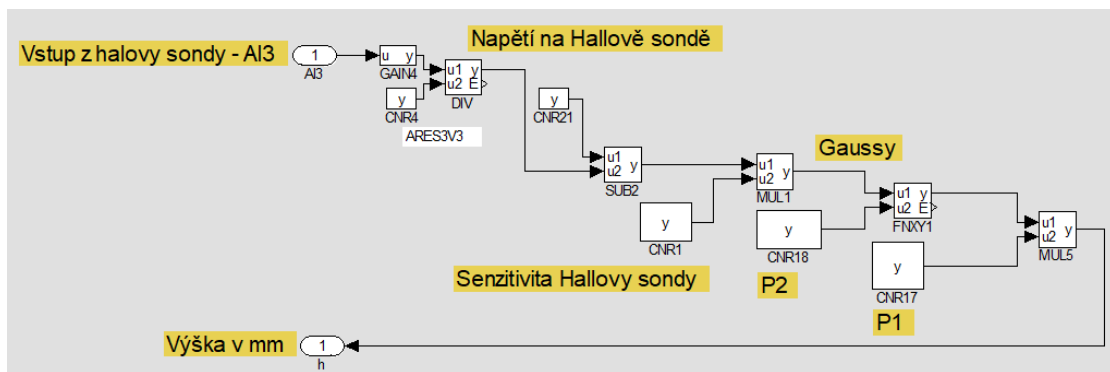
$$h = 3,2331 \cdot B^{0,220571} \quad (12)$$

kde:

h – výška magnetu [mm]

B – magnetická indukce [G]

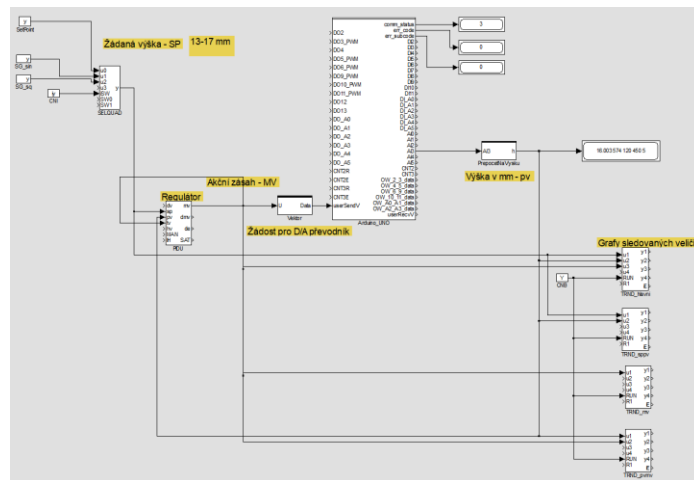
Obrázek 34 zobrazuje popsáný přepoččet v prostředí Rexygen.



Obrázek 34: Úprava signálu ze snímače výšky

#### 4.4 Řízení reálného modelu

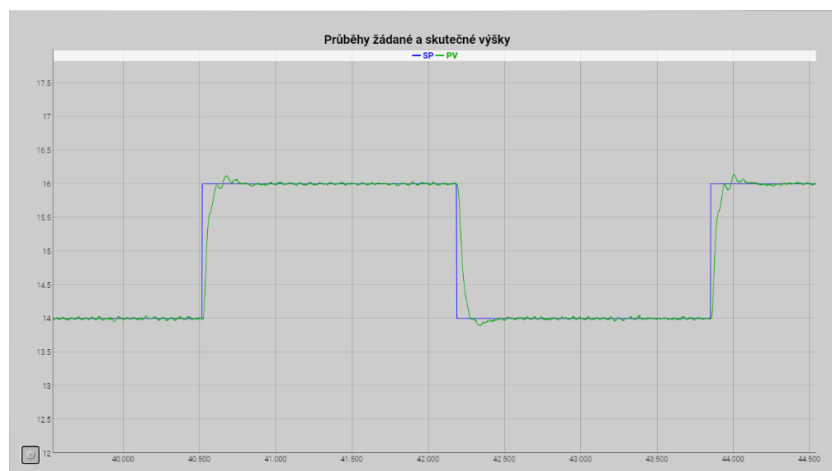
Řízení reálného modelu vznikne spojením výše uvedených kroků. V prostředí REXYGEN je nyní regulovaná soustava nahrazena reálným modelem, který je reprezentován software blokem Arduino. Do tohoto bloku vstupuje žádané napětí pro magnet. Signál z analogového vstupu AI3 je přepočítán jako signál skutečné výšky a je přiveden do regulátoru. Pro přehlednost programu je opět přepoččet výšky realizován jako vnořený objekt.



Obrázek 35: Řízení reálného modelu v prostředí REXYGEN



Funkce programu s reálným modelem byla ověřena s parametry regulátoru shodnými ze SIL simulace. Výsledný průběh při použití obdélníkového zdroje žádané hodnoty je zobrazen na Obrázku 36.



Obrázek 36: Ověření řízení reálného modelu

## 4.5 Zpracování signálu z Raspberry PI kamery

Pro snímání obrazu je použita kamera Raspberry PI Camera module V2. Kamera je připojena do portu určeného jen pro kameru. Zprovoznění kamery není složité. V konfiguraci minipočítače Raspberry je nutné povolit kamerový port. Dalším krokem je spuštění skriptu pro zpracování obrazu a jeho přenos na web [20]. Skript je součástí dokumentace ke kameře. Skript se vykoná v inicializačním souboru „crontab“, který se vykoná při spuštění Raspberry. Výsledkem skriptu je webová stránka, na které se zobrazuje živý přenos z připojené kamery. Obrázek 37 znázorňuje připojení kamery do Raspberry PI plochým mnohožilovým kabelem.



Obrázek 37: Raspberry PI Camera module V2

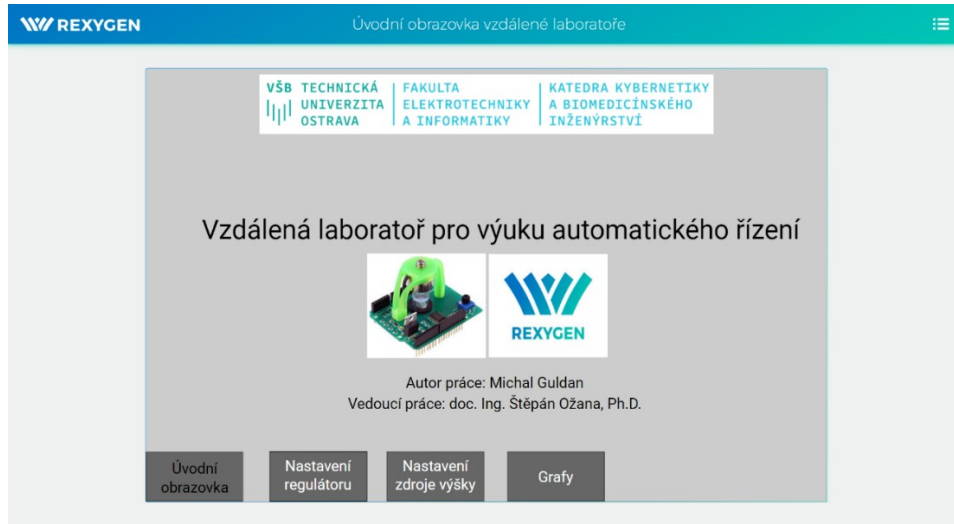
Při zprovoznění byla rovněž zkoušena webkamera připojená do USB portu Raspberry PI. Toto řešení se neosvědčilo, protože CPU Raspberry bylo kamerou příliš zatíženo.

## 4.6 Vizualizace vzdálené laboratoře

Aplikace vizualizace vzdálené laboratoře se spouští ve webovém prohlížeči zadáním IP adresy cílového zařízení a portu 8008, např. 10.0.0.4:8008. Přihlašování probíhá stejně jako u virtuální laboratoře.

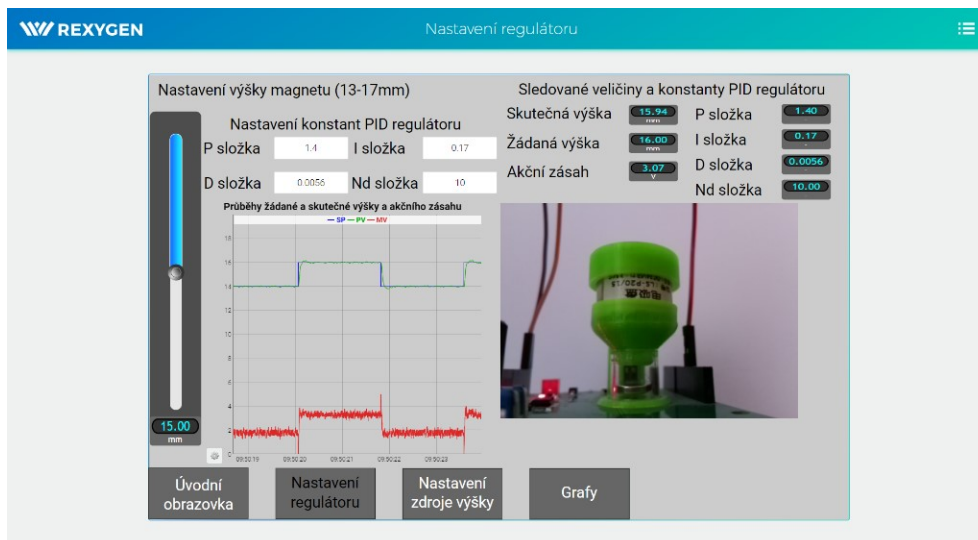
Přihlašovací login je admin, bez hesla. Toto přihlašování je výchozí. Přístup do vizualizace lze případně zabezpečit heslem.

Po přihlášení se načte úvodní obrazovka vzdálené laboratoře. V dolní části obrazovky jsou umístěna tlačítka, která slouží k přepínání mezi obrazovkami vzdálené laboratoře. Tato tlačítka představují jednotlivé obrazovky vzdálené laboratoře.



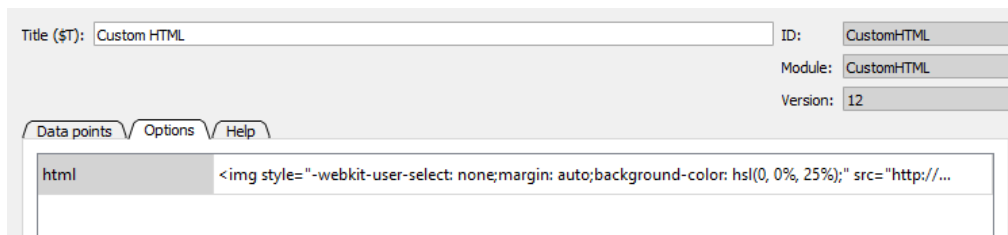
Obrázek 38: Úvodní obrazovka vzdálené laboratoře

Další obrazovky jsou shodné s obrazovkami virtuální laboratoře a jsou popsány v kapitole 3.3 Vizualizace virtuální laboratoře. Rozdíl je pouze v tom, že na místech, kde je ve vizualizaci virtuální laboratoře umístěn model magnetické levitace MagnetoShield, je nyní ve vzdálené laboratoři zobrazen záběr z kamery na skutečný MagnetoShield.



Obrázek 39: Obrazovka vzdálené laboratoře pro nastavení regulátoru

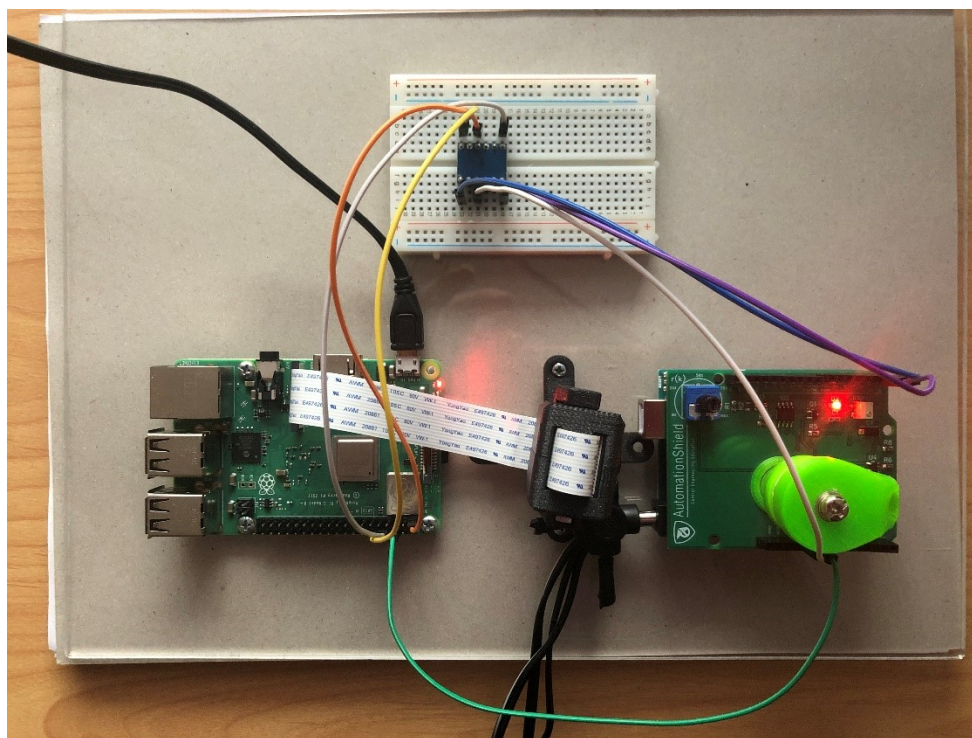
Vkládání živého obrazu z připojené kamery do vizualizace vzdálené laboratoře se provádí Rexygen HMI Designer pomocí prvku Custom HTML, do kterého se vloží HTML kód webové stránky. V tomto případě je to kód webové stránky, ve kterém je umístěn živý přenos z kamery.



Obrázek 40: Nastavení prvku Custom HTML

## 4.7 Provedení vzdálené laboratoře

Komponenty vzdálené laboratoře jsou upevněny na desce z plexiskla o formátu A4. Mikrokontrolér Raspberry PI je umístěn v levé části. Uprostřed je Raspberry PI kamera, která je svým objektivem namířena na vznášející se magnet. Převodník napěťových úrovní je zasunut v nepájivém poli, které je umístěno nad elektronickými jednotkami. Všechny jednotky jsou k desce přišroubovány tak, aby se daly jednoduše demontovat. Nepájivé pole je k základní desce přilepeno. Pro napájení mikropočítačů Raspberry PI a Arduino jsou použity dva samostatné síťové adaptéry. Kamera je s mikropočítačem Raspberry PI spojena mnohožilovým plochým vodičem. Kamera je k desce uchycena ve stojánku, který umožňuje její naklápění.

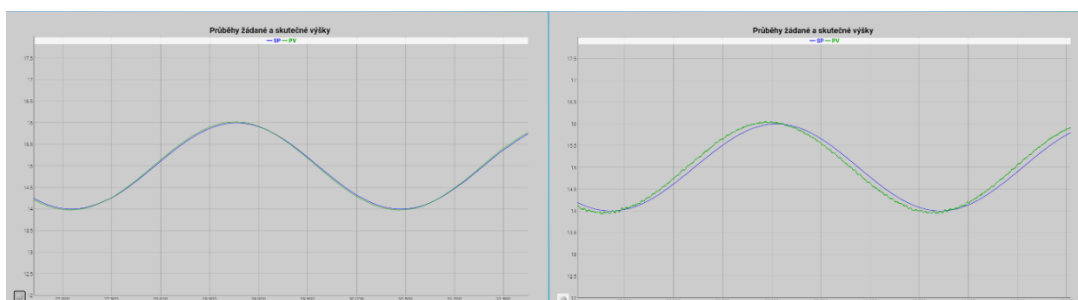


Obrázek 41: Zapojení vzdálené laboratoře

## 5 Porovnání virtuální a vzdálené laboratoře

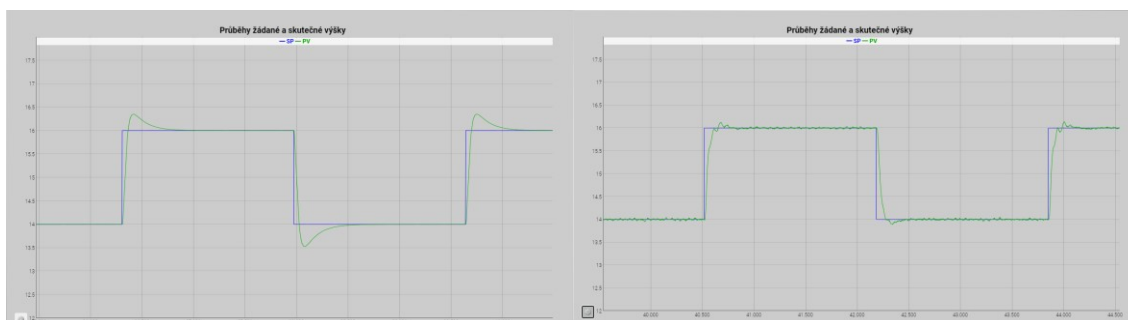
Prostředí virtuální a vzdálené laboratoře by mělo být shodné, aby se daly porovnat výsledky průběhů ze signálů ze simulace a reálného modelu. Proto je důležité, aby chování obou systému bylo možné ovlivnit změnou parametrů regulátorů i zdrojů žádané hodnoty. Toto obě laboratoře umožňují. Pro porovnání byly zvoleny dva průběhy zdroje žádané výšky. Jsou to sinusový signál a obdélníkový signál o frekvenci 0,3 Hz a rozsahu žádané výšky mezi hodnotami 14 a 16 mm. Pro dosažení shodných průběhů rozdílů žádané a skutečné výšky při reálném modelu bylo nutné mírně upravit parametry regulátoru. To je způsobeno několika důvody. Magnet se při pohybu mírně dotýká trubičky, ve které je umístěn, a zde vzniká odpor při jeho pohybu. Dalším vlivem může být i to, že signál z Hallové sondy je přepočítáván pomocí řady konstant. I přes tyto vlivy bylo dosaženo dobré shody průběhů v obou laboratořích.

Obrázek 42 znázorňuje porovnání průběhů funkce sinus v obou laboratořích. Na průbězích lze vidět dobrou shodu mezi skutečnými výškami. Potřebný akční zásah ve vzdálené laboratoři není tak ustálený jako u virtuální laboratoře.



Obrázek 42: Porovnání funkce průběhů funkce sinus v obou laboratořích

Obrázek 43 znázorňuje porovnání průběhů obdélníkové funkce v obou laboratořích. Na průbězích lze vidět, že při přechodu mezi jednotlivými stavy žádané hodnoty dochází k mírnému překmitu hodnot skutečné výšky. Skutečná výška se ustálí za 0,35 s. Toto je velmi podobné jako doba ustálení při MIL simulaci.



Obrázek 43: Porovnání funkce průběhů funkce obdélník v obou laboratořích

## Závěr

Bakalářská práce popisovala používání modelu magnetické levitace. Od úvodní části, kde jsem se seznámil se samotnými technickými prostředky, modelem levitace i malými počítači Arduino a Raspberry, až po závěrečné zprovoznění reálného modelu včetně jeho sledování pomocí kamery.

Virtuální i vzdálená laboratoř byly sestaveny pomocí programového prostředí Rxygen. Rxygen je velmi přívětivý nástroj pro tvorbu regulačních úloh. Výhodou je, že se v něm dala celá matematicky popsaná soustava naprogramovat. Přínosem je rovněž možnost zobrazovat grafické průběhy jednotlivých veličin.

V práci jsou porovnány výsledky průběhu regulace v jednotlivých krocích. Úvodní simulace proběhla v programu Matlab-simulink. V prostředí Rxygen proběhla druhá simulace a řízení reálného modelu.

Z nasnímaných grafů je zřejmé, že s uvedenou regulační soustavou bylo dosaženo poměrně dobré shody v jednotlivých krocích práce, protože chování levitačního modelu je dostatečně dobře matematicky popsáno. Nejobtížnější částí řízení reálného modelu je přesné sledování skutečné výšky magnetu pomocí obdélníkového zdroje signálu žádané výšky. Zde dochází vlivem gravitace k protichůdnému požadavku na regulátor při zastavování pohybu magnetu ve směru dolů a nahoru. Vhodnou volbou parametrů regulátoru bylo dosaženo optimálního pohybu magnetu.

Bakalářská práce ukázala na příkladu malého modelu magnetické levitace, že virtuální zprovoznování má smysl. Přináší úspory času i nákladů při samotném zprovoznování reálného zařízení. Osobním přínosem byla možnost seznámit se s novými technickými prostředky a sledovat chování reálného zařízení při změně nastavování provozních parametrů.

## Seznam literatury

- [1] AutomationShield. *Github* [online]. Bratislava: AutomationShield, 2018 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://github.com/gergelytakacs/AutomationShield/wiki>
- [2] TAKÁCS, Gergely, Erik MIKULÁŠ, Martin GULAN a Jakub MIHALÍK, 2020. MagnetoShield: Prototype of a Low-Cost Magnetic Levitation Device for Control Education. *Research gate* [online]. 1-11 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/342447364\\_MagnetoShield\\_Prototype\\_of\\_a\\_Low-Cost\\_Magnetic\\_Levitation\\_Device\\_for\\_Control\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/342447364_MagnetoShield_Prototype_of_a_Low-Cost_Magnetic_Levitation_Device_for_Control_Education)
- [3] *Raspberry Pi and Arduino – a perfect couple for control education* [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <http://bellman.zcu.cz/~jsobota/REXduino.pdf>
- [4] *Dokonalé spojení Raspberry Pi a mikrokontroléru Arduino* [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.rexcontrols.com/oldweb/rexcontrols.cz/clanky/dokonale-spojeni-raspberry-pi-a-mikrokontroleru-ar>
- [5] *MIL simulation* [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.rexcontrols.com/mil-simulation>
- [6] *SIL simulation* [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.rexcontrols.com/sil-simulation>
- [7] *ARDUINO UNO REV3* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [8] *What is Arduino?* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- [9] *Raspberry Pi 3 Model B+* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [10] *Raspberry Pi 3 Model B+* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>
- [11] *I2C with REXDuino* [online]. [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://forum.rexygen.com/topic/152/i2c-with-rexduino>
- [12] *I2C Non-Blocking Communication* [online]. [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4803.pdf>
- [13] *MCP4725-Datasheet* [online]. [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>
- [14] *Web-based HMI for REXYGEN User guide* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: [https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/RexHMI/RexHMI\\_ENG.html](https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/RexHMI/RexHMI_ENG.html)
- [15] *What are virtual laboratories and how do they work in eLearning?* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.talentlms.com/blog/virtual-laboratories-elearning/>

- [16] *What are Remote Laboratories?* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z:  
<https://remotelaboratory.com/remote-laboratories/what-are-remote-laboratories/>
- [17] VARGAS, Hector, Jose SANCHEZ MORENO, Francisco A. CANDELAS HERIAS a Carlos ALBERTO JARA. *A Network of Automatic Control Web-Based Laboratories* [online]. 2011, 1-5 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/232652131\\_A\\_Network\\_of\\_Automatic\\_Control\\_Web-Based\\_Laboratories](https://www.researchgate.net/publication/232652131_A_Network_of_Automatic_Control_Web-Based_Laboratories)
- [18] VAVŘÍN, Petr a Petr BLAHA. *Řízení a regulace I. Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní* [online]. Elektronické skriptum VUT. [cit. 2020-12-31].
- [19] OGATA, Katsuhiko, 2010. *Modern Control Engineering*. 5. New Jersey, USA: Prentice Hall. ISBN 978-0136156734.
- [20] *Video Streaming with Raspberry Pi Camera* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z:  
<https://randomnerdtutorials.com/video-streaming-with-raspberry-pi-camera/>

## Seznam příloh

Součástí práce jsou přílohy v elektronické podobě.

1. Simulace\_MIL – zdrojový soubor pro Simulink
2. Simulace\_SIL – zdrojový soubor pro Rxygen
3. Rizeni\_Realneho\_Modelu – zdrojový soubor pro Rxygen