

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

ŘÍZENÍ TEPELNÉ SOUSTAVY

Radek Mandík

Bakalářská práce
2019

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek Mandík**
Osobní číslo: **I15015**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Řízení tepelné soustavy**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl: Cílem práce je navrhnout řídicí algoritmus laboratorní tepelné soustavy - modulárního systému Quanser QNET 2.0 HVAC osazené v základně pro měření a ovládání NI ELVIS II+. Mimo nezbytného oživení a fyzického propojení mechanického modelu, NI ELVIS II+ a PC a seznámení se s uvedenou modulární soustavou a s podpůrným softwarem, bude úkolem studenta provést návrh regulačního algoritmu s pevnou strukturou (na bázi PID, s příp. modifikacemi).

Teoretická část: Rešerše problematiky týkající se programování v grafickém programovacím jazyce G a tvorby aplikací v LabVIEW s využitím Control Design and Simulation Module. Návrh regulátoru zvolené struktury a nalezení jeho optimálních parametrů.

Implementační část: Tvorba simulačních schémat a souvisejících aplikací pro měření a řízení rotorového systému v grafickém programovacím jazyce G a ověření jejich činnosti.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- VLACH, J.; HAVLÍČEK, J.; VLACH, M. 2008. Začínáme s LabVIEW. Praha: BEN - technická literatura. 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.**
PECHOUŠEK, J. 2004. Základy programování v prostředí LabVIEW. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. 87 s. ISBN 80-244-0800-7.
DORF, R. C.; BISHOP, R. H. 2005. Modern Control Systems. 10 vyd. New Jersey: Prentice Hall. 881 s. ISBN 0-13-127765-0.

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

Datum zadání bakalářské práce: **14. prosince 2018**

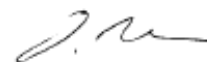
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2019**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. prosince 2018

Prohlášení

Prohlašuji:

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

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

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

V Pardubicích dne 6. 5. 2019

Radek Mandík

Poděkování

Rád bych poděloval vedoucímu bakalářské práce Ing. Liboru Kupkovi, Ph.D. za vedení práce, ochotný přístup, rady a připomínky ke zpracování. Dále bych rád poděkoval přítelkyni a rodině za podporu po celou dobu mého studia.

V Pardubicích dne 6. 5. 2019

Radek Mandík

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá realizací aplikace pro řízení, měření a ovládání tepelné soustavy v prostředí LabVIEW s využitím simulačních nástrojů Control Design and Simulation Module. Na základě matematického modelu tepelné soustavy je navržen PID regulátor. Činnost aplikace je otestována s navrženým PID regulátorem a je provedeno měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

LabVIEW, Control Design and Simulation Module, tepelná soustava, PID regulátor

TITLE

CONTROL OF THERMAL SYSTEM

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with implementation of an application for management, measurement and control of thermal system in LabVIEW environment with use of Control Design and Simulation Module. The PID controller is designed on the basis of the mathematical model of the thermal system. The application is tested with designed PID controller and the measurement is performed.

KEYWORDS

LabVIEW, Control Design and Simulation Module, Thermal System, PID Controller

OBSAH

	SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	9
	SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ.....	10
	SEZNAM ILUSTRACÍ	11
	SEZNAM TABULEK.....	13
	ÚVOD	14
1	TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1	LabVIEW	15
1.1.1	Datový tok.....	15
1.1.2	Uživatelské rozhraní	16
1.1.3	Čelní panel	16
1.1.4	Blokový Diagram.....	17
1.2	Control Design and Simulation Module	17
1.2.1	Knihovna Simulation	18
1.2.2	Knihovna Control Design	19
1.2.3	Knihovna System Identification.....	20
1.2.4	Knihovna PID	20
1.2.5	Knihovna Fuzzy Logic.....	21
1.2.6	Knihovna Sim Interface	22
1.3	Řízení	22
1.3.1	Regulátor.....	23
1.3.2	Dynamické vlastnosti regulátoru	24
1.3.3	PID regulátor.....	25
1.3.4	Nastavení parametrů regulátoru	26
1.3.5	Metoda pokus – omyl.....	26
2	PRAKTICKÁ ČÁST.....	28
2.1	Tepelná soustava	28
2.1.1	Schéma tepelné soustavy	29
2.1.2	Ventilátor	30
2.1.3	Teplotní čidla	31
2.1.4	Zesilovač napětí	31
2.1.5	Stavové LED diody.....	31
2.1.6	Pracovní stanice NI ELVIS II+	31

2.2	Simulace.....	32
2.2.1	Model tepelné soustavy.....	33
2.2.2	Identifikace systému	36
2.2.3	Nastavení parametrů PID regulátoru metodou pokus – omyl.....	36
2.3	Aplikace řídicí tepelnou soustavu	39
2.3.1	Čelní panel	40
2.3.2	Obsluha aplikace	42
2.3.3	Blokový diagram.....	43
2.3.4	Měření statické charakteristiky a odezvy tepelné soustavy	46
2.3.5	Regulace tepelné soustavy	49
2.3.6	Skoková změna žádané hodnoty	55
2.3.7	Porovnání simulace s laboratorní tepelnou soustavou	57
3	ZÁVĚR	58
	POUŽITÁ LITERATURA	59
	PŘÍLOHY	61

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

CDSim	Control Design and Simulation Module
D	derivační regulátor
DAQ	Data AcQuisition (oblast pořizování dat)
ELVIS	Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (Vzdělávací laboratorní virtuální přístrojová sada)
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning (vytápění, větrání a klimatizace)
I	integrační regulátor
jazyk G	grafický jazyk
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LED	Light Emitting Diode (dioda emitující světlo)
MATLAB	Matrix Laboratory
NI	National Instruments
P	proporcionální regulátor
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PD	proporcionálně derivační regulátor
PI	proporcionálně integrační regulátor
PID	proporcionálně integračně derivační regulátor
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
QNET	Quanser NI Engineering Trainers
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

e	regulační odchylka
k	zesílení přenosu
k_P	zesílení regulátoru
r_0	váha proporcionální složky
r_1	váha derivační složky
r_{-1}	váha integrační složky
T	teplota
T_D	derivační časová konstanta, s
T_I	integrační časová konstanta, s
U	napětí
u	akční zásah
w	žádaná hodnota
y	regulovaná veličina

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 – Čelní panel.....	16
Obrázek 1.2 – Blokový diagram	17
Obrázek 1.3 – Knihovna Simulation.....	18
Obrázek 1.4 – Knihovna Control Design.....	19
Obrázek 1.5 – Kombinace řídicího systému a fyzického systému	19
Obrázek 1.6 – Knihovna System Identification	20
Obrázek 1.7 – Knihovna Control & Simulation	21
Obrázek 1.8 – Knihovna Fuzzy Logic	21
Obrázek 1.9 – Ovládání	22
Obrázek 1.10 – Regulace	23
Obrázek 1.11 – Regulační obvod.....	24
Obrázek 2.1 – QNET 2.0 HVAC	29
Obrázek 2.2 – Schéma tepelné soustavy.....	29
Obrázek 2.3 – Všechny prvky tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC	30
Obrázek 2.4 – Ventilátor.....	31
Obrázek 2.5 – Pracovní stanice NI ELVIS II+	32
Obrázek 2.6 – Čelní panel simulace tepelné soustavy.....	34
Obrázek 2.7 – Blokový diagram simulace tepelné soustavy	35
Obrázek 2.8 – Přejchodová charakteristika přenosu tepelné soustavy	36
Obrázek 2.9 – Odezva simulace 1. kroku nastavování parametrů regulátoru	37
Obrázek 2.10 – Odezva simulace 2. kroku nastavování parametrů regulátoru	37
Obrázek 2.11 – Odezva simulace 3. kroku nastavování parametrů regulátoru	38
Obrázek 2.12 – Odezva simulace 4. kroku nastavování parametrů regulátoru	39
Obrázek 2.13 – Čelní panel aplikace	41
Obrázek 2.14 – Blokový diagram aplikace.....	44
Obrázek 2.15 – PID regulátor aplikace.....	46
Obrázek 2.16 – Statická charakteristika tepelné soustavy.....	47
Obrázek 2.17 – Odezva tepelné soustavy	48
Obrázek 2.18 – Porovnání odezvy tepelné soustavy a aproximace	49
Obrázek 2.19 – Odezva soustavy.....	49
Obrázek 2.20 – Průběh akční veličiny	50
Obrázek 2.21 – Měření teploty na teploměrech.....	50

Obrázek 2.22 – Odezva soustavy s přidáním anti-windupu	51
Obrázek 2.23 – Průběh akční veličiny s přidáním anti-windupu.....	52
Obrázek 2.24 – Měření teploty na teploměrech s přidáním anti-windupu	52
Obrázek 2.25 – Odezva soustavy po změně parametrů	53
Obrázek 2.26 – Průběh akční veličiny po změně parametrů	54
Obrázek 2.27 – Měření teploty na teploměrech po změně parametrů	54
Obrázek 2.28 – Odezva soustavy při skokové změně	55
Obrázek 2.29 – Průběh akční veličiny při skokové změně.....	55
Obrázek 2.30 – Měření teploty na teploměrech při skokové změně	56
Obrázek 2.31 – Porovnání odezva soustav	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 – Všechny prvky tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC	30
Tabulka 2.2 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru 1. kroku.....	36
Tabulka 2.3 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru 2. kroku.....	37
Tabulka 2.4 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru 3. kroku.....	38
Tabulka 2.5 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru 4. kroku.....	39
Tabulka 2.6 – Měření teploty při změně napětí	47
Tabulka 2.7 – Změny parametrů PID regulátoru	53

ÚVOD

Prakticky veškerá energie, se kterou se setkáváme a kterou využíváme, byla teplem nebo jako teplo končí. Regulace teploty je proces, při kterém se měří nebo jinak detekuje změna teploty prostoru nebo látky a průchod tepelné energie do prostoru nebo látky se nastavuje tak, aby bylo dosaženo požadované teploty. Klimatizace, topení, chladničky, ohřívače vody atd. jsou příklady zařízení, která provádějí regulaci teploty.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit řídicí algoritmus laboratorní tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC v prostředí LabVIEW a provést rešerši problematiky týkající se programování v grafickém programovacím jazyce G.

V stručnosti je provedeno uvedení do grafického vývojového prostředí LabVIEW. Dále je popsán rozšiřující modul vývojového prostředí LabVIEW Control Design and Simulation Module, jsou stručně popsány podknižovny. Nakonec je teoretická část věnována řízení. Jsou zde popsány způsoby řízení, je zde popsán PID regulátor a možnosti nastavení jeho parametrů.

Dojde k seznámení s laboratorní tepelnou soustavou QNET 2.0 HVAC. Jsou zde popsány periferie tepelné soustavy a její připojení do pracovní stanice NI ELVIS II+. Je vytvořen model tepelné soustavy v prostředí LabVIEW s použitím simulačních nástrojů, které poskytuje rozšiřující modul Control Design and Simulation Module. Pomocí modelu tepelné soustavy je identifikován typ systému a je proveden návrh PID regulátoru modelu tepelné soustav.

K řízení tepelné soustavy je vytvořena aplikace, pomocí které je možné ovládat celou soustavu, a to včetně sledování průběhů měřených veličin. Jsou popsány prvky aplikace, možnosti ovládání a samotný blokový diagram. Dále je provedeno měření statické a přechodové charakteristiky a je určena závislost teploty na napětí. Je provedeno nastavení regulátoru a provedeno porovnání simulace tepelné soustavy s laboratorní tepelnou soustavou.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Důraz je kladen na tvorbu aplikací v prostředí LabVIEW, je popsáno použití nástrojů poskytovaných rozšiřujícím modulem Control Design and Simulation Module a je popsána teorie řízení dynamických systémů. Největší důraz je kladen na vývojové prostředí LabVIEW, je stručně popsáno a je uveden způsob práce s vývojovým prostředím. Je provedeno stručné uvedení do rozšiřujícího modelu Control Design and Simulation Module a jsou popsány jeho podknižovny. Dále je pojednáváno o řízení, v této části jsou uvedeny rozdíly mezi ovládaním a regulací, je popsán PID regulátor a metody nalezení parametrů PID regulátoru.

1.1 LABVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) je programovací a vývojové prostředí pro grafické programování ve formě bloků od firmy National Instruments, která je průkopníkem virtuální instrumentace. Toto prostředí, někdy nazývané jako jazyk G čili „grafický jazyk“, je používáno zejména k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů.

Hlavní motivace virtuální instrumentace je dočasná nebo i trvalá náhrada prostorově, finančně a časově náročného využití technických prostředků za pomoci programových prostředků, a zvláště pak pomoci grafických a vizuálních prostředků umožnit uživateli maximální názornost. Výhodou je rychlé navrhování nových aplikací a provádění změn v konfiguraci, což je u skutečných nástrojů nákladné. Výsledným produktem prostředí LabVIEW je tzv. virtuální přístroj, který svými vlastnostmi reprezentuje fyzický přístroj (Vlach, 2008, s. 18).

1.1.1 Datový tok

Grafické vývojové prostředí LabVIEW umožňuje při tvorbě aplikací užívat ikon namísto řádků textu. Hlavní odlišností od textových jazyků je využití programování na principu datového toku, kde tok dat procházející uzly v blokovém diagramu určuje posloupnost prováděných funkcí (AUTOMA, 2009, s. 66).

Vykonávání programu v LabVIEW je řízeno datovým tokem, který jednoznačně určuje směr provádění programu. Zpracování informace v jednotlivých uzlech blokového diagramu se provede, když jsou na všech jeho vstupech požadované informace potřebné k jeho provedení.

Po ukončení zpracování uzel vytvoří definované výstupní informace, které se pošlou dále (Vlach, 2008, s. 49).

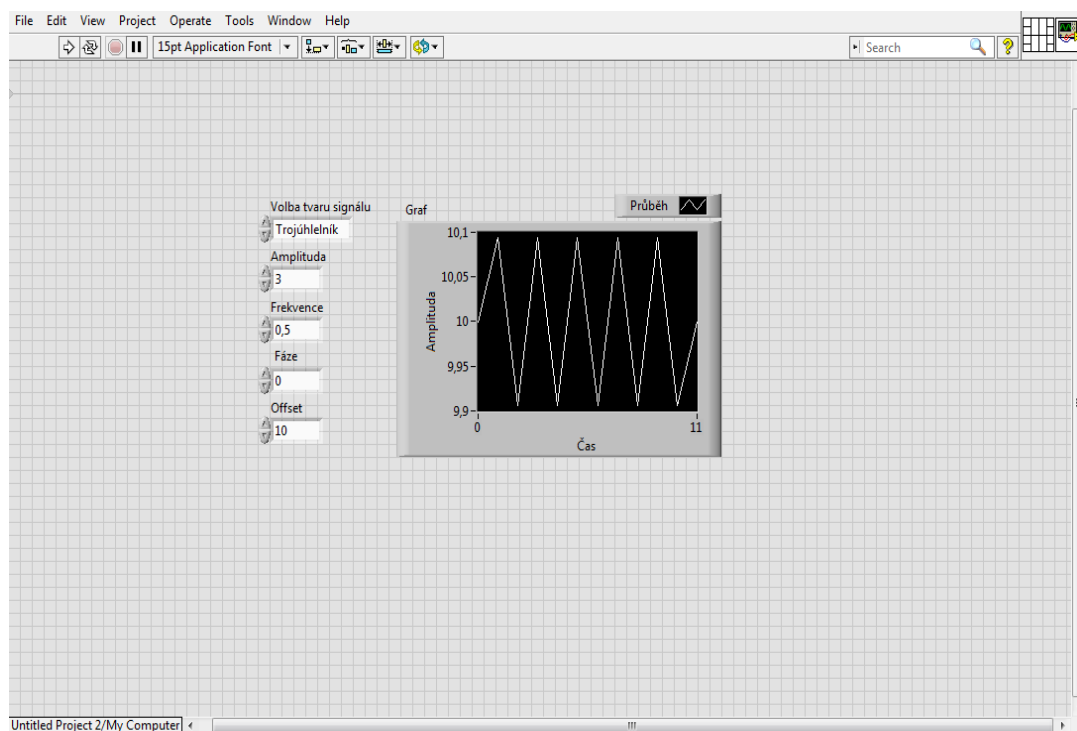
1.1.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní prostředí LabVIEW má podobu čelního panelu měřicího přístroje, a to je jeden z důvodů, proč se produkt prostředí LabVIEW nazývá virtuální přístroj.

Vytváření nového virtuálního přístroje se skládá ze dvou sdružených oken a to z uživatelského rozhraní, které se nazývá čelní panel, a z blokového diagramu (Vlach, 2008, s. 21).

1.1.3 Čelní panel

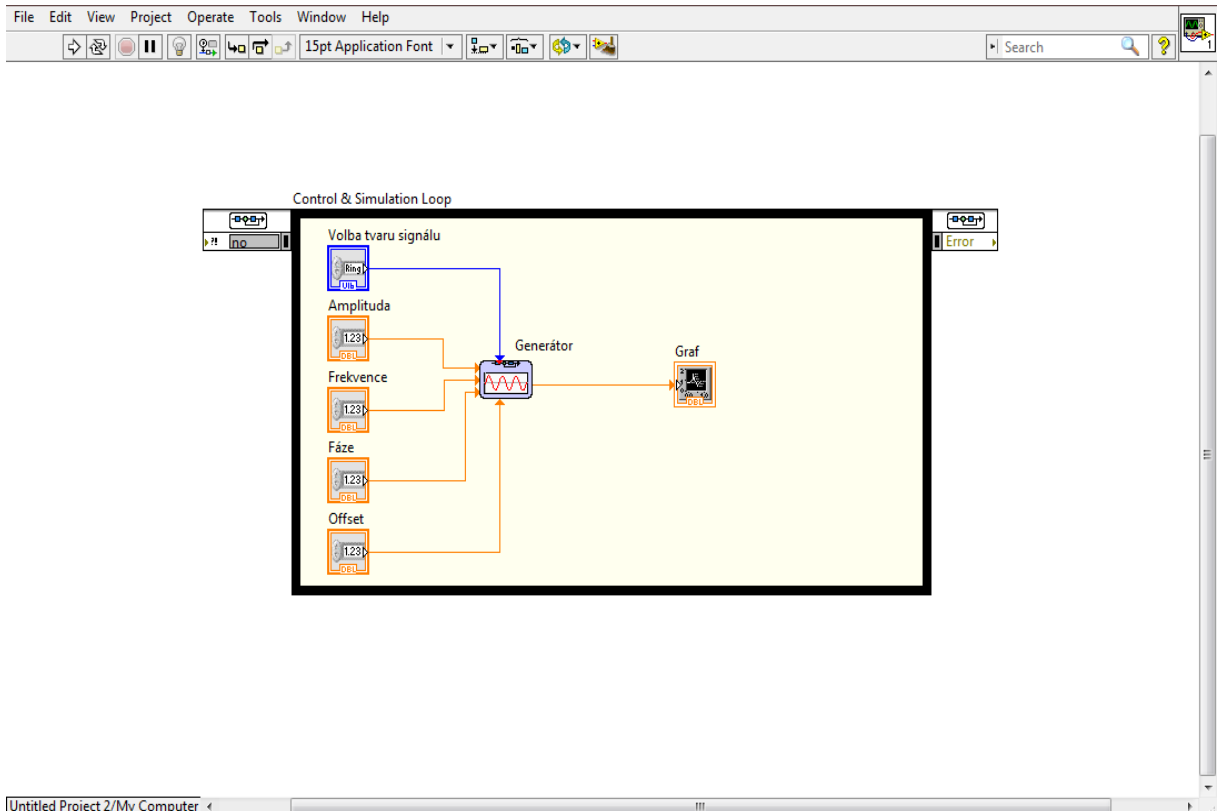
Čelní panel (obrázek 1.1) je interaktivní grafické rozhraní pro koncového uživatele, tvoří uživatelské rozhraní aplikace a udává její chování a vzhled. Přes objekty čelního panelu je možné řídit běh aplikace, zadávat parametry a získávat informace o zpracovaných výsledcích. Objekty je možné jakkoliv měnit a upravovat a programově nastavovat (Pechoušek, 2004; Vlach, 2008).



Obrázek 1.1 – Čelní panel

1.1.4 Blokový Diagram

Na okně blokového diagramu obrázek 1.2 uživatel definuje samotný algoritmus programu. Blokový diagram je tvořen funkcemi, programovacími strukturami, terminály, které reprezentují ovládací prvky čelního panelu, datovými cestami a bloky. Datové cesty spojující prvky diagramu jsou tvořeny pomocí „drátů“, které zprostředkovávají datový tok. Blokový diagram je zdrojovým kódem aplikace (Pechoušek, 2004).



Obrázek 1.2 – Blokový diagram

1.2 CONTROL DESIGN AND SIMULATION MODULE

Rozšiřující modul Control Design and Simulation Module zkráceně CDSim poskytuje nástroje, pomocí kterých lze simulovat dynamické systémy, navrhovat regulátory a zavádět řídicí systémy do hardwaru v reálném čase. CDSim také umožňuje použití nástrojů pro identifikaci systémů a tvorbu matematických modelů (National Instruments, 2018).

CDSim se skládá z podnikhoven, mezi které patří:

- Simulation,
- Control Design,
- System Identification,

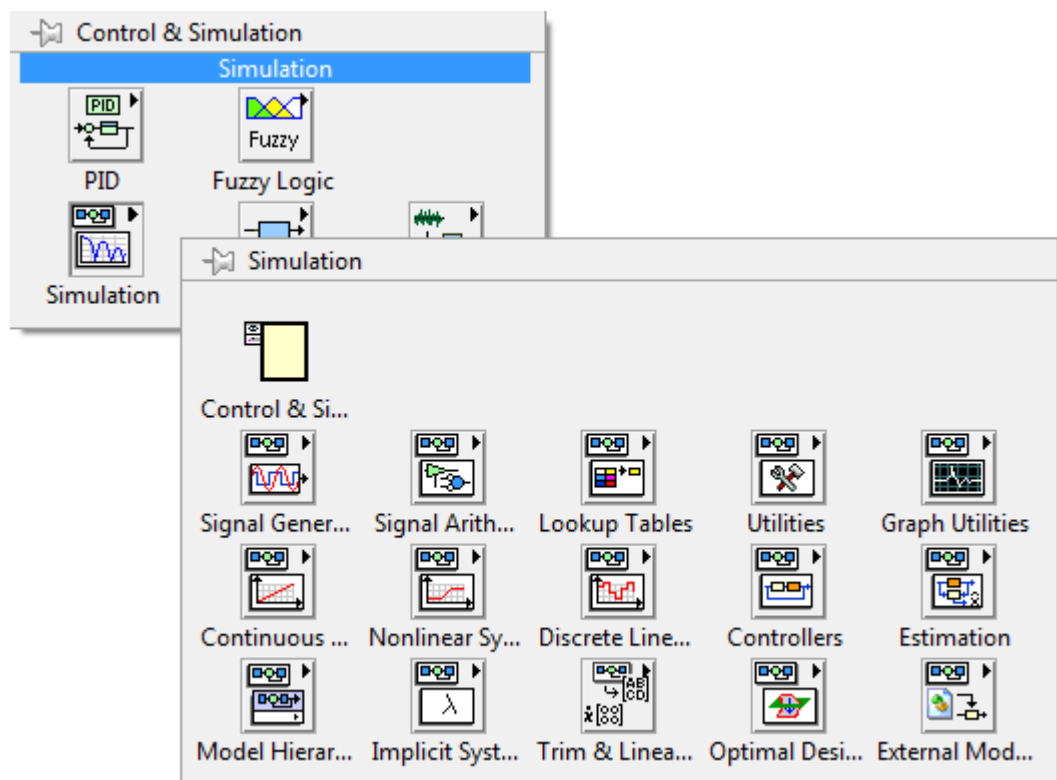
- PID,
- Fuzzy Logic,
- Sim Interface.

1.2.1 Knihovna Simulation

Hlavním účelem knihovny Simulation (obrázek 1.3) je proces simulace, který zahrnuje použití softwaru pro analýzu chování dynamických systémů. Tento proces vede ke snížení nákladů a urychlení vývoje produktu.

Hlavním blokem knihovny Simulation je blok Control & Simulation Loop, který udává parametry a čas simulace (doba simulace, krok, metoda řešení). Control & Simulation Loop také definuje vizuální hranici simulačního diagramu, všechny prvky simulace musí být umístěny uvnitř této hranice.

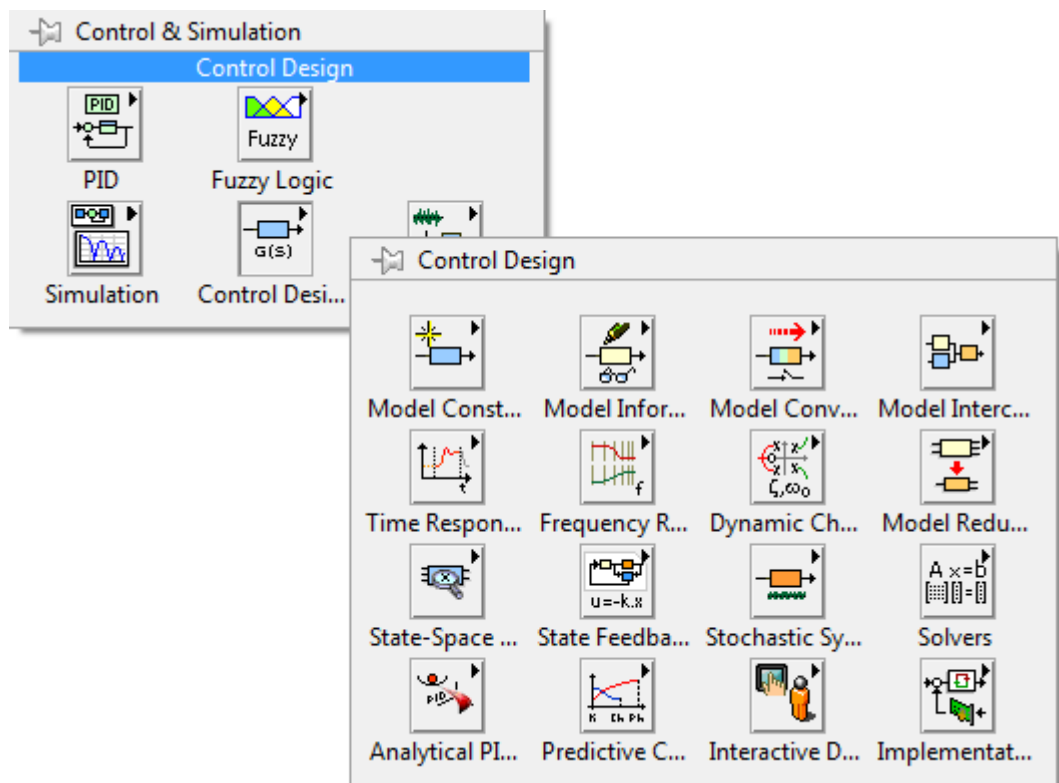
Knihovna Simulation obsahuje spoustu podknihoven, které jsou potřeba k simulaci. Mezi možnosti, které poskytují podknihovny, patří generování signálů, aritmetické operace se signály, umožňuje tvorbu spojitých signálů, tvorbu regulátorů a další (National Instruments, 2009a).



Obrázek 1.3 – Knihovna Simulation

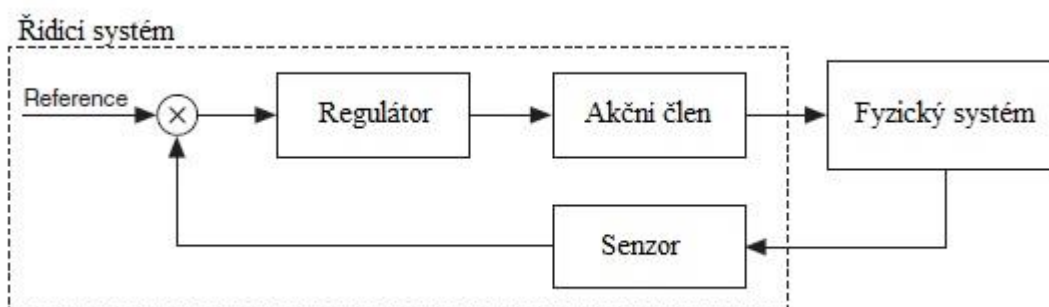
1.2.2 Knihovna Control Design

Účelem knihovny Control design na obrázku 1.4 je proces, který zahrnuje vytvoření matematického modelu popisující fyzický systém, analýzu matematického modelu za účelem zjištění dynamických charakteristik a návrh regulátoru pro dosažení požadovaných dynamických charakteristik.



Obrázek 1.4 – Knihovna Control Design

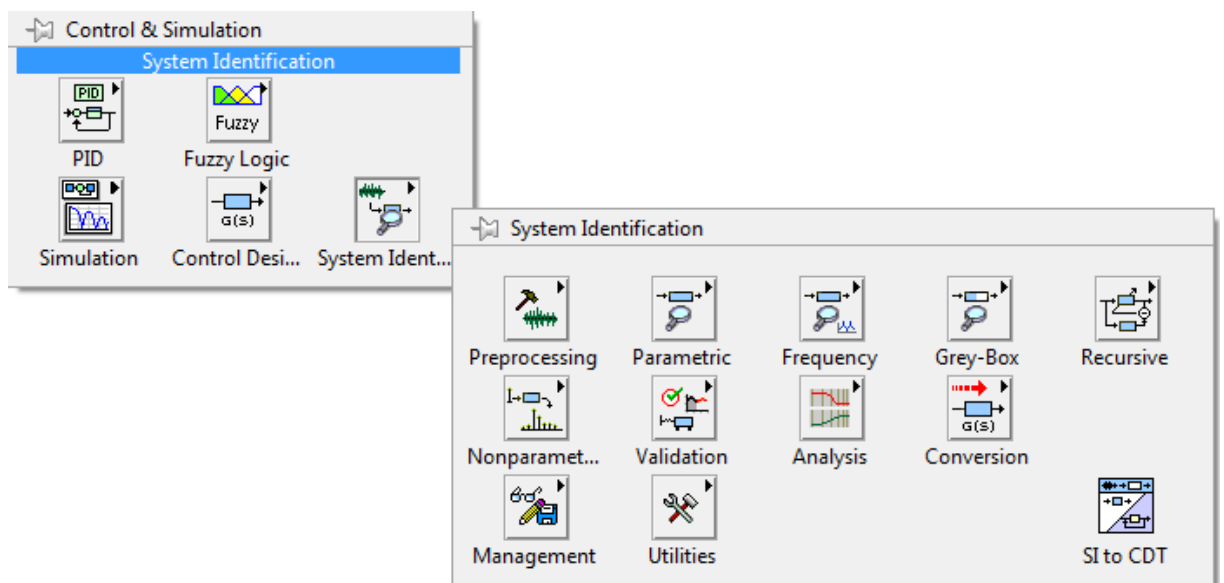
Řídicí systém obsahuje prvky, které řídí a regulují fyzický systém. V tomto případě se řídicí systém skládá z regulátoru, senzoru a akčního členu. Na obrázku 1.5 je vidět kombinace řídicího systému a fyzického systému (National Instruments, 2008, s. 1-1).



Obrázek 1.5 – Kombinace řídicího systému a fyzického systému

1.2.3 Knihovna System Identification

System Identification na obrázku 1.6 kombinuje nástroje pro sběr dat s identifikačními algoritmy s účelem vytvoření přesného modelu fyzického systému. Lze využít intuitivních nástrojů k stimulaci a získání dat zařízení a poté automaticky identifikovat dynamický model systému (National Instruments, 2010).



Obrázek 1.6 – Knihovna System Identification

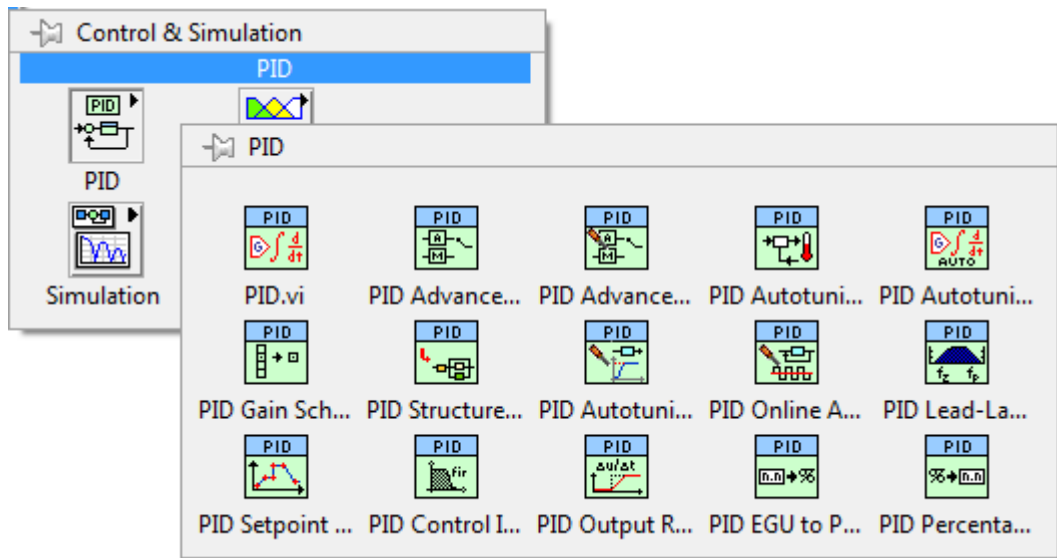
1.2.4 Knihovna PID

V současnosti je PID regulátor nejčastěji využívaná varianta regulátoru v průmyslu. PID regulátor vyhodnocuje akční zásah na základě regulační odchylky

$$e = w - y, \tag{1.1}$$

kde e je regulační odchylka,
 w – žádaná hodnota,
 y – regulovaná veličina.

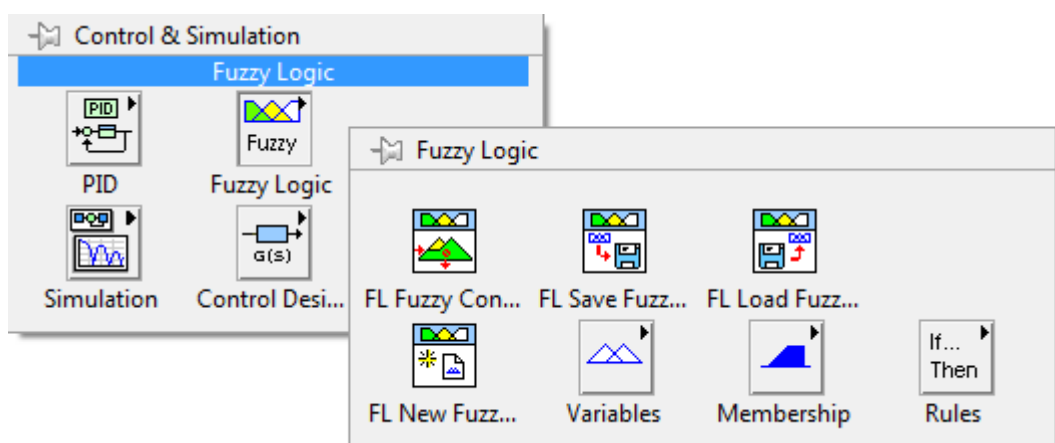
Knihovna PID ukázána na obrázku 1.7 může být použita k vytvoření řídicích aplikací k řízení hardwaru (National Instruments, 2009b, s. 1-1).



Obrázek 1.7 – Knihovna Control & Simulation

1.2.5 Knihovna Fuzzy Logic

Fuzzy logika je rozšíření Booleovy algebry na vícehodnotovou logiku. Fuzzy logika spočívá v zavedení tzv. stupně příslušnosti prvku k množině, který může nabývat hodnot od 0 do 1. Například naměřená teplota je 26 °C, pomocí Booleovy algebry je možno říci, zda je tvrzení pravdivé či nepravdivé, použitím fuzzy logiky je možné říci, že tvrzení je pravdivé ve stupni 0,6 (Šaradínová).



Obrázek 1.8 – Knihovna Fuzzy Logic

Knihovna Fuzzy Logic na obrázku 1.8 umožňuje použití fuzzy logiky k návrhu a řízení fuzzy systémů. Fuzzy systém je systém proměnných, které mají určitý stupeň příslušnosti.

Fuzzy regulátor používá uživatelem definovaná pravidla pro řízení fuzzy systémů, které jsou závislé na hodnotách vstupních proměnných (National Instruments, 2009b, s. 1-2).

1.2.6 Knihovna Sim Interface

Sada nástrojů knihovny Sim Interface umožňuje tvorbu LabVIEW uživatelských rozhraní, které je možné použít k interakci se Simulink modely programového prostředí MATLAB. Za pomoci uživatelského rozhraní vytvořeného pomocí knihovny Sim Interface je možné manipulovat s parametry a zobrazovat výstupní data Simulink modelů (National Instruments, 2003, s. 4 a 9).

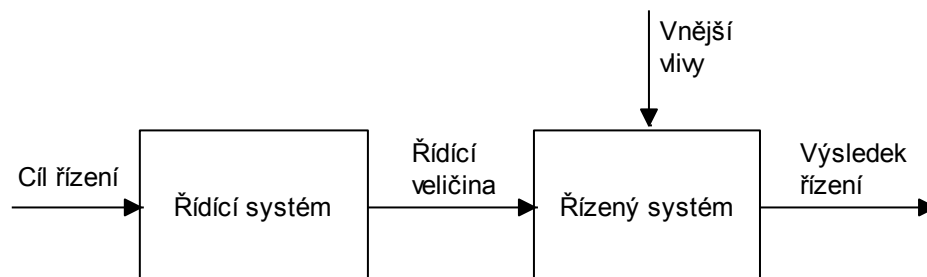
1.3 ŘÍZENÍ

Řízení je cílené působení na řízený systém, při němž se zpracovávají informace o řízeném procesu a podle nich se řídí příslušná zařízení tak, aby bylo dosaženo určitého předepsaného cíle řízení. Podle toho, jakým způsobem je řízení prováděno, rozlišuje se na řízení ruční a automatické. Příkladem ručního řízení je řízení automobilu.

Automatické řízení se dělí podle přívodu energie na řízení přímé a nepřímé. Přímé řízení nepotřebuje ke své činnosti vnější přívod energie, k řízení stačí pouze akční veličina, jako například řízení výšky hladiny odvozené od síly plováku. Nepřímé řízení potřebuje ke své činnosti vnější přívod energie.

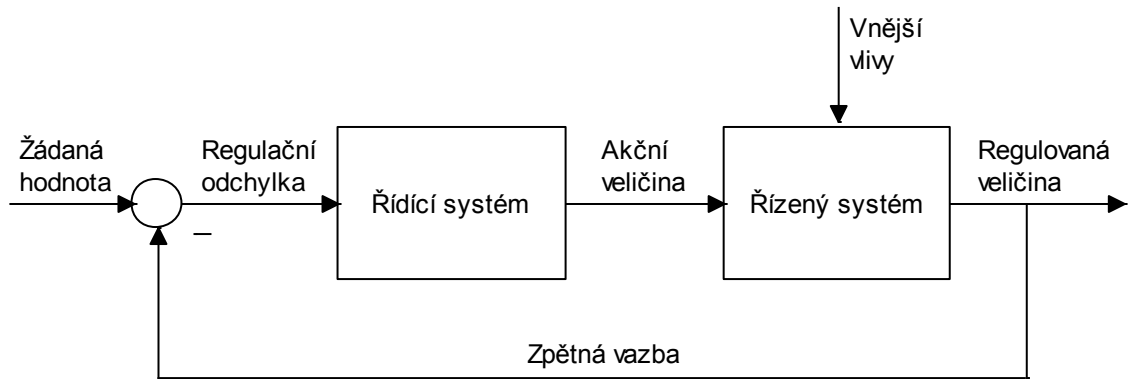
Dále je řízení možno dělit pomocí zavedení zpětné vazby, kde je či není výsledek řízení zpětně kontrolován, a to na ovládání, regulaci a vyšší formu řízení.

Ovládání neboli otevřené řízení, lze vidět na obrázku 1.9, je způsob řízení bez zpětné vazby. Kvalitu ovládání určuje znalost ovládaného systému. Výhodou ovládání je jednoduchost.



Obrázek 1.9 – Ovládání

Regulace nebo zpětnovazební řízení (obrázek 1.10) využívá aktuální informaci o procesu. Zavedením zpětné vazby je možné dosáhnout požadovaného průběhu výstupní veličiny bez znalosti parametrů systému a poruchy. Princip regulace spočívá ve vyhodnocování regulační odchylky e na základě rozdílu regulované veličiny y od žádané hodnoty w , cílem je dosažení co nejmenší nebo úplné odstranění regulační odchylky e .

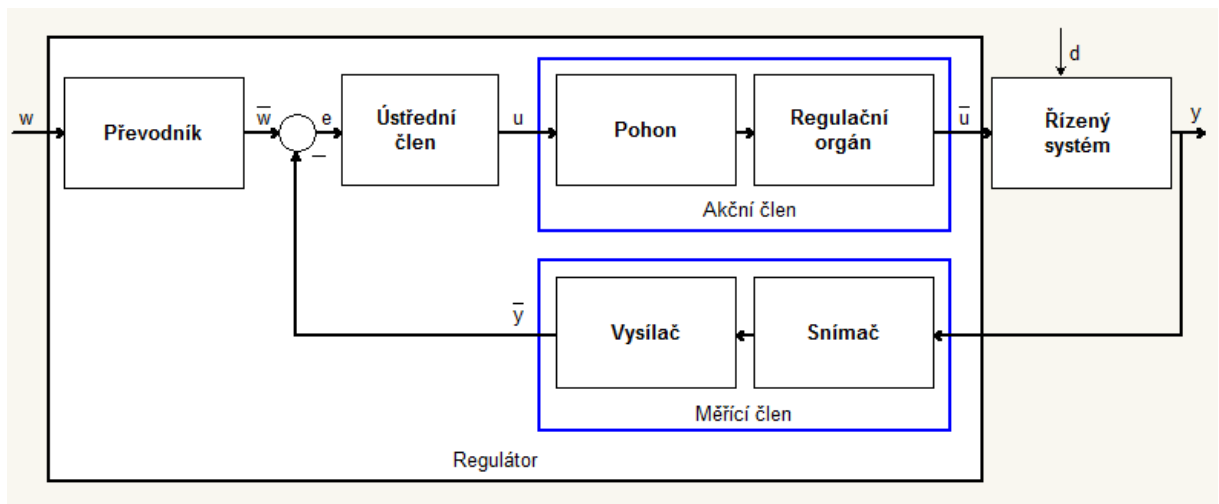


Obrázek 1.10 – Regulace

Mezi vyšší formy řízení patří optimální řízení, adaptivní řízení, učení a umělá inteligence (Švarc, 2002, s. 6 a 7).

1.3.1 Regulátor

Regulátor je nástroj, pomocí něhož je cíleně působeno na řízený systém tak, aby bylo dosaženo požadovaného cíle řízení. Regulátor svým zásahem do řízené soustavy prostřednictvím akční veličiny eliminuje rozdíl mezi žádanou hodnotou a regulovanou veličinou. Vlivem záporné zpětné vazby je zásah takového charakteru, který působí zmenšování až dosažení nulové regulační odchylky. Pokud je na vstupu regulátoru nula, je dosaženo cíle řízení, a tedy regulátor nezasahuje do řízeného systému.



Obrázek 1.11 – Regulační obvod

Regulační obvod na obrázku 1.11 se skládá z řízené soustavy a regulátoru. Základem regulátoru jsou tři prvky: měřicí člen, ústřední člen a akční člen.

Měřicí člen zjišťuje skutečnou hodnotu regulované veličiny y a případně ji upravuje, aby výstupem byl použitelný signál pro porovnávací člen. Porovnávací člen provádí odečítání regulované veličiny y od žádané hodnoty w .

Ústřední člen regulátoru zpracovává regulační odchylku e , může ji zesilovat, integrovat a derivovat. Ústřední člen má zásadní vliv na regulační pochod, při návrhu regulátoru hledáme ústřední člen s takovými parametry, které nám zprostředkují vyhovující vlastnosti celého systému.

Akční člen provádí akční zásah u do řízené soustavy (Švarc, 2002; Balátě, 2003).

1.3.2 Dynamické vlastnosti regulátoru

Dynamické vlastnosti regulátoru přesněji dynamické vlastnosti ústředního členu. Vstupem regulátoru je regulační odchylka e , kterou ústřední člen může zesilovat, derivovat a integrovat, a výstupem regulátoru je akční veličina u .

Regulátor, který pouze zesiluje regulační odchylku e , se nazývá proporcionální neboli P regulátor. P regulátor je popsán rovnicí

$$u = r_0 e, \quad (1.2)$$

kde u je akční veličina,

r_0 – váha proporcionální složky,

e – akční veličina.

Dalším regulátorem je integrační neboli I regulátor, kde akční veličina u je rovna integrálu regulační odchylky e . I regulátor je popsán rovnicí

$$u = r_{-1} \int e dt, \quad (1.3)$$

kde u je akční veličina,
 r_{-1} – váha integrační složky,
 e – regulační odchylka.

Derivační regulátor, jinak nazýván D regulátor, pouze regulační odchylku e derivuje, tento typ regulátoru je používán pouze u kombinovaných regulátorů. D regulátor je popsán rovnicí

$$u = r_1 \frac{de}{dt}, \quad (1.4)$$

kde u je regulační odchylka,
 r_1 – váha derivační složky,
 e – akční veličina.

Kombinacemi základních typů regulátorů je dosaženo lepších vlastností regulačního obvodu. Mezi kombinované regulátory patří PI regulátor, PD regulátor a PID regulátor, který je dále popsán (Švarc, 2002, s. 70).

1.3.3 PID regulátor

PID regulátor vznikne složením proporcionální, integrační a derivační složky regulátoru. Tento regulátor je v praxi nejčastěji využívaná varianta spojitého regulátoru. PID regulátor je dán vztahem

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1.5)$$

kde r_0 je váha proporcionální složky regulátoru,
 r_{-1} – váha integrační složky regulátoru,
 r_1 – váha derivační složky integrátoru,
 $u(t)$ – akční veličina,

$e(t)$ – regulační odchylka,

k_P – zesílení regulátoru,

T_I – integrační časová konstanta,

T_D – derivační časová konstanta.

Proporcionální složka je zesílení záporné zpětné vazby. S větším zesílením se zrychluje regulační děj, avšak pro vysoké hodnoty zesílení může být regulační děj nestabilní. Proporcionální složka sama o sobě neodstraní regulační odchylku, vzniká trvalá regulační odchylka.

Zavedení integrační složky poskytuje dosažení nulové regulační odchylky. Integrační složka přináší i nevýhody a to: zvýšení řádu soustavy a prodloužení regulačního děje.

Derivační složka urychluje regulační děj a zároveň zlepšuje stabilní vlastnosti regulačního děje (Švarc, 2002; Cvejn, 2007).

1.3.4 Nastavení parametrů regulátoru

Nastavení parametrů regulátoru je prováděno s cílem dosažení požadavků na kvalitu regulace, která je posuzována z průběhu regulované veličiny. Způsoby nastavování parametrů regulátoru je možné rozdělit na analytické a experimentální metody.

Analytické metody spočívají ve znalosti matematického modelu řízeného systému. Pomocí analytických metod jsou získány vztahy pro nastavení parametrů regulátoru.

Experimentální metody nastavování parametrů nevyžadují znalost matematického modelu soustavy, z tohoto důvodu jsou v praxi výhodné. Mezi experimentální metody patří například metoda Zieglerova-Nicholsova a metoda pokus – omyl, která je použita k nastavení parametrů regulátoru tepelné soustavy (Vítečková, 2011).

1.3.5 Metoda pokus – omyl

Při nastavování parametrů regulátoru pomocí metody pokus – omyl není potřeba znalost vlastností regulačního obvodu, pracuje se s reálným regulačním obvodem. Při nastavování regulátoru pomocí metody pokus – omyl je postup následující:

1. Nastaví se cílená hodnota žádané veličiny w a v ručním režimu se nastaví regulovaná veličina y přibližně rovná žádané veličině w . Vyřadí se integrační složka nastavením maximální časové konstanty T_I a derivační složka nastavením derivační časové

konstanty T_D rovné nule. Zesílení regulátoru k_P se sníží a regulátor se přepne do automatického režimu.

2. Zesílení regulátoru k_P se postupně zvyšuje, do doby kdy při skokové změně žádané hodnoty w dostaneme kmitavý průběh regulované veličiny y .
3. Zesílení regulátoru se sníží na 75 až 90 % z předešlé nastavené hodnoty. Pomalu se začne snižovat integrační časová konstanta T_I do doby, kdy je odstraněna trvalá regulační odchylka a při skokové změně požadované veličiny w je docíleno požadovaného průběhu regulované veličiny y .
4. Pro nastavení derivační složky se derivační časová konstanta T_D nastaví na desetinu integrační časové konstanty T_I . V případě projevu nepříznivých šumů nebo příliš aktivní akční veličiny u není použití derivační složky vhodné. Pokud dojde ke zlepšení regulačního pochodu, hodnota derivační časové konstanty T_D se zvýší až na 25 % integrační časové konstanty T_I , zesílení regulátoru k_P se zvýší přibližně o 25 % předchozí hodnoty a integrační časová konstanta T_I se sníží přibližně o 33 % předchozí hodnoty.

Postup metody pokus – omyl umožňuje experimentálně nastavit parametry regulátoru na požadovaný průběh regulované veličiny y z hlediska změn požadované veličiny w (Vítečková, 2011).

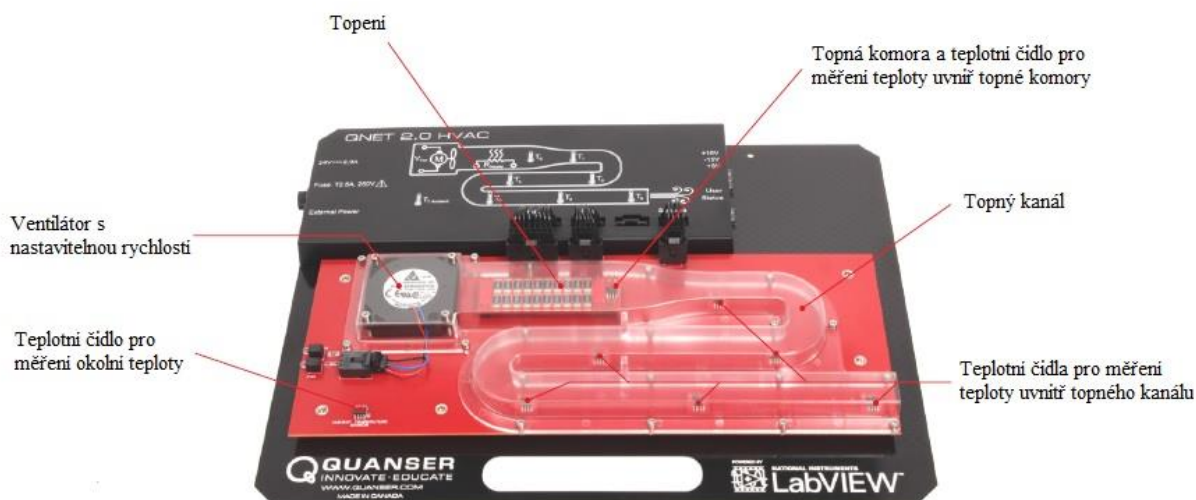
2 PRAKTICKÁ ČÁST

Hlavním úkolem praktické části bakalářské práce je úkolem vytvořit aplikaci v prostředí LabVIEW, která je schopna řídit/ovládat tepelnou soustavu QNET 2.0 HVAC. Laboratorní tepelná soustava QNET 2.0 HVAC je popsána, jsou popsány jednotlivé periferie, pracovní stanice NI ELVIS II+ a připojení pracovní stanice do tepelné soustavy a PC. Na základě znalosti obrazového přenosu je vytvořen model tepelné soustavy. Je provedena identifikace systému. Na základě simulace je navržen regulátor a jsou určeny jeho parametry. V poslední kapitole je popsána aplikace řídicí laboratorní model tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC. Jsou popsány ovládací prvky a samotný blokový diagram. Je provedeno měření statické charakteristiky, frekvenční charakteristiky a určení závislosti teploty komory na napětí. Je proveden návrh regulátoru laboratorní tepelné soustavy na základě výsledku simulace a je provedeno jeho nastavení k dosažení požadovaného regulačního děje. Dále je porovnána simulace s reálnou laboratorní soustavou.

2.1 TEPELNÁ SOUSTAVA

Tepelná soustava QNET 2.0 HVAC je navržena pro ilustraci konceptů šíření tepla prouděním a termodynamické regulace. Tato soustava je navržena pro pracovní stanice řady NI ELVIS a software LabVIEW.

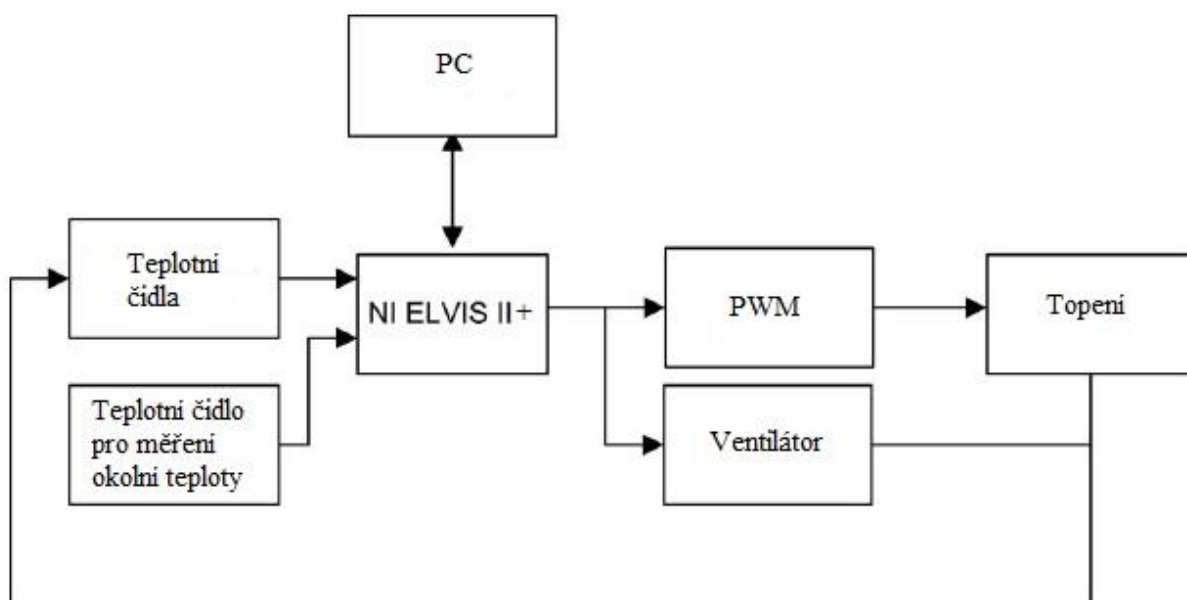
Na obrázku 2.1 (Quanser) je tepelná soustava QNET 2.0 HVAC, soustava se skládá z topné komory s topením, bezlopatkového stejnosměrného ventilátoru a topného kanálu. Topení je řízeno PWM signálem, který přivádí napětí na pole paralelně zapojených rezistorů, na kterých dochází k přeměně elektrické energie na teplo. Uvnitř topného kanálu je umístěno šest vysoce přesných teplotních čidel, další teplotní čidla měří teplotu okolí a teplotu uvnitř topné komory. Teplo je přenášeno na senzory zářením z topení a pomocí proudění vzduchu z ventilátoru (Quanser).



Obrázek 2.1 – QNET 2.0 HVAC

2.1.1 Schéma tepelné soustavy

QNET 2.0 HVAC poskytuje integrovaný zesilovač a komunikační rozhraní s NI ELVIS II+ pro příkazy zesilovači a čtení hodnot ze senzorů. Interakce mezi různými systémovými komponenty QNET 2.0 HVAC je znázorněna na obrázku 2.2 (Quanser). NI ELVIS II+ je propojen s PC pomocí USB linky. Pracovní stanice NI ELVIS II+ čte hodnoty z teplotních čidel (Quanser, s. 6).

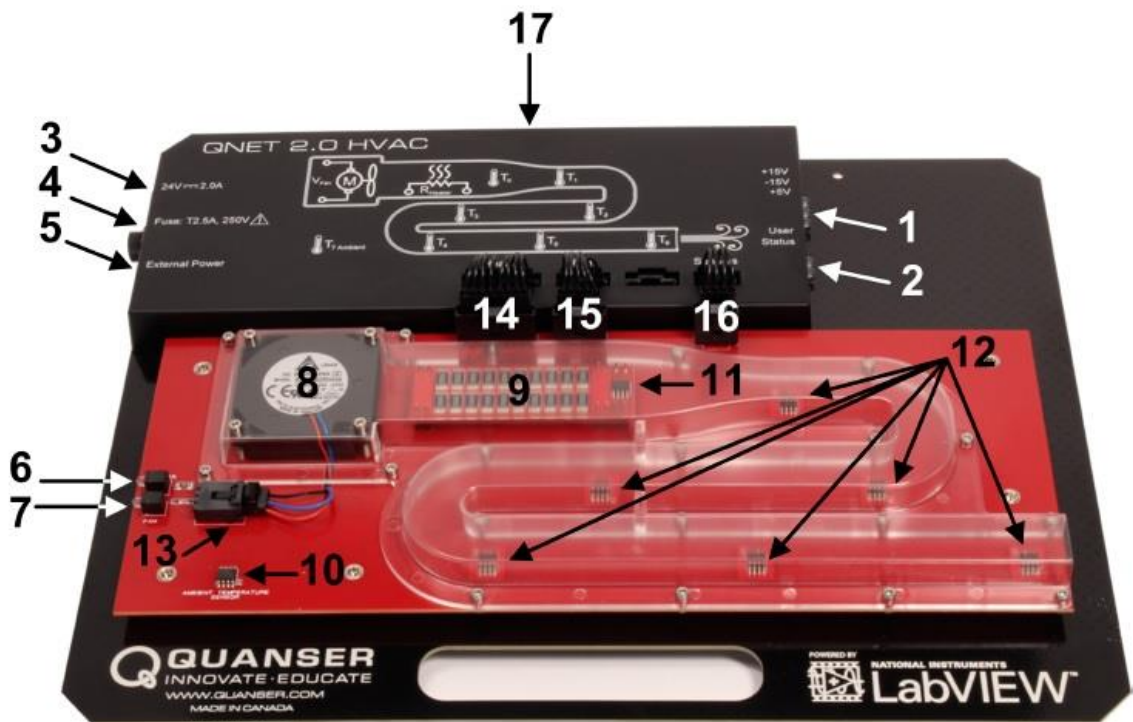


Obrázek 2.2 – Schéma tepelné soustavy

Všechny prvky (komponenty) QNET 2.0 HVAC jsou uvedeny v tabulce 2.1 (Quanser) a vyznačeny na obrázku 2.3 (Quanser).

Tabulka 2.1 – Všechny prvky tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC

ID	Popis	ID	Popis
1	+5 V; -15 V; +15 V LED	10	Teplotní čidlo okolí
2	Uživatelské a stavové LED	11	Teplotní čidlo topné komory
3	24 V napájecí jack	12	Teplotní čidla topného kanálu
4	Pojistky	13	3 pinový konektor napájení ventilátoru
5	LED indikátor externího napájení	14	8 pinový konektor topení
6	Topení LED	15	5 pinový konektor ventilátoru
7	Ventilátor LED	16	4 pinový konektor teplotních čidel
8	Ventilátor LED	17	PCI pro propojení s NI ELVIS II+
9	Topení		



Obrázek 2.3 – Všechny prvky tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC

2.1.2 Ventilátor

Na obrázku 2.4 (Delta) je ventilátor s vysokým vzduchovým průtokem $0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, který přenáší teplo z topné komory do topného kanálu pomocí proudění vzduchu. Otáčky

ventilátoru jsou řízené napájecím napětím v pracovním rozsahu od 0 V do 8,5 V (Quanser, s. 7).



Obrázek 2.4 – Ventilátor

2.1.3 Teplotní čidla

Teplotní čidla použitá k měření okolní teploty, teploty topné komory a teploty uvnitř topného kanálu jsou vysoce přesná s převodem na digitální signál. Rozsah teplotních čidel je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Quanser, s. 7).

2.1.4 Zesilovač napětí

Tepelná soustava QNET 2.0 HVAC obsahuje napěťově řízený výkonový zesilovač PWM, který je použit pro generování tepla přívodem napětí na pole odporů. Zesilovač je schopen poskytovat špičkový proud 2 A a udržovat nepřetržitě proud 0,5 A. Rozsah vstupujícího napětí na pole odporů je mezi 0 V až 24 V (Quanser, s. 8).

2.1.5 Stavové LED diody

Tepelná soustava QNET 2.0 HVAC je vybavena stavovými LED diodami pro mnoho bezpečnostních opatření, například indikace stavu napájení, překročení teploty $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a stav ventilátoru (Quanser, s. 8).

2.1.6 Pracovní stanice NI ELVIS II+

Pracovní stanice NI ELVIS II+ (obrázek 2.5) patří do série pracovních stanic NI ELVIS II od firmy National Instruments. NI ELVIS II+ je modulární vzdělávací zařízení vyvinuté speciálně pro akademické účely. Účelem pracovní stanice NI ELVIS II+ je učení

základů elektrotechniky, strojírenství a biomedicínského inženýrství. Pracovní stanice NI ELVIS II+ zprostředkovává propojení vstupů a výstupů laboratorní tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC s vývojovým prostředím LabVIEW.



Obrázek 2.5 – Pracovní stanice NI ELVIS II+

NI ELVIS II+ používá nástroje softwarového prostředí LabVIEW k poskytnutí běžných laboratorních přístrojů, například funkční generátor, digitální multimetr, osciloskop, zdroj napětí a měřicí karta (National Instruments, 2011).

Laboratorní tepelná soustava QNET 2.0 HVAC je PCI konektorem připojená do pracovní stanice. Napájení tepelné soustavy je zajištěno jackem. Samotná pracovní stanice je připojena k PC pomocí USB kabelu, který zprostředkovává komunikaci mezi PC a pracovní stanicí. Dále je k pracovní stanici připojeno samotné napájení.

2.2 SIMULACE

Pro studium jevů ve vědě a technice využíváme modelů těchto jevů. Model musí mít vlastnosti daného jevu, které jsou pro zkoumání důležité. Vytvořením umělého systému s vlastnostmi podobnými původnímu systému, potom umělý systém je modelem původního systému. Tvorbě modelu se říká modelování. Redukce modelu systému na jeho matematický model se nazývá identifikace.

Je-li k dispozici matematický model systému, potom je možné nahradit experimentování se systémem jeho matematickým modelem. Při experimentování s modelem

napodobujeme nějakou situaci, která může nastat, nebo měníme parametry. Tyto činnosti se nazývají simulací (Balátě, 2003, s. 41 a 42).

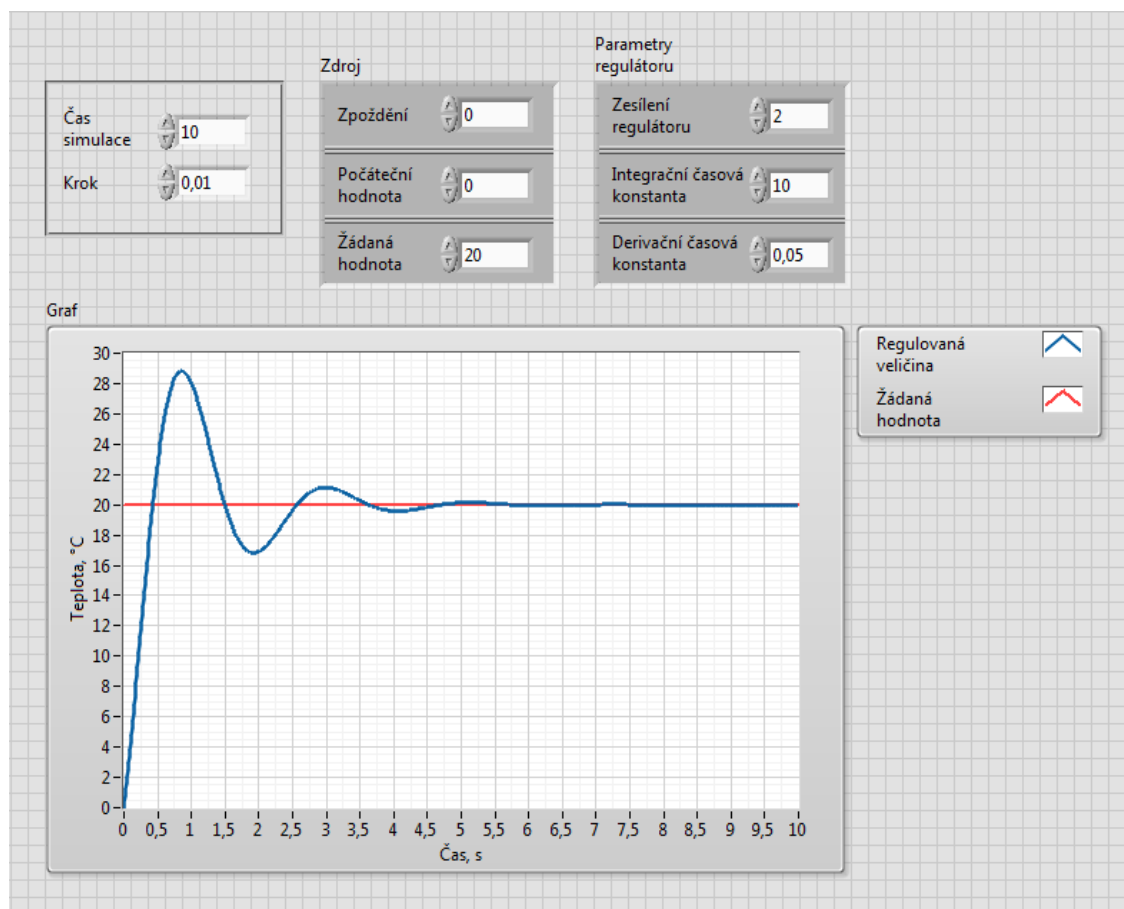
2.2.1 Model tepelné soustavy

Model tepelné soustavy QNET HVAC 2.0 byl vytvořen v prostředí LabVIEW s použitím knihovny CDSim. Model byl sestaven na základě znalosti přenosu soustavy z dokumentace (Quanser Inc., 2014). Přenos soustavy je vyjádřen ve tvaru

$$F(s) = \frac{k}{s}, \quad (2.1)$$

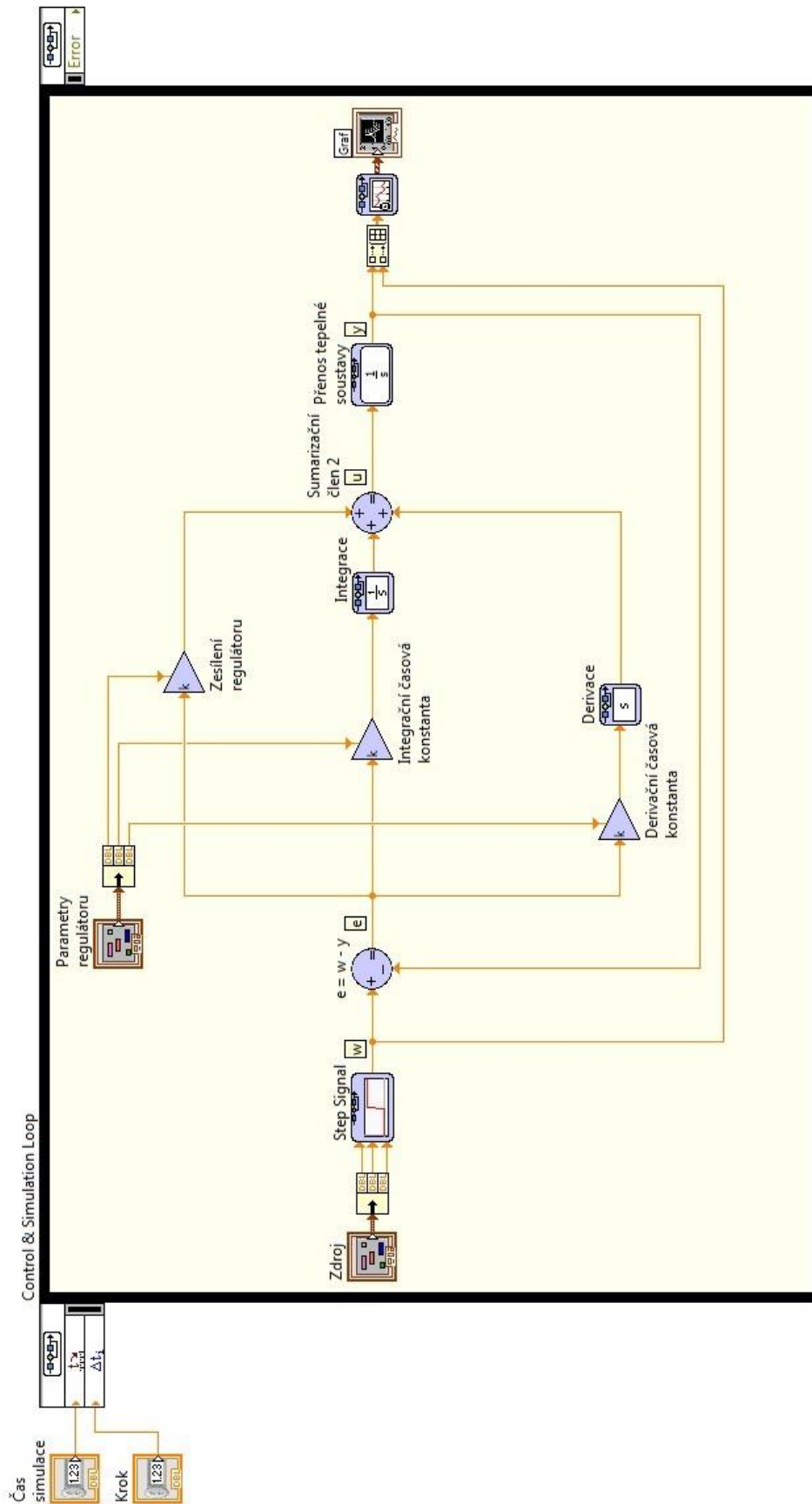
kde $F(s)$ je obrazový přenos systému,
 k – zesílení systému.

Model soustavy se skládá z čelního panelu (obrázek 2.6), na kterém je možné nastavovat parametry simulace (čas kroku, doba simulace), nastavovat požadovanou teplotu, měnit parametry regulátoru (zesílení regulátoru, integrační časová konstanta, derivační časová konstanta) a zobrazovat průběhy žádané hodnoty w a regulované veličiny y , a blokového diagramu, který řídí chod modelu soustavy.



Obrázek 2.6 – Čelní panel simulace tepelné soustavy

Blokový diagram (obrázek 2.7) je vytvořen blokovým zapojením generátoru signálu, PID regulátoru, funkce přenosu tepelné soustavy a grafu vloženým do bloku „Control & Simulation Loop“, který určuje parametry simulace. Jako generátor signálu je použit prvek „Step Signal“, který umožňuje jednoduché nastavení skokové změny a samotné nastavení žádané hodnoty w . PID regulátor je tvořen blokovým zapojením proporcionální, integrační a derivační složky s nastavitelnými parametry (zesílení regulátoru, integrační časové konstanty, derivační časové konstanty). Přenos tepelné soustavy je vytvořen blokem „Transfer Function“, která reprezentuje samotnou tepelnou soustavu. Jako poslední je v blokovém diagramu blok „Chart“, který plní funkci grafu a zobrazuje průběhy regulované veličiny u a žádané hodnoty w .



Obrázek 2.7 – Blokový diagram simulace tepelné soustavy

2.2.2 Identifikace systému

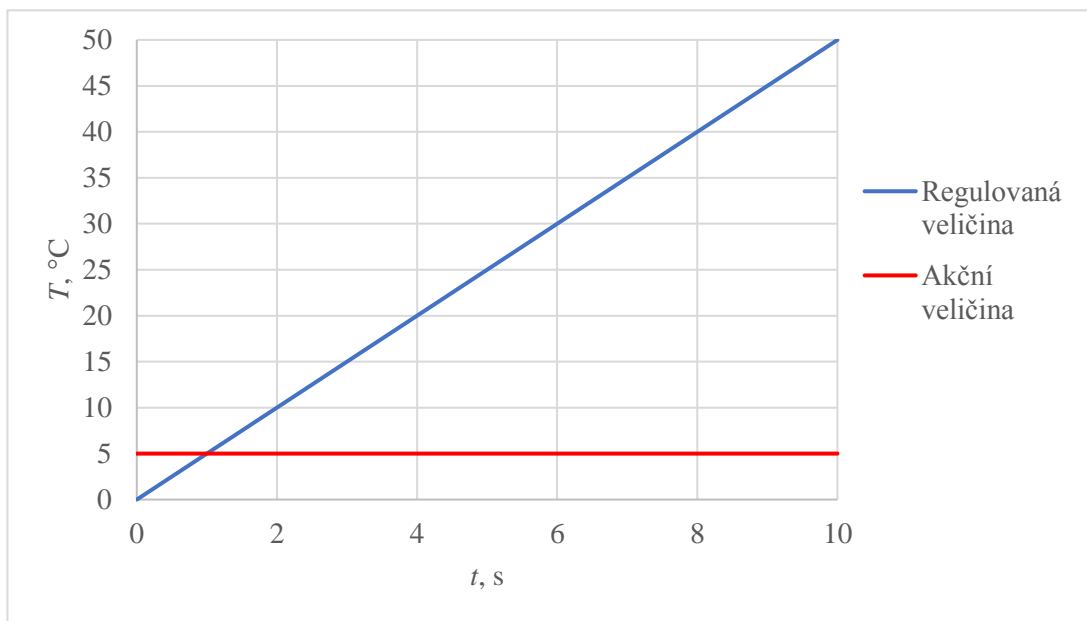
Identifikace systému je provedena na základě měření statické a přechodové charakteristiky.

Statická charakteristika přenosu tepelné soustavy neexistuje

$$k = \infty, \quad (2.2)$$

kde k je zesílení přenosu.

Z průběhu přechodové charakteristiky (obrázku 2.8) je zřejmé, že se soustava chová jako „ideální integrační soustava 0. řádu“.



Obrázek 2.8 – Přechodová charakteristika přenosu tepelné soustavy

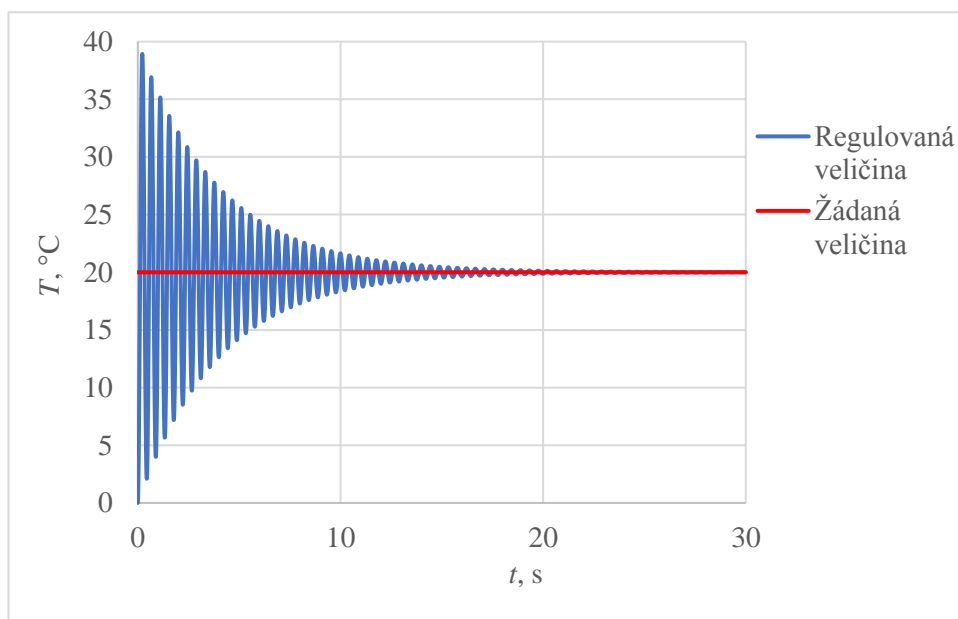
2.2.3 Nastavení parametrů PID regulátoru metodou pokus – omyl

V této části budou v jednotlivých krocích nastaveny parametry regulátoru pomocí metody pokus – omyl popsané v kapitole 1.3.5.

- 1) Je provedeno měření odezvy modelu (obrázek 2.9) při vyřazení integrační složky, derivační složky a sníženém zesílení (tabulka 2.2). Jelikož je regulovaná soustava integrační, po čase dochází k dosažení nulové regulační odchylky.

Tabulka 2.2 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru 1. kroku

Zesílení regulátoru	Integrační časová konstanta	Derivační časová konstanta
0,5	∞	0

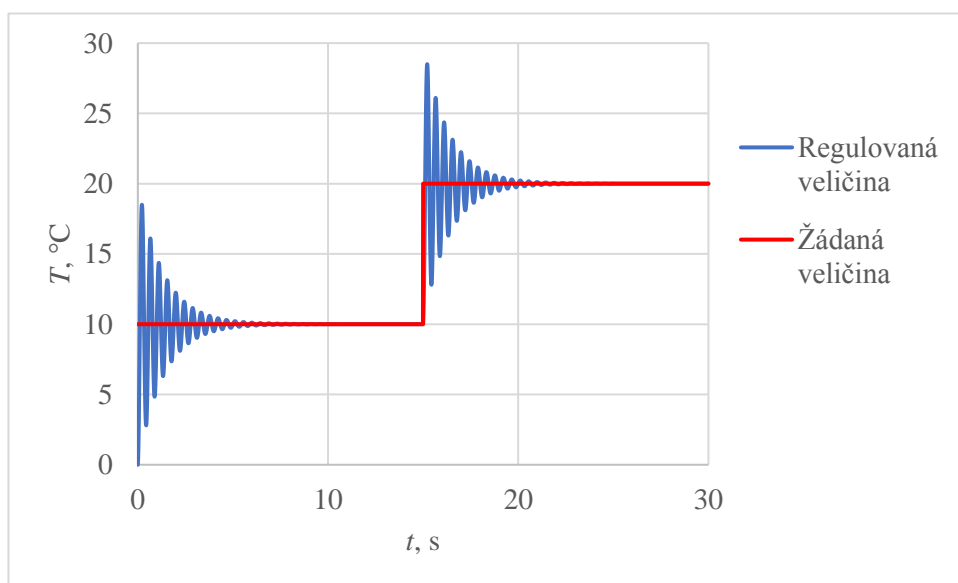


Obrázek 2.9 – Odezva modelu 1. kroku nastavování parametrů regulátoru

- 2) Dále je zvyšováno zesílení regulátoru, velikosti parametrů regulátoru jsou v tabulce 2.3, do doby, kdy je při skokové změně požadované hodnoty w dosaženo kmitavého průběhu regulované veličiny y , odezva modelu je na obrázku 2.10.

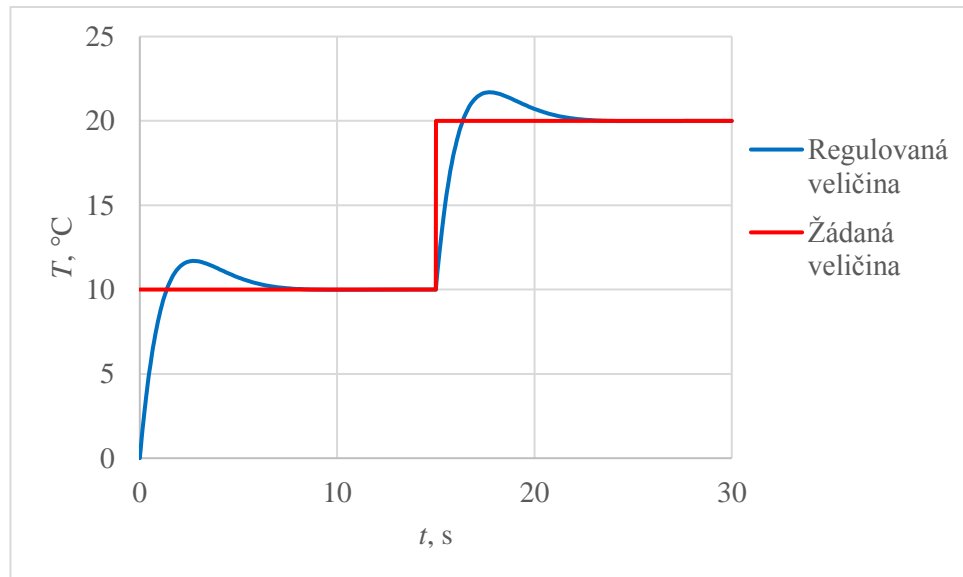
Tabulka 2.3 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru 2. kroku

Zesílení regulátoru	Integrační časová konstanta	Derivační časová konstanta
1,5	∞	0



Obrázek 2.10 – Odezva modelu 2. kroku nastavování parametrů regulátoru

- 3) Dalším krokem je přidání integrační časové konstanty. Je sníženo zesílení regulátoru na 85 % původní hodnoty a integrační časová konstanta je postupně snižována do doby, kdy je dosaženo požadovaného průběhu odezvy modelu viz obrázek 2.11, nastavené parametry jsou v tabulce 2.4.

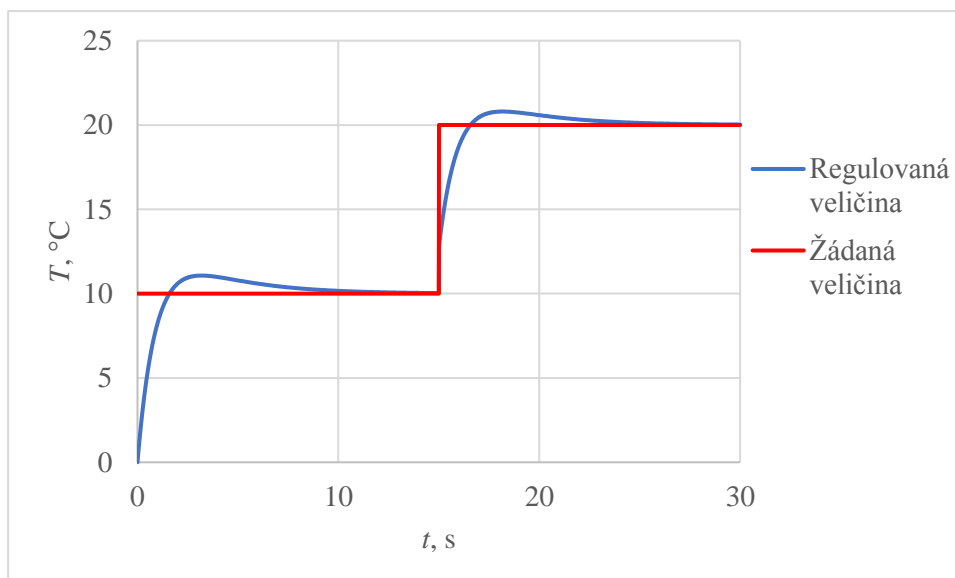


Obrázek 2.11 – Odezva modelu 3. kroku nastavování parametrů regulátoru

Tabulka 2.4 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru 3. kroku

Zesílení regulátoru	Integrační časová konstanta	Derivační časová konstanta
1,3	0,6	0

- 4) V posledním kroku nastavování parametrů regulátoru je přidána derivační časová konstanta. Derivační časová konstanta je nastavena na desetinu hodnoty integrační časové konstanty. Přidání derivační časové konstanty urychlilo regulační (obrázek 2.12). Je provedeno poslední nastavení parametrů regulátoru (tabulka 2.5), zesílení regulátoru je zvýšeno o 25 % a integrační časová konstanta je snížena o 33 %.



Obrázek 2.12 – Odezva modelu 4. kroku nastavování parametrů regulátoru

Tabulka 2.5 – Nastavené hodnoty parametrů regulátoru
4. kroku

Zesílení regulátoru	Integrační časová konstanta	Derivační časová konstanta
1,6	0,4	0,15

Pomocí metody pokus – omyl jsou nastaveny parametry PID regulátoru a je dosaženo regulačního pochodu, který vyhovuje požadavkům na tepelnou soustavu.

2.3 APLIKACE ŘÍDICÍ TEPELNOU SOUSTAVU

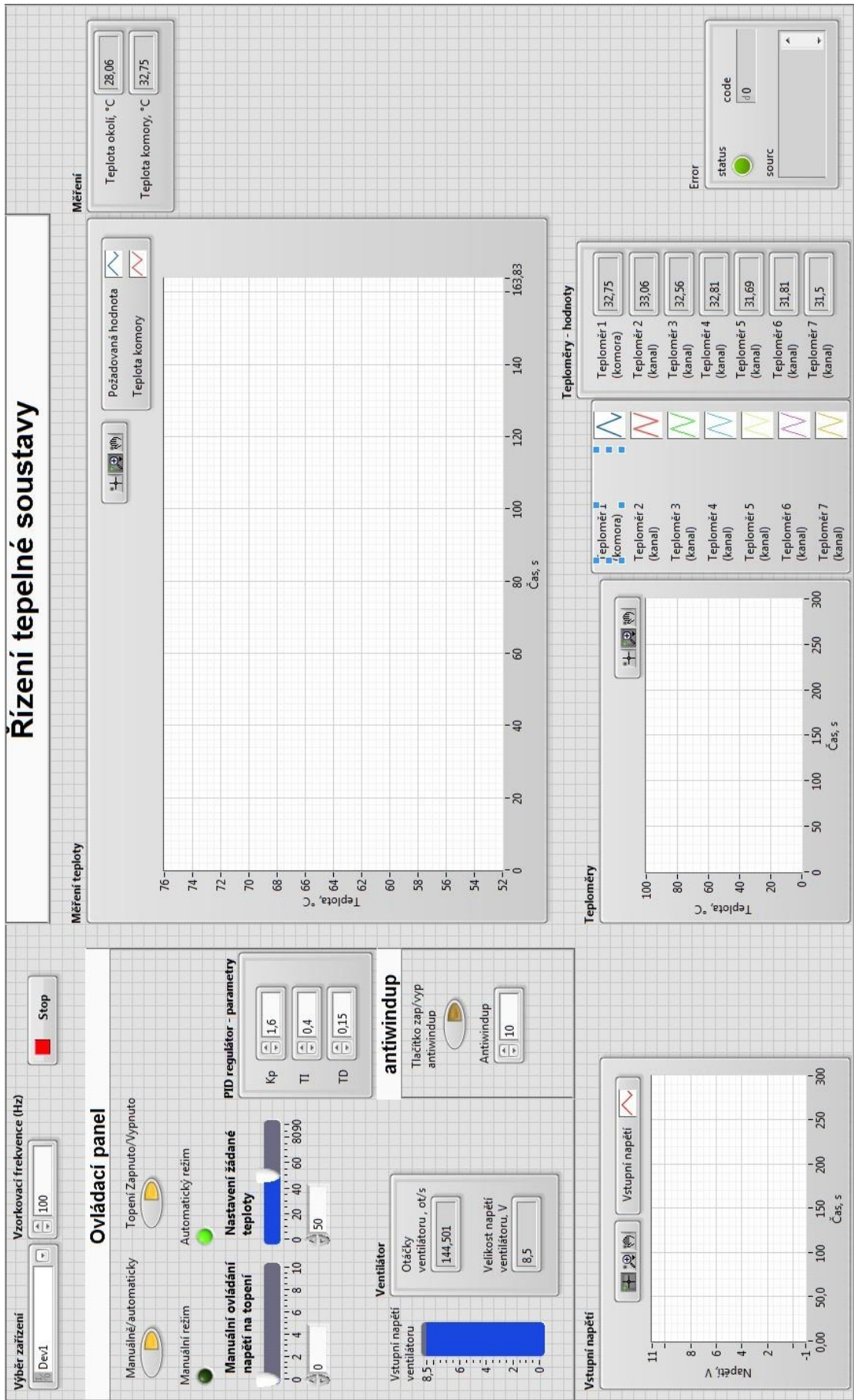
Aplikace řídicí laboratorní tepelnou soustavu QNET 2.0 HVAC je důkladně popsána. Aplikace je vytvořena v prostředí LabVIEW s použitím nástrojů knihovny Control Design and Simulation Module. Jsou popsány prvky čelního panelu a je objasněno ovládání aplikace. Dále je popsán samotný blokový diagram.

Princip aplikace spočívá v čtení či zapisování dat na pracovní stanici NI ELVIS II+ pomocí bloků systému DAQmx. Je vytvořen PID regulátor a jsou otestovány parametry PID regulátoru určené pomocí simulace modelu v kapitole 2.2.3.

Blokový diagram je z části vnořený do bloku Control & Simulation Loop, z důvodu použití funkcí, které poskytuje knihovna Simulation.

2.3.1 Čelní panel

Čelní panel na obrázku 2.13 zprostředkovává uživateli vizualizaci aplikace. Hlavním úkolem je vytvoření čelního panelu způsobem, který umožňuje uživateli ovládat aplikaci pro řízení tepelné soustavy bez nutnosti znalosti vývojového prostředí LabVIEW.



Obrázek 2.13 – Čelní panel aplikace

Čelní panel má následující prvky:

1. výběr připojeného zařízení,
2. nastavení vzorkovací frekvence,
3. tlačítko pro ukončení běhu aplikace,
4. tlačítko pro zapnutí či vypnutí topení,
5. tlačítko pro manuálního či automatického režimu řízení,
6. tlačítko pro zapnutí či vypnutí anti-windupu,
7. indikace vybraného způsobu řízení,
8. posuvník pro nastavení žádané hodnoty teploty,
9. nastavitelné parametry PID regulátoru,
10. nastavitelná hodnota pro anti-windup,
11. posuvník pro nastavení velikosti napětí na topení,
12. posuvník pro nastavení velikosti napětí ventilátoru,
13. zobrazení teploty na jednotlivých teplotních snímačích,
14. zobrazení otáček ventilátoru,
15. graf průběhu vstupního napětí,
16. graf průběhu teploty v komoře a žádané teploty,
17. graf průběhů teplot v topném kanálu,
18. okno chybových hlášení.

2.3.2 Obsluha aplikace

Před spuštěním aplikace je nutné tepelnou soustavu a pracovní stanici připravit. Tepelná soustava musí být zapojena PCI konektorem do pracovní stanice a do tepelné soustavy musí být přiveden napájecí jack. Pracovní stanice musí být připojena k napájení, a také musí být pomocí USB kabelu připojena k PC. Poté je možné zapnout pracovní stanici pomocí tlačítka a zapnutí tepelné soustavy tlačítkem. Při správně fungující komunikaci mezi PC a tepelnou soustavou by se měla rozsvítit LED dioda „USB READY“. Dále je nutné zkontrolovat stavové LED diody. Pokud všechny kontrolky (+15, -15, +5, External Power) svítí zeleně, tak je stanice korektně připojena k tepelné soustavě a je možné přejít ke spuštění aplikace.

Aplikace je vytvořena tak, aby uživatel připojil tepelnou soustavu k PC pomocí USB a pouze vybral, na kterém USB portu je zařízení připojeno.

Nejdůležitějším ovládacím prvkem a úkolem aplikace je řízení teploty v topné komoře. Teplotu je možné řídit manuálně pomocí změny napětí na topení či automaticky pomocí

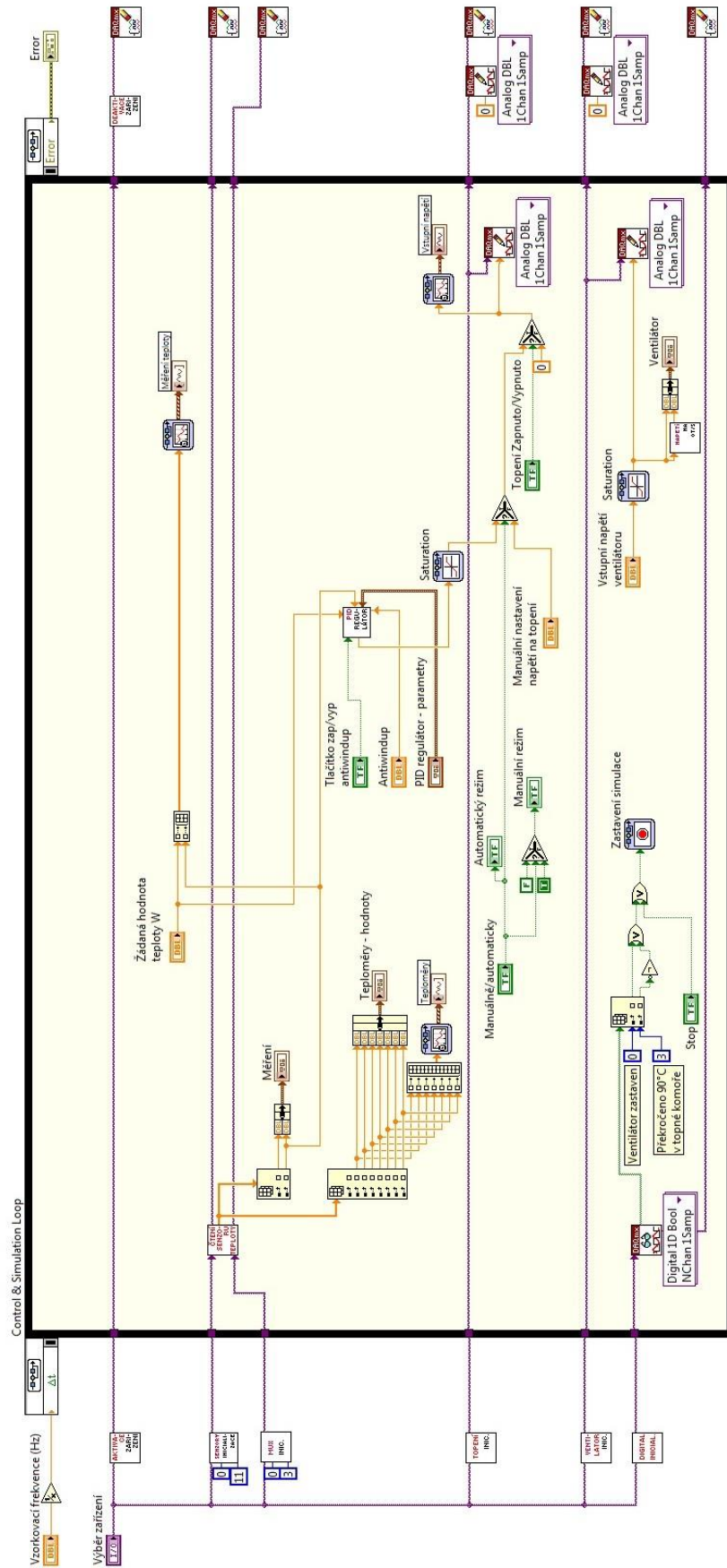
akčního zásahu PID regulátoru. PID regulátor má nastavitelné parametry (zesílení, integrační časová konstanta, derivační časová konstanta). Průběhy žádané hodnoty, regulované veličiny, jednotlivých teplot na snímačích teploty a velikosti napětí na topení jsou vykresleny do grafů. Všechny hodnoty teplot na snímačích jsou zobrazeny na čelním panelu.

Aplikace také umožňuje ovládání otáček ventilátoru pomocí změny velikosti přivedeného napětí.

Aplikace umožňuje změnu vzorkovací frekvence simulace. Dalším ovládacím prvkem je tlačítko vypínání či zapínání topení. Aplikace umožňuje přepínání mezi manuálním a automatickým režimem pomocí tlačítka, stav je indikován pomocí LED diod. Bezpečnostním ovládacím prvkem simulace je samotné ukončení simulace.

2.3.3 Blokový diagram

Blokový diagram na obrázku 2.14 čte data z pracovní stanice (měření teploty, rychlost otáček ventilátoru) s kterými dále pracuje (počítá akční zásah) a pomocí ovládacích prvků provádí dané operace.



Obrázek 2.14 – Blokový diagram aplikace

Pro sběr dat získaných při měření a generování fyzikálních signálů z pracovní stanice je využito systému DAQ. Každý měřený signál lze zpracovávat a vyhodnocovat z hlediska několika informací:

- stavu (analogový signál, digitální signál),
- rychlosti (průběh vzestupné nebo sestupné hrany),
- úrovně,
- tvaru.

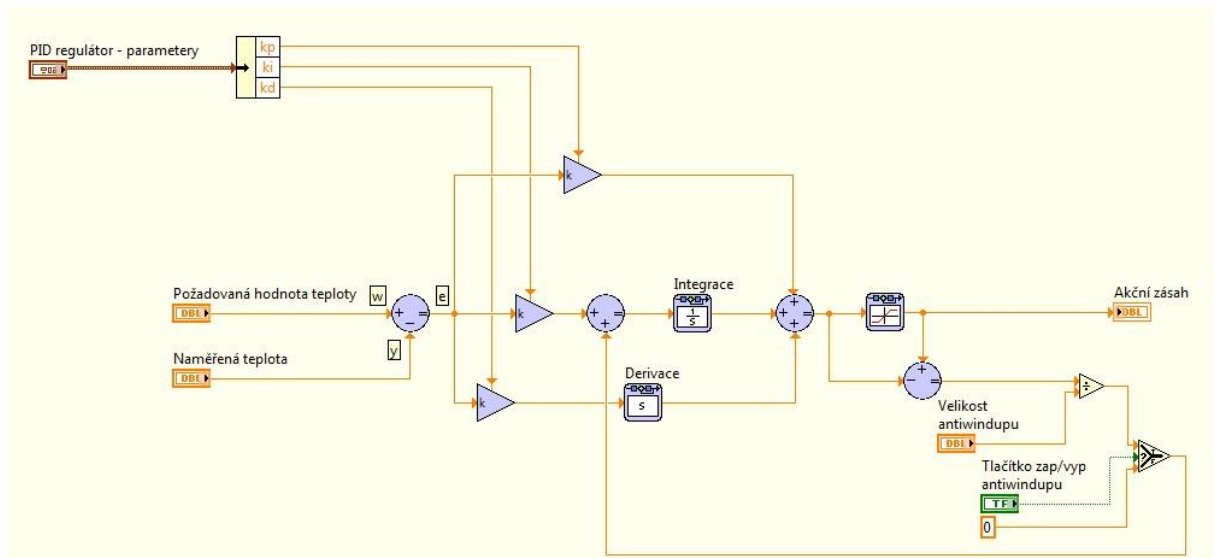
Prostředí LabVIEW počítá s tím, že se signály přivádějí do počítače nebo z něj vedou prostřednictvím měřicí karty s využitím potřebného programového nástroje (ovladače), který současně provede nastavení zařízení a jeho datových kanálů. Ovladač pro zařízení DAQ firmy National Instruments se nazývá NI-DAQmx (Vlach, 2008, s. 180).

Blokový diagram začíná blokem „Zařízení“, který slouží k výběru USB portu, na kterém se nachází laboratorní tepelná soustava. Na tento blok jsou navázány bloky systému DAQmx, jejichž účelem je inicializovat komunikaci se zařízením. Jednotlivé systémy DAQmx jsou nastaveny na porty, které jsou přiřazené k určitým periferiím laboratorní tepelné soustavy.

Například pro řízení napětí na topení či ventilátoru je pomocí „DAQmx Create Virtual Channel“ vytvořen analogový výstup na určitém portu a pomocí bloku „DAQmx Write Analog“ je na daný port přiváděn analogový signál. Velikost analogového signálu v případě topení se odvíjí od akčního zásahu regulátoru nebo manuálně nastaveného napětí pomocí jezdce, napětí na ventilátoru se řídí pouze nastavením hodnoty na jezdci.

Pro čtení teploty z teplotních čidel jsou inicializovány digitální výstupy a následně je pomocí bloku „DAQmx Read Digital“ čtena hodnota z teplotních čidel. Hodnota z teplotních čidel je vynásobena velikostí rozlišení teplotních čidel (rozlišení = 0,065), aby byla dosažena skutečná hodnota teploty ve stupních celsia. Informace o převodu digitálního výstupu z teploměřů na stupně celsia dostupné na (MCP9800/1/2/3).

PID regulátor na obrázku 2.15 je realizován blokovým zapojením jednotlivých složek (zesílení regulátoru, integrační časová konstanta, derivační časová konstanta). Regulační odchylka je rozdílem regulované veličiny od žádané veličiny teploty. Na základě tohoto rozdílu PID regulátor určuje akční zásah (změnu velikosti napětí na topení). Dále je na PID regulátoru přidán tzv. anti-windup, který je možné zapnout či vypnout a nastavit velikost anti-windupu.



Obrázek 2.15 – PID regulátor aplikace

Blokový diagram je doplněn logickými funkcemi, které ovládají či omezují regulační pochod tepelné soustavy, jako například:

- možnost zapnout či vypnout anti-windup,
- výběr mezi manuálním či automatickým režimem,
- indikace manuálního a automatického režimu,
- možnost zapnutí či vypnutí topení,
- tlačítko pro zastavení aplikace,
- kontrola překročení maximální teploty v topné komoře (90 °C),
- kontrola zastavení ventilátoru.

2.3.4 Měření statické charakteristiky a odezvy tepelné soustavy

Pomocí manuální změny napětí na topení je naměřena statická charakteristika (obrázek 2.16) a je zjištěna závislost teploty v topné komoře na napětí.

Tabulka 2.6 – Měření teploty při změně napětí

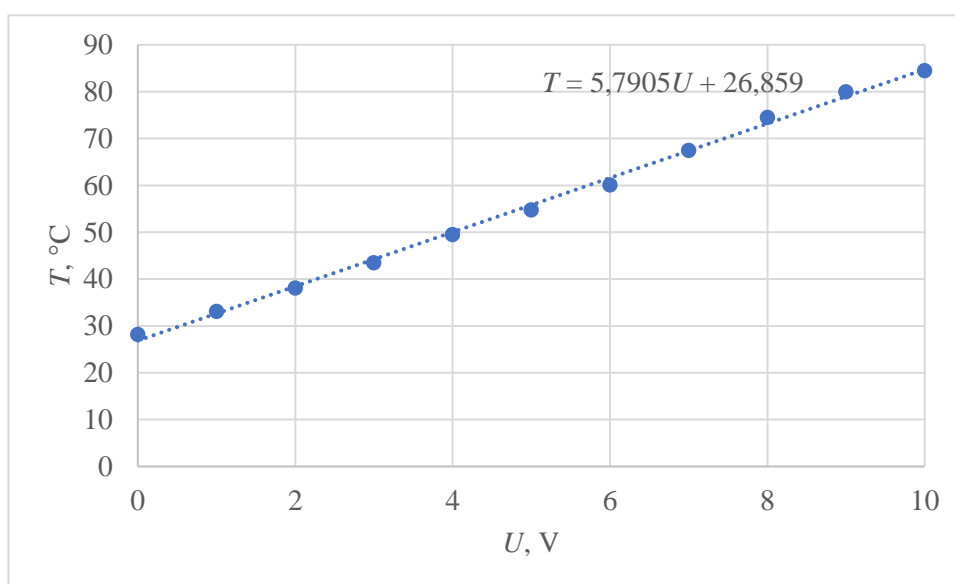
U, V	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T, ^\circ C$	28,2	33,12	38,12	43,5	49,5	54,81	60,12	67,5	74,56	80	84,5

Na základě naměřených dat (viz. tabulka 2.6), s využitím funkce programu Excel (lineární spojnice trendů), byl získán vztah mezi napětím U a teplotou v topné komoře T . Ten je popsán vztahem

$$T = 5,7905U + 26,859, \quad (2.3)$$

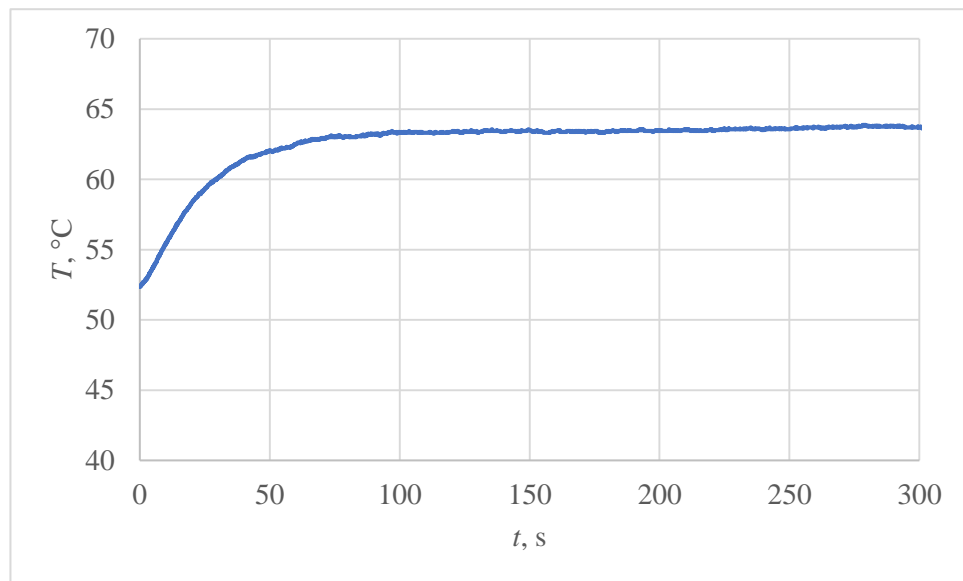
kde T je teplota v topné komoře, $^\circ C$,

U je napětí na topení, V .



Obrázek 2.16 – Statická charakteristika tepelné soustavy

Odezva tepelné soustavy (obrázek 2.17) je naměřena pomocí skokové změny napětí na topení z 4 V na 6 V.



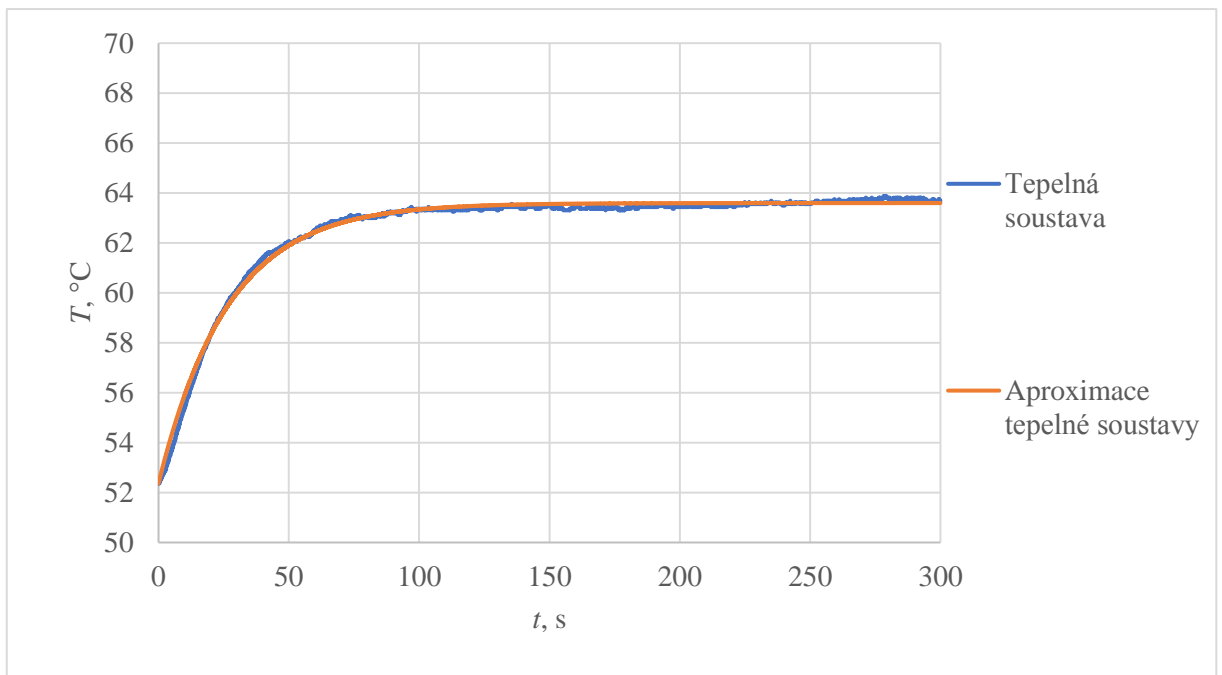
Obrázek 2.17 – Odezva tepelné soustavy

Průběh odezvy tepelné soustavy odpovídá „proporcionálnímu systému 1. řádu“.

Na základě naměřené odezvy tepelné soustavy je pomocí programového prostředí MATLAB za použití funkce „fminsearch“ provedena aproximace odezvy tepelné soustavy a je zjištěn přenos aproximace, který je zapsán vztahem

$$F(s) = \frac{5,614}{26,48s + 1}. \quad (2.3)$$

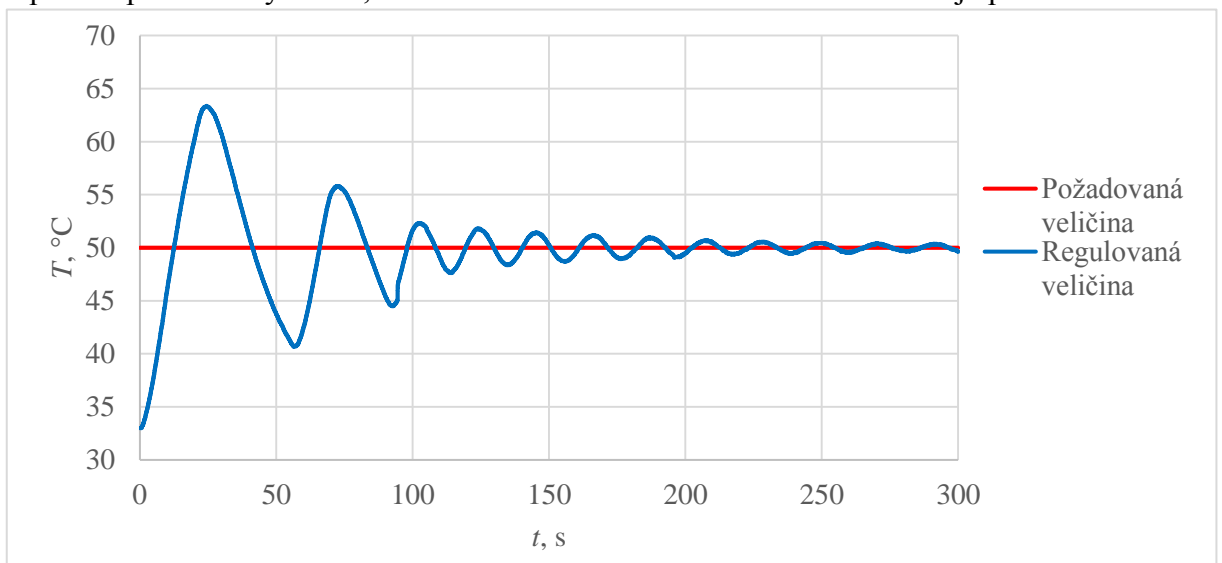
Dále je na obrázku 2.18 vyobrazeno porovnání mezi naměřenou odezvou na skokovou změnu napětí na tepelné soustavě a průběh odezvy aproximace tepelné soustavy.



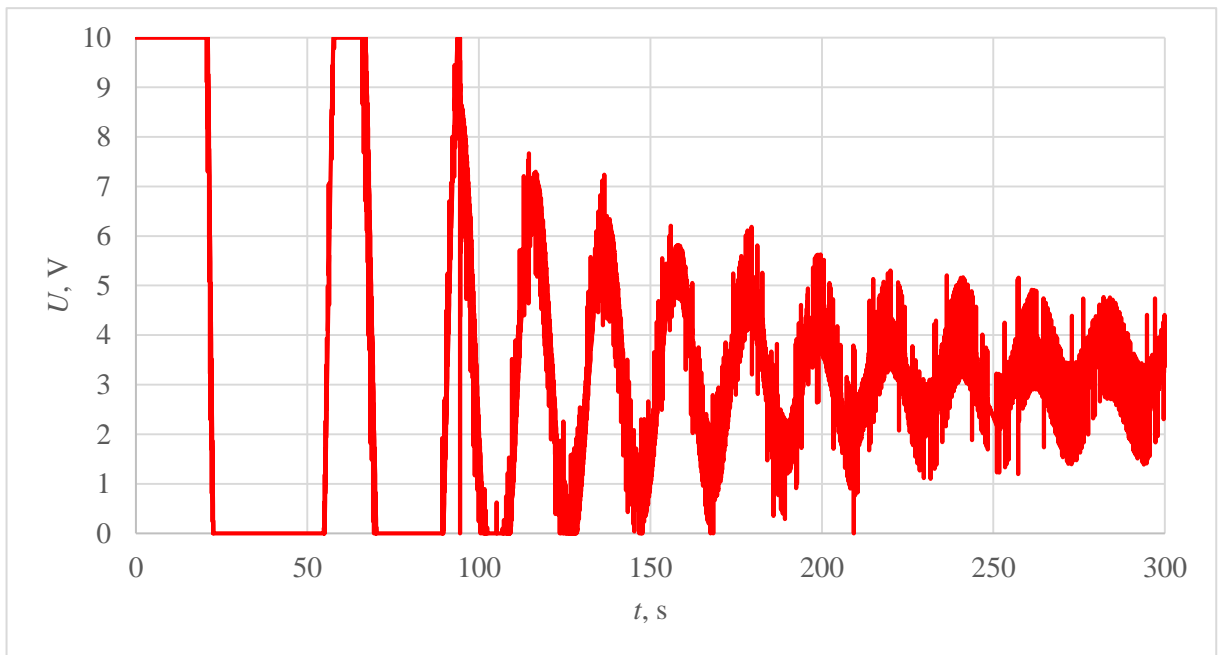
Obrázek 2.18 – Porovnání odezvy tepelné soustavy a aproximace

2.3.5 Regulace tepelné soustavy

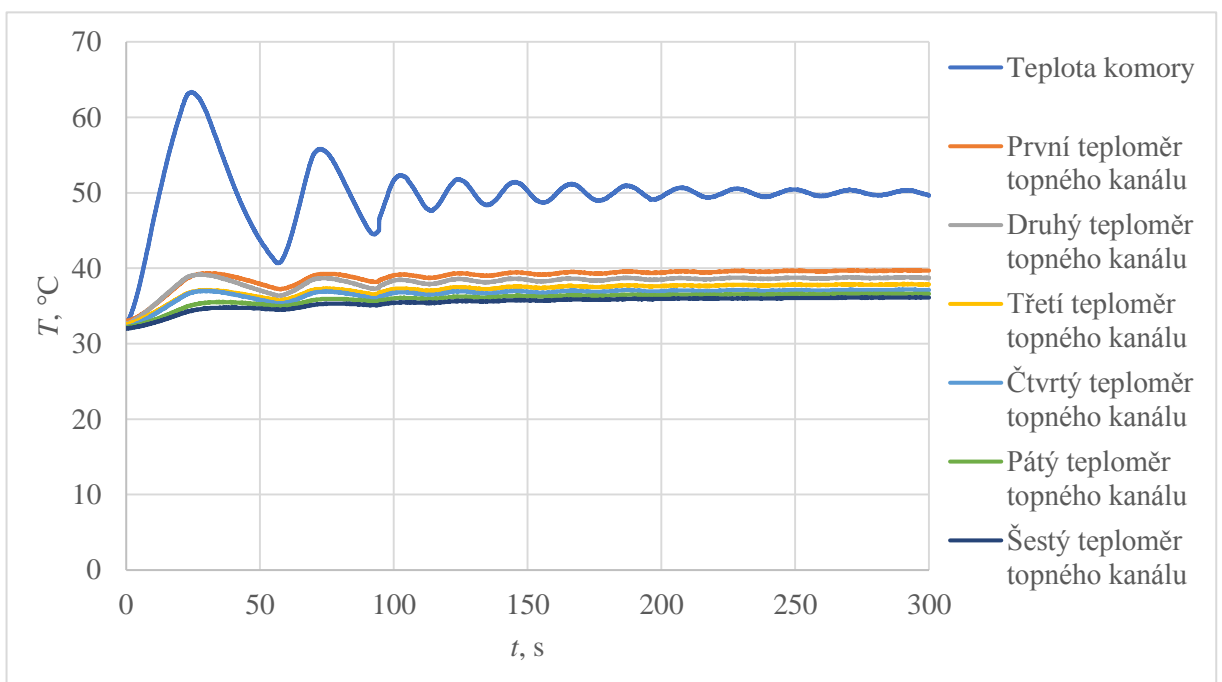
V této kapitole je provedeno nastavení parametrů PID regulátoru na základě zjištěných parametrů pomocí simulace v kapitole 2.2.3. Parametry PID regulátoru použité v aplikaci jsou v tabulce 2.5. S použitím těchto parametrů je provedeno měření. Je nastavena požadovaná teplota topné komory 50 °C, vzorkovací frekvence 100 Hz a čas simulace je pět minut.



Obrázek 2.19 – Odezva tepelné soustavy



Obrázek 2.20 – Průběh akční veličiny



Obrázek 2.21 – Měření teploty na teploměrech

Z průběhu odezvy tepelné soustavy na obrázku 2.19 je vidět, že dochází k častým překmitům regulované veličiny s největším rozdílem od žádané veličiny až 13,37 $^{\circ}\text{C}$. Tento rozdíl je vlivem pokračující integrace tzv. windup integrační složky. V dalším kroku je do regulátoru přidáno opatření proti pokračující integraci tzv. anti-windup. Regulační děj započal s naměřenou teplotou v topné komoře 33 $^{\circ}\text{C}$. K dosažení požadované teploty v topné komoře došlo už po 13 sekundách, ale regulovaná veličina se ustálila až v 220 sekundách na velikosti

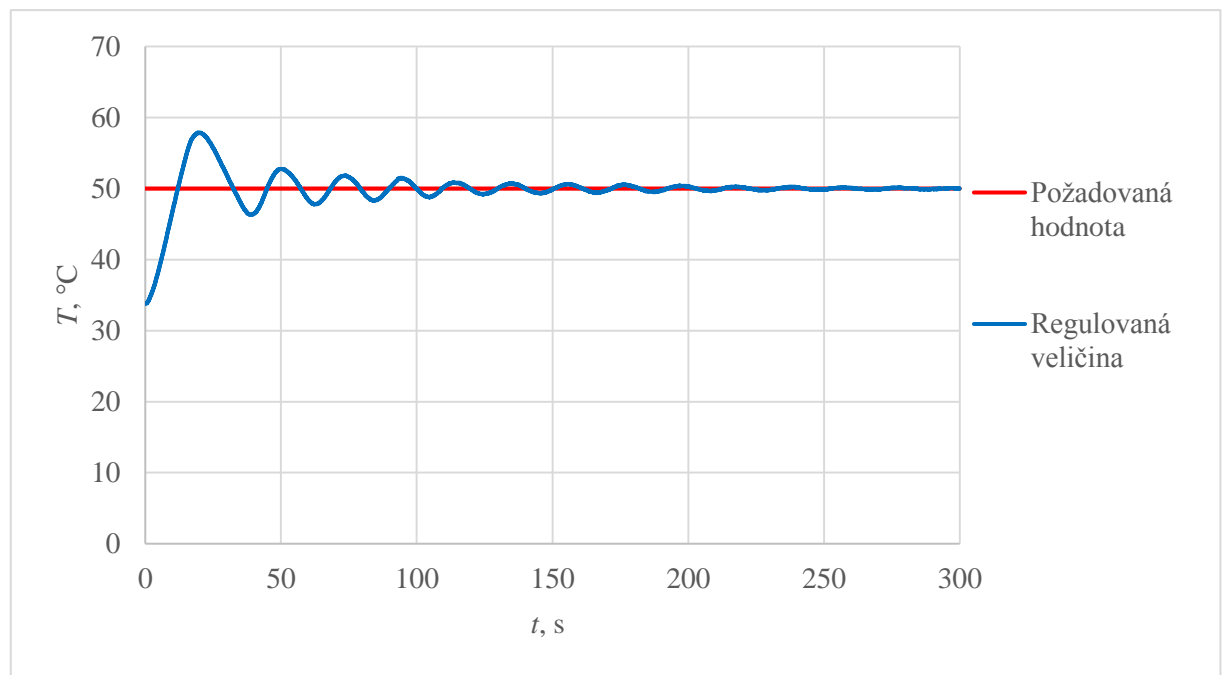
rozdílu regulované veličiny od žádané veličiny $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po pěti minutách regulační pochod překmitává o $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ od žádané veličiny.

Na obrázku 2.20 je vidět průběh akční veličiny PID regulátoru.

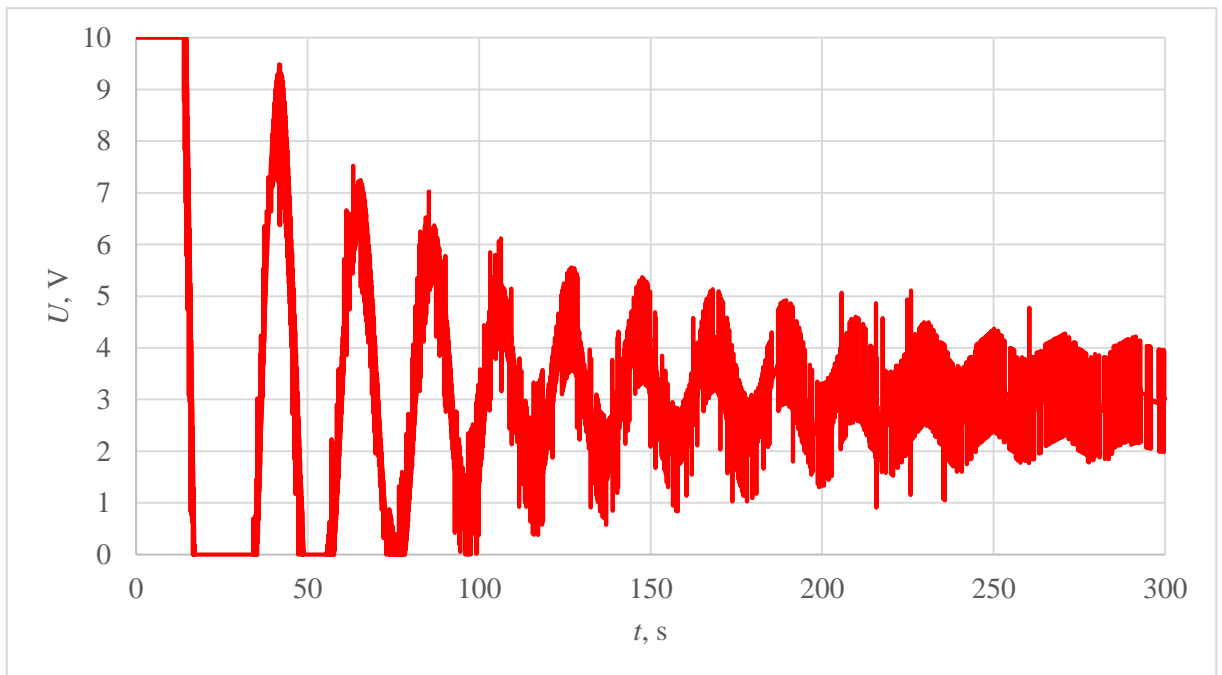
Dále jsou vyobrazeny průběhy teploty na všech teploměrech (obrázek 2.21). Po ustálení regulačního děje je rozdíl mezi topnou komorou a prvním teploměrem topného kanálu $9,93\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mezi prvním a šestým teploměrem topného kanálu je rozdíl $3,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ v naměřených teplotách.

Z průběhu teplot je zřejmé, že dochází k velké ztrátě tepla mezi teploměrem topné komory a teploměry v topném kanálu.

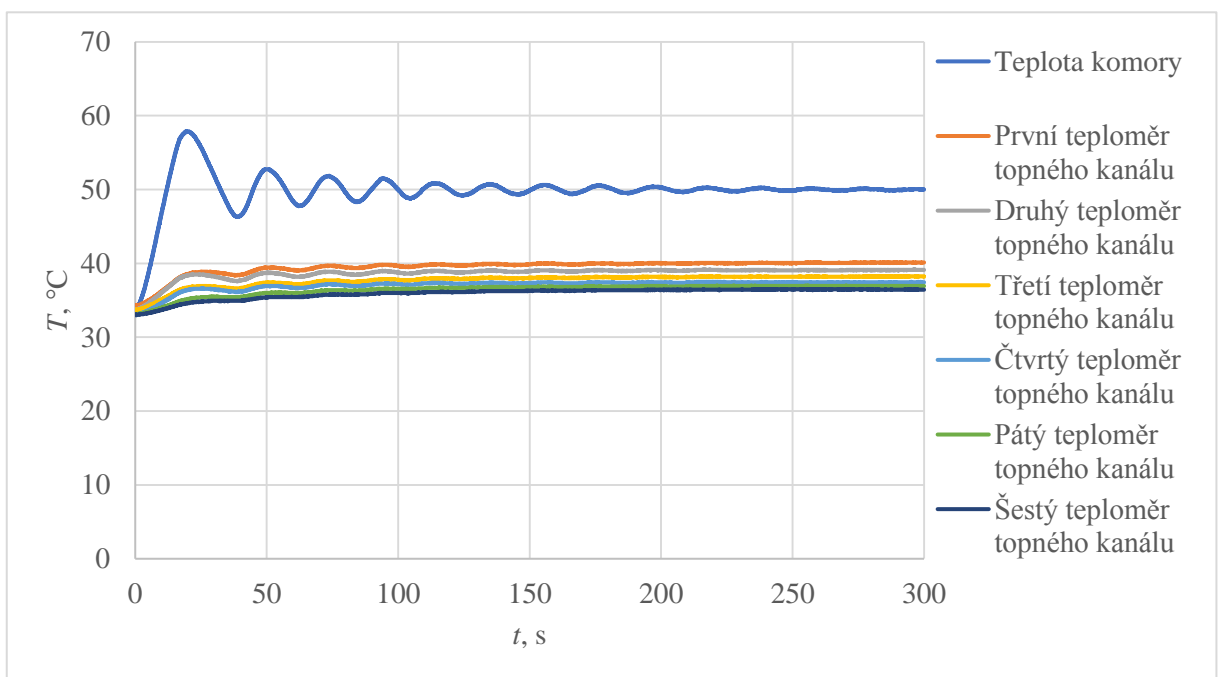
V dalším kroku je do PID regulátoru přidáno opatření proti pokračující integraci za účelem dosažení menších překmitů regulované veličiny od žádané veličiny. Velikost anti-windupu je nastavena na desetinu rozdílu vypočítané regulační odchylky a zrealizované regulační odchylky.



Obrázek 2.22 – Odezva soustavy s přidáním anti-windupu



Obrázek 2.23 – Průběh akční veličiny s přidáním anti-windupu



Obrázek 2.24 – Měření teploty na teploměrech s přidáním anti-windupu

Přidáním anti-windupu je dosaženo urychlení regulačního pochodu, k vidění na obrázku 2.22, a také je dosaženo menších překmitů regulované veličiny s největším rozdílem od žádané veličiny 7,87 °C. Regulační pochod začíná na hodnotě teploty komory 33,81 °C, požadované teploty je dosaženo v 12 sekundách. Regulační veličina se ustálila v 200 sekundách na velikosti rozdílu od žádané veličiny 0,3 °C.

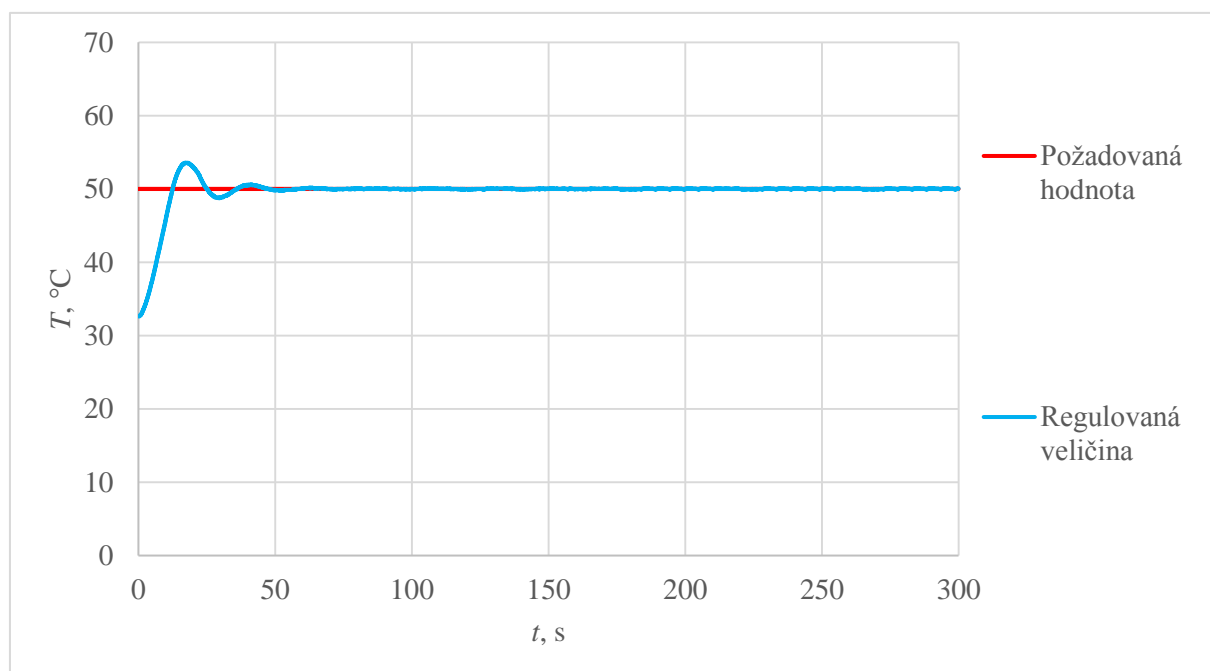
Na obrázku 2.23 je vyobrazen průběh akční veličiny regulátoru. Přidání opatření vůči pokračující integraci také urychlilo reakci akční veličiny na změnu teploty v topné komoře.

Obrázek 2.24 vyobrazuje průběh teplot na všech teploměrech laboratorní tepelné soustavy.

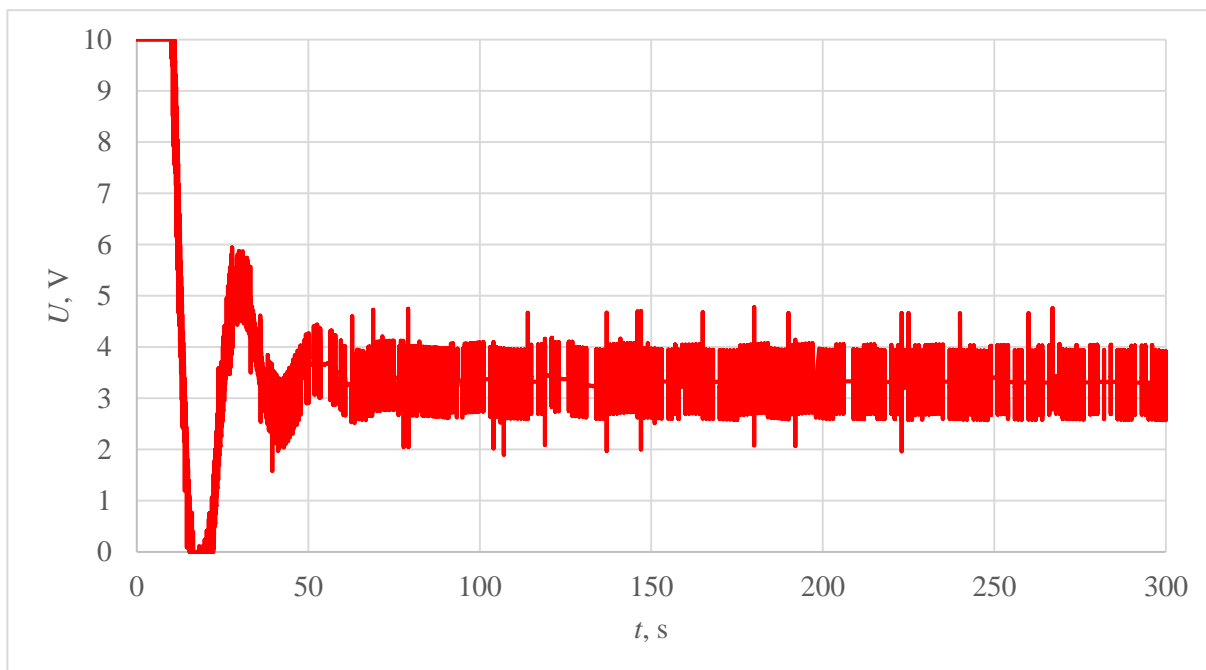
Pro eliminaci překmitů jsou změněny parametry PID regulátoru. Je zmenšena integrační časová konstanta polovinu své původní hodnoty a je snížena derivační časová konstanta, změny parametrů PID regulátoru jsou v tabulce 2.7.

Tabulka 2.7 – Změny parametrů PID regulátoru

Zesílení regulátoru	Integrační časová konstanta	Derivační časová konstanta
1,6	0,2	0,1

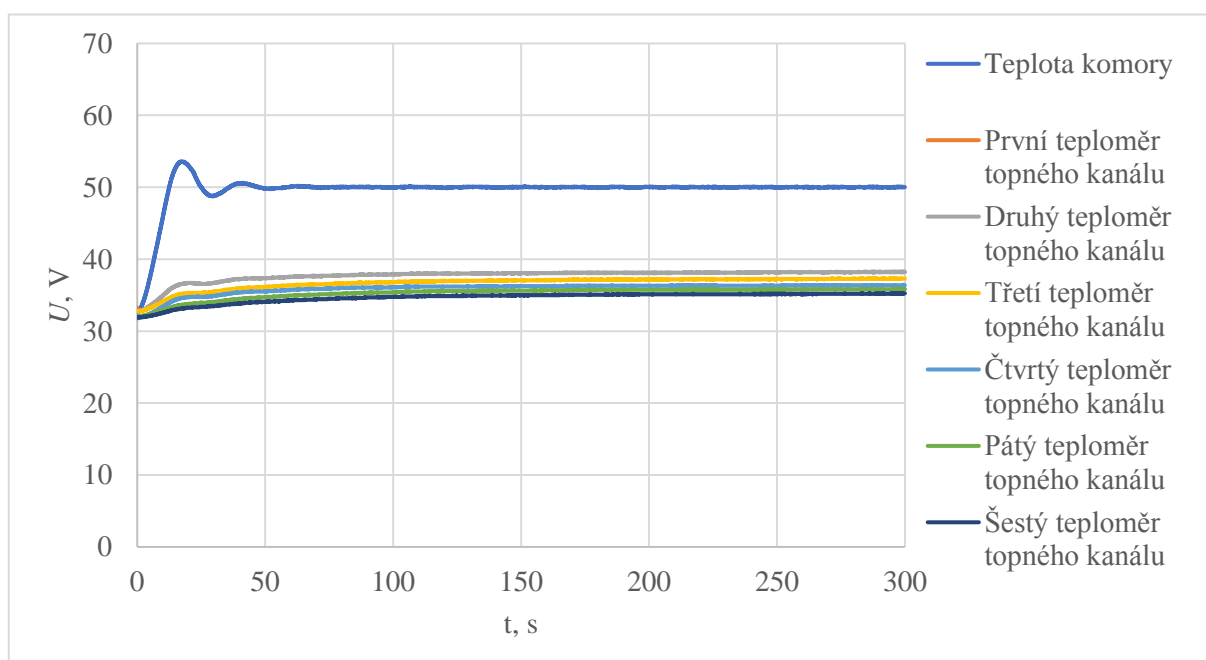


Obrázek 2.25 – Odezva soustavy po změně parametrů



Obrázek 2.26 – Průběh akční veličiny po změně parametrů

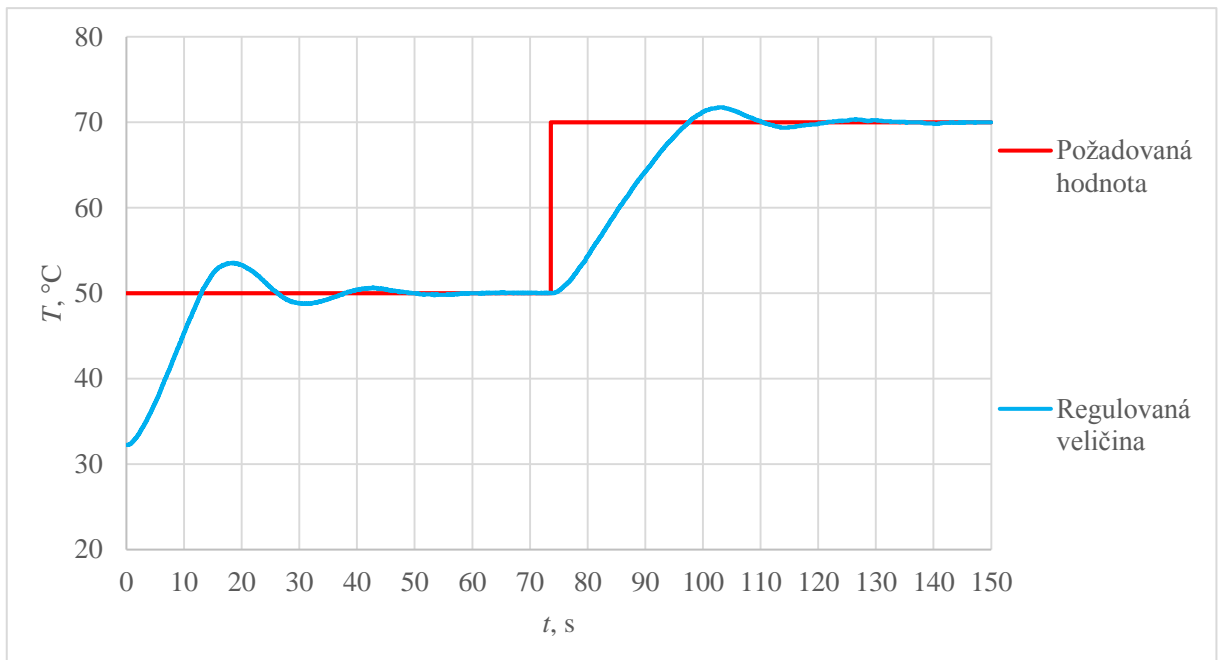
Vlivem integrační složky dochází k překmitům regulované veličiny od žádané hodnoty, tento jev je eliminován zmenšením integrační časové konstanty na polovinu. Regulační pochod se stabilizuje na požadované hodnotě v čase přibližně 50 sekund (obrázek 2.25). Průběh akční veličiny je na obrázku 2.26 a teploty naměřené na všech teploměrech jsou vyobrazeny na obrázku 2.27.



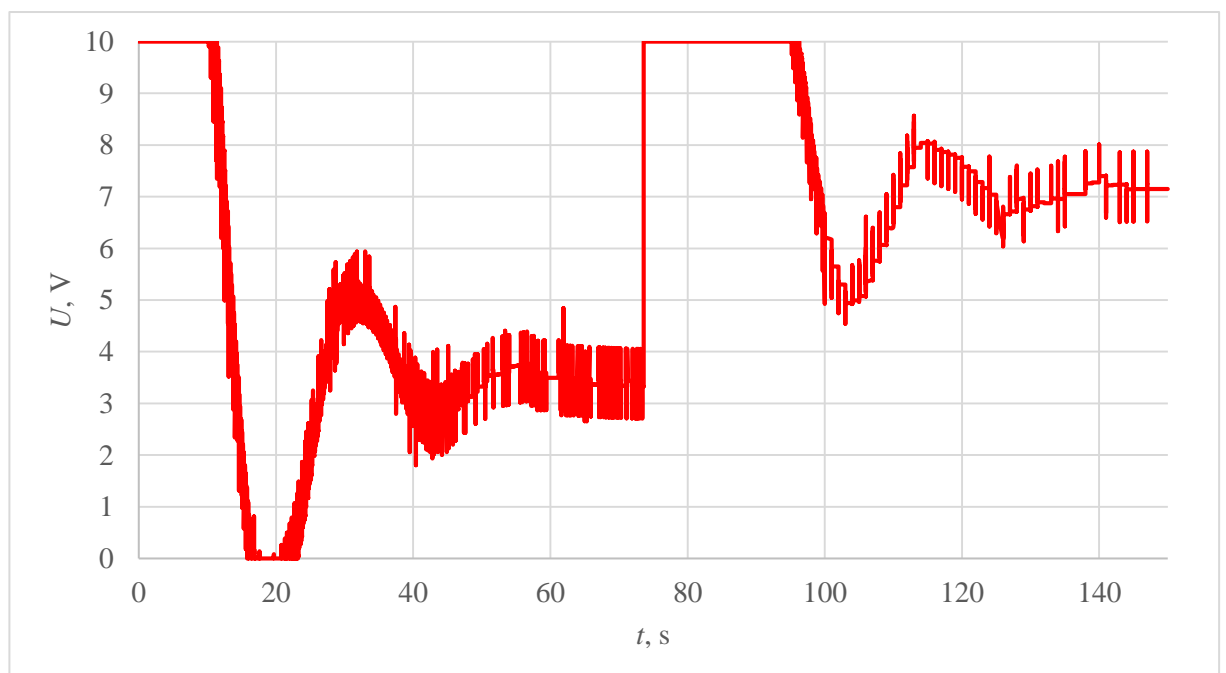
Obrázek 2.27 – Měření teploty na teploměrech po změně parametrů

2.3.6 Skoková změna žádané hodnoty

Je provedeno měření na laboratorní tepelné soustavě na základě skokové změny požadované hodnoty teploty v tepelné komoře. Vzorkovací frekvence simulace je nastavena na 100 Hz a čas simulace je dvě a půl minuty. Skoková změna požadované hodnoty je realizována změnou žádané hodnoty z 50 °C na 70 °C v čase 75 sekund.



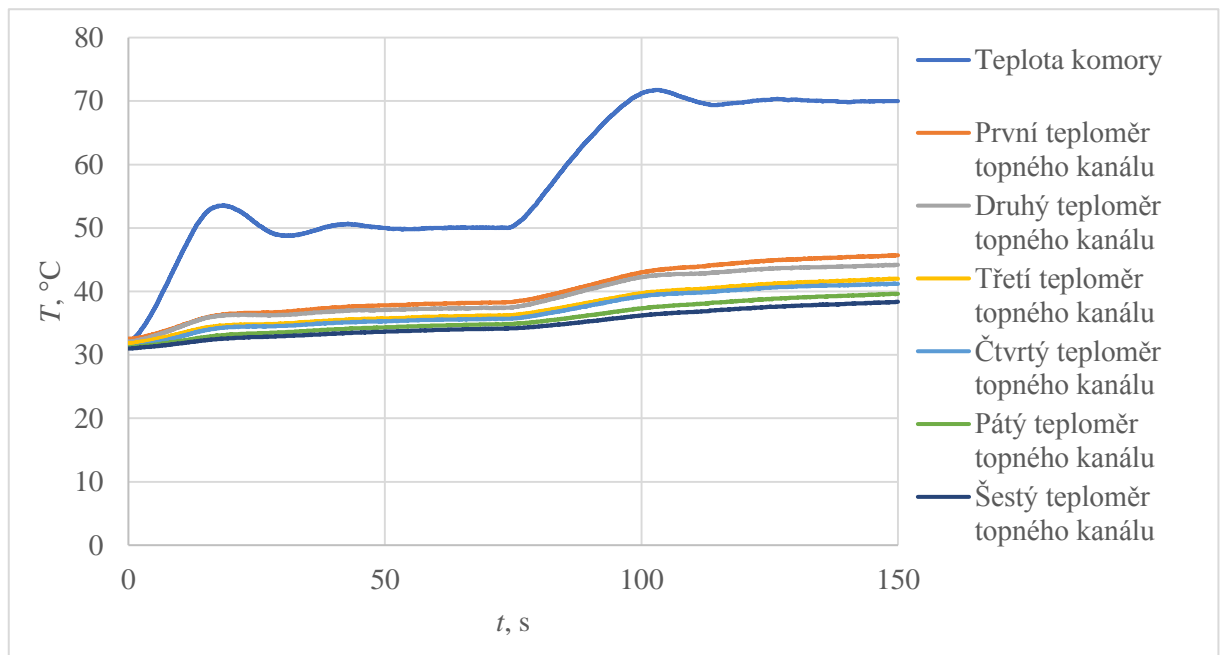
Obrázek 2.28 – Odezva soustavy při skokové změně



Obrázek 2.29 – Průběh akční veličiny při skokové změně

Měření skokové změny na laboratorní tepelné soustavě je skoková změna dosažena změnou požadované teploty z 50 °C na 70 °C v čase 75 sekund. Průběh odezvy soustavy na skokovou změnu žádané hodnoty je na obrázku 2.28. Požadovaná teplota 50 °C je dosažena v čase 13 sekund. Teplota v topné komoře se ustálí na požadovaných 50 °C v čase 50 sekund. Při skokové změně teploty je žádané teploty dosaženo po 20. Teplota se ustálí na požadované hodnotě v čase 125 sekund.

Na obrázku 2.29 je vidět průběh akční veličiny PID regulátoru.

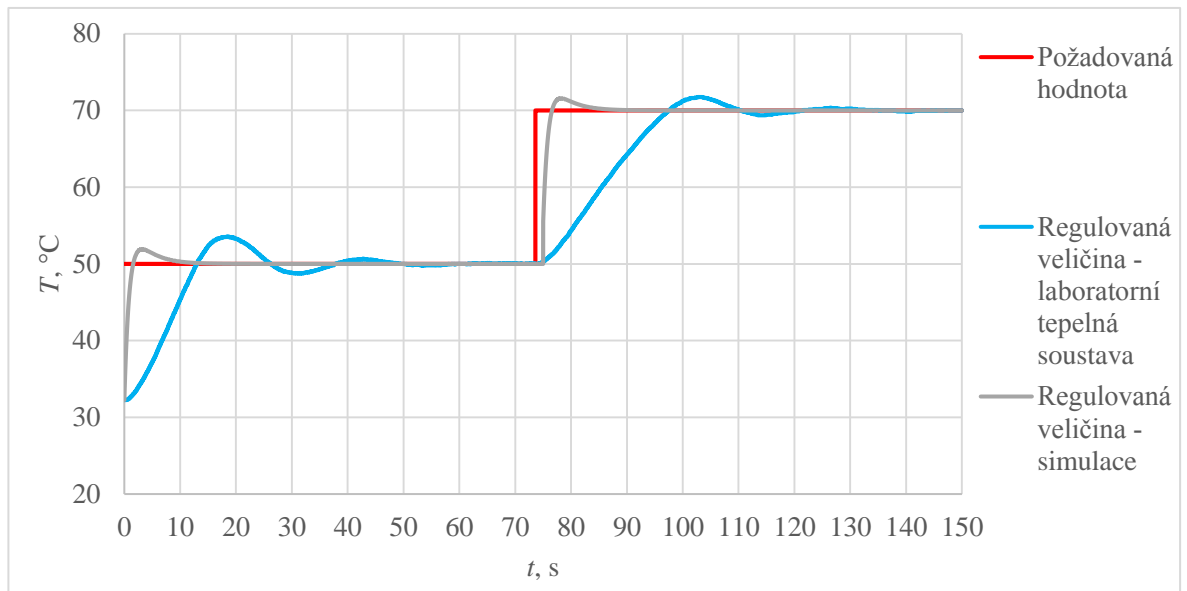


Obrázek 2.30 – Měření teploty na teploměrech při skokové změně

Obrázek 2.30 je vyobrazuje průběh teplot na všech teploměrech laboratorní tepelné soustavy.

2.3.7 Porovnání simulace s laboratorní tepelnou soustavou

Porovnání simulace tepelné soustavy s laboratorní tepelnou soustavou je provedeno na základě průběhů teploty při skokové změně žádané hodnoty z 50 °C na 70 °C.



Obrázek 2.31 – Porovnání odezvy jednotlivých soustav

Na obrázku 2.31 jsou vyobrazeny odezvy soustav, které porovnávají simulaci a reálnou tepelnou soustavu, je zřejmé, že průběh regulované veličiny simulace dosáhne požadované hodnoty teploty v mnohem kratším čase než průběh regulované veličiny laboratorní tepelné soustavy. Regulovaná veličina simulace má pouze jeden překmit, poté se ustálí na velikosti požadované hodnoty na rozdíl od regulované veličiny laboratorní soustavy, které trvá 50 sekund, než se ustálí na požadované hodnotě.

3 ZÁVĚR

Hlavním cílem je vytvoření aplikace pro ovládání a řízení tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC s použitím grafického prostředí LabVIEW.

Je popsáno grafické prostředí LabVIEW, rozšiřující modul prostředí LabVIEW Control Design and Simulation Module a způsoby zpětnovazební regulace. Je stručně uveden způsob práce s grafickým prostředím LabVIEW, ze kterého vyplývají výhody virtuální instrumentace. Je popsán rozšiřující modul Control Design and Simulation Module a možnosti, které sebou přináší. Dále je popsáno řízení, jsou uvedeny rozdíly mezi ovládáním a regulací, je popsán PID regulátor a metody nalezení parametrů PID regulátoru.

Práce obsahuje podrobný popis laboratorní soustavy QNET 2.0 HVAC, je vytvořen model tepelné soustavy a je vytvořena aplikace pro ovládání laboratorní tepelné soustavy QNET 2.0 HVAC. Model tepelné soustavy je vytvořen s pomocí grafického prostředí LabVIEW s využitím rozšiřujícího modulu Control Design and Simulation Module na základě znalosti přenosu soustavy. Pomocí přechodové charakteristiky modelu tepelné soustavy je určeno, že se jedná o integrační soustavu nultého řádu. Pomocí modelu je proveden návrh PID regulátoru a pomocí metody pokus – omyl jsou nalezeny parametry PID regulátoru.

V praktické části je vytvořena softwarová aplikace pro laboratorní tepelnou soustavu QNET 2.0 HVAC, pomocí které je možné ovládat topení a v reálném čase zobrazovat velikosti teplot. Pomocí měření je určena závislost teploty na napětí a je identifikována tepelná soustava. Je provedeno nastavení parametrů PID regulátoru laboratorní tepelné soustavy. Na konec je provedeno porovnání simulace s reálnou laboratorní soustavou. Aplikace může sloužit jako ukáзка řízení teploty a šíření tepla pomocí proudění.

Jedním z možných bádání je vytvoření přesnějšího modelu tepelné soustavy. Dalším možným bádáním na laboratorní soustavě QNET 2.0 HVAC je zdokonalení regulačního děje. Jedna z možností je návrh jiného regulačního obvodu či použití jiné metody nastavení parametrů regulátoru.

POUŽITÁ LITERATURA

- AUTOMA: časopis pro automatizační techniku*, 2009. © FCC Public s.r.o., **15**(3). ISSN 1210-9592. Dostupné také z: <http://www.automa.cz/>
- BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-730-0020-2.
- DELTA, b.r. BFB 40x40x10 MM SERIES. *DELTA* [online]. © Delta Electronics Inc. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://www.delta.com.tw/product/cp/dcfans/download/pdf/BFB/BFB40x40x10mm.pdf>
- MCP9800/1/2/3: 2-Wire High-Accuracy Temperature Sensor, b.r. In: *Microchip* [online]. © 2010 Microchip Technology Inc. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21909d.pdf>
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2003. LabVIEW™: Simulation Interface Toolkit User Guide. *National Instruments* [online]. © National Instruments Corporation [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370420b.pdf>
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2008. LabVIEW™: Control Design User Manual. *National Instruments* [online]. © National Instruments Corporation [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371057f.pdf>
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2009a. Simulation VIs and Functions: LabVIEW 2009 Control Design and Simulation Module Help. *National Instruments Corporation* [online]. © National Instruments [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371894D-01/lvsim/simulation/>
- NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, 2009b. LabVIEW™: PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual. *National Instruments* [online]. © National Instruments Corporation [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372192d.pdf>
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2010. System Identification Toolkit: Plant Modeling Based on Real-World Signals. *National Instruments* [online]. © National Instruments Corporation [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_lvSIT.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, 2011. NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVISTM II Series) User Manual. *National Instruments* [online]. © National Instruments Corporation [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374629c.pdf>
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2018. LabVIEW 2018 Control Design and Simulation Module Readme. *National Instruments* [online]. © 2019 National Instruments Corporation [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375312d.html>
- PECHOUŠEK, J. 2004. *Základy programování v prostředí LabVIEW*. Olomouc: Univerzita Palackého. ISBN 80-244-0800-7.
- QUANSER, b.r. QNET 2.0 HVAC BOARD. *Quanser: Innovate Educate* [online]. © 2019 Quanser [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/qnet-2-0-hvac-board/#overview>
- QUANSER, b.r. QNET-HVAC-Board-v2.0-600x400.jpg. In: *Quanser: Innovate Educate* [online]. © 2019 Quanser [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/wp-content/uploads/2017/03/QNET-HVAC-Board-v2.0-600x400.jpg>

- QUANSER INC., 2014. *STUDENT WORKBOOK: QNET 2.0 HVAC Board for NI ELVIS*. Ontario, Markham: © 2014 Quanser Inc.
- ŠVARC, I. 2002. *Automatizace: automatické řízení*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2087-1.
- VÍTEČKOVÁ, M.; VÍTEČEK, A. 2011. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. ISBN 978-80-248-2503-8.
- VLACH, J.; HAVLÍČEK, J.; VLACH, M. 2008. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-245-9.

PŘÍLOHY

A - CD

Příloha k bakalářské práci

Řízení tepelné soustavy

Radek Mandík

CD

Obsah

- 1 Text bakalářské ve formátu PDF
- 2 Zdrojový kód aplikace