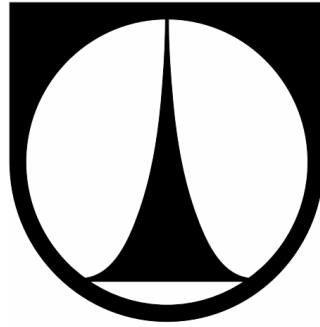


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**Úloha s tepelným tokem řízená pomocí  
PAC Rockwell a PC**

Diplomová práce

Liberec 2012

Bc. Jaroslav Antoš

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1802T007 – Informační technologie

## **Úloha s tepelným tokem řízená pomocí PAC Rockwell a PC**

## **Heat Flow Experiment Controlled by PAC Rockwell and PC**

Diplomová práce

Autor: Bc. Jaroslav Antoš  
Vedoucí práce: Ing. Petr Mrázek, Ph.D.  
Konzultant: Ing. Jan Koprnický, Ph.D.

V Liberci 3. ledna 2012



ORIGINÁL ZADÁNÍ (PRVNÍ STRANA)



ORIGINÁL ZADÁNÍ (DRUHÁ STRANA)



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

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

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:



## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu práce Ing. Petru Mrázkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, inspiraci a cenné náměty pro zpracování celé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Koprnickému, Ph.D. za odbornou pomoc, poskytnutí podmínek pro měření a pečlivou korekturu textu práce. Také bych rád poděkoval rodině za podporu během studia.



## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá experimentem s tepelnou komorou. Realizováno je řízení pomocí programovatelného automatu od společnosti Rockwell Automation v kombinaci s vývojovým prostředím RSLogix 5000. Druhý typ zapojení je uskutečněn pomocí počítačové karty PCI-1711 Advantech a softwarovým prostředím Matlab Simulink. Pro oba typy zapojení jsou použity dvoupolohové, proporcionální a proporcionálně-integrační struktury regulátoru. Řešen je *anti-windup* mechanismus a optimalizace parametrů regulátoru. V jednotlivých kapitolách jsou popsány prostředky automatického řízení, experiment s tepelnou komorou, implementace reálného modelu a realizace řízení pomocí programovatelného automatu a počítačové karty. Závěr práce je věnován vytvoření vzorové úlohy pro účely výuky.

## KLÍČOVÁ SLOVA

PAC, PC karta, regulace teploty, *windup* efekt, RSLogix, Matlab Simulink.

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with the experiment with a heat chamber. The control by programmable automat from producer Allen-Bradley is implemented in a combination with RSLogix 5000 developmental environment. The second type of connection is realized by a PC card PCI-1711 Advantech and Matlab Simulink software environment. Two-positioned, proportional and proportional-integrational regulator structures are used for both two types. There are solved anti-windup mechanism and optimization of regulator parameters. In individual chapters, there are described devices of automatic control, a description of an experiment with a heat chamber, an implementation of a real model and a realization of a control by programmable automat and a PC card. Conclusion of this thesis is devoted to a creation of a model task for a teaching purpose.

## KEY WORDS

PAC, PC card, temperature regulation, *windup* efekt, RSLogix, Matlab Simulink.



## OBSAH

Prohlášení.....	4
ABSTRAKT .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 PROSTŘEDKY AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ.....	10
1.1 Snímače.....	10
1.1.1 Snímače teploty a tepelného množství.....	11
1.1.2 Odporové snímače teploty .....	11
1.1.3 Umístění snímače teploty.....	12
1.2 Programovatelné automaty .....	13
1.2.1 Typy provedení .....	14
1.2.2 Principy programování .....	14
1.2.3 Používané jazykové prostředky .....	15
1.3 Regulátory.....	18
1.3.1 Dvupolohová regulace .....	18
1.3.2 Spojitá regulace.....	19
1.3.3 Popis spojitého PID regulátoru .....	20
1.3.4 Numerická optimalizace parametrů regulátoru.....	20
2 POPIS EXPERIMENTU S TEPELNOU KOMOROU.....	22
2.1 Tepelná komora .....	22
2.1.1 Komponenty tepelné komory.....	23
2.1.2 Regulační odchylka v ustáleném stavu .....	23
2.2 Modelování tepelných procesů v tepelné komoře .....	24
2.2.1 Skoková změna akční veličiny .....	25
2.2.2 Systém druhého řádu .....	26
2.2.3 Dvupolohová regulace .....	27
2.2.4 Proporcionálně-integrační řízení.....	27
2.2.5 Windup efekt.....	28
3 NÁVRH A IMPLEMENTACE REÁLNÉHO MODELU .....	30
3.1 Propojení programovatelného automatu a tepelné komory .....	30
3.2 Počáteční inicializace experimentu s tepelnou komorou .....	32
3.2.1 Kalibrace senzorů .....	33
3.2.2 Přesnost vzorkování a kvantování .....	33
3.2.3 Měření poklesu teploty na senzorech.....	34
3.2.4 Přepočítání hodnoty vstupu PAC na stupně Celsia.....	35
3.2.5 Přepočítání hodnoty vstupu PAC na otáčky za minutu a objemový tok.....	37
3.2.6 Přepočítání napětí ventilátoru a topné spirály na hodnotu PAC .....	37
3.3 Identifikace soustavy .....	39
3.3.1 Měření statických charakteristik systémů.....	39
3.3.2 Měření přenosu soustavy .....	41
3.3.3 Výpočet dopravního zpoždění .....	42
4 REALIZACE ŘÍZENÍ POMOCÍ AUTOMATU.....	43
4.1 Realizace řídicích algoritmů .....	43
4.1.1 Realizace dvupolohového regulátoru.....	43
4.1.2 Realizace proporcionálního regulátoru .....	44
4.1.3 Návrh modelu s proporcionálně-integračním regulátorem.....	48
4.1.4 Realizace návrhu PI regulátoru pro reálnou soustavu .....	49





4.2	Optimalizace parametrů regulátoru .....	51
4.2.1	Minimalizace lineární plochy s integrálním kritériem.....	52
4.2.2	Minimalizace kvadratické plochy s integrálním kritériem .....	53
4.2.3	Minimalizace kvadratické plochy s vážením akční veličiny .....	55
4.2.4	Porovnání optimalizačních kritérií.....	56
4.3	Ověření optimalizovaného modelu .....	58
4.3.1	Řízení pomocí proporcionálně-integračního regulátoru .....	58
4.3.2	Odezva na poruchovou veličinu .....	59
4.3.3	Řízení pomocí PIDE regulátoru.....	61
4.4	Dynamické omezení integrační složky .....	62
5	REALIZACE ŘÍZENÍ POMOCÍ PC KARTY .....	65
5.1	Počáteční inicializace.....	65
5.2	Porovnání simulované a reálné soustavy .....	66
5.3	Dynamické omezení integrační složky .....	67
5.3.1	Dynamické omezení integrační složky .....	67
5.3.2	Metoda vážení žádané veličiny .....	68
6	VZOROVÁ ÚLOHA PRO ÚČELY VÝUKY .....	70
7	ZÁVĚR .....	72
8	POUŽITÁ LITERATURA .....	74
9	PŘÍLOHY .....	76
9.1	Seznam použitých obrázků .....	76
9.2	Seznam použitých grafů.....	77
9.3	Seznam použitých tabulek .....	77
9.4	Seznam použitých zkratk .....	78
9.5	Obsah přílohy na CD .....	79
9.6	Programovatelný automat Allen-Bradley 1769 L32E .....	79
9.7	Parametry tepelné komory .....	80
9.8	Senzorová kalibrace .....	80
9.9	Tabulka měření statických charakteristik systémů .....	81
9.10	Výpočet přenosu soustavy pro S2 a S3.....	82
9.11	Skripty pro numerickou optimalizaci parametrů regulátoru.....	84
9.12	Schéma pro porovnání reálné a simulované soustavy .....	85
9.13	Použité řídicí a měřicí prostředky .....	87



## ÚVOD

Programovatelné automaty jsou v dnešní době nezastupitelnou součástí v průmyslové oblasti. Setkat se s nimi lze v běžné praxi technického oboru. Přináší také nové možnosti v oblasti automatizace. Vývojem prošly nejen součástky a prostředky pro řízení, ale také softwarové aplikace.

Diplomová práce se zabývá úlohou s tepelným tokem řízeným programovatelným automatem a pomocí počítačové karty. Tepelná komora, ve které experiment probíhá, je od výrobce Quanser Innovate Educata a použitý programovatelný automat Compact Logix L32E od společnosti Rockwell Automation. Zapotřebí je navrhnout a realizovat propojení a poté navrhnout a ověřit softwarovou část.

Prvním bodem zadání je seznámení se s prvky úlohy, kterými jsou použité snímače, programovatelné automaty a řídicí počítačová karta PCI-1711 od výrobce Advantech. V druhém bodu zadání je nutné realizovat vybrané řídicí algoritmy na různých typech zapojení úlohy. Třetí bod se zabývá ověřením funkčnosti zařízení na fyzikálním modelu. Posledním bodem zadání je vytvoření vzorové úlohy pro účely výuky předmětu Prostředky automatického řízení.

Práce je rozdělena do šesti kapitol. První dvě jsou teoretické a zabývají se prvky a látkou použitou v praktické části. Jsou zde nejprve popsány prostředky automatického řízení a poté experiment s tepelnou komorou. Praktická část je rozdělena na tři kapitoly. První se zabývá počátečním návrhem a implementací reálného modelu, další dvě obsahují realizaci řízení tepelné komory pomocí programovatelného automatu a počítačové PCI karty v kombinaci s prostředím Matlab Simulink. Pro řízení jsou použity dvupolohové, proporcionální a proporcionálně-integrační struktury regulátoru. Řešena je optimalizace parametrů regulátoru a ošetření *windup* efektu. Nakonec je v šesté kapitole navrhována vzorová úloha pro účely výuky.



# 1 PROSTŘEDKY AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ

Tato kapitola se zabývá snímači, jako prvky pro získání informace. Dále programovatelnými automaty, které slouží jako prostředek pro řízení. Uvádí jejich typy provedení, principy programování a používané jazykové prostředky. V další části jsou popsány číslicové regulátory, jejich struktury a možnosti optimalizace.

## 1.1 Snímače

Snímač je základní funkční prvek informující o stavu činnosti technického zařízení. Tvoří vstupní blok měřicího řetězce a je v přímém styku s měřeným prostředím. Je někdy označován ekvivalentními pojmy, jako je senzor, převodník či detektor. Snímač transformuje snímanou sledovanou fyzikální či chemickou veličinu na měřicí, nejčastěji elektrickou veličinu. Další variantou jsou snímače, u kterých je neelektrická veličina přímo přeměněna na číslicový signál. Jednou z hlavních částí senzoru je čidlo, které tvoří citlivou část snímače. Náhled na měřicí řetězec je vidět na obrázku 1.1.



**Obr. 1.1 – Blokové schéma měřicího řetězce**

Naměřený a transformovaný elektrický signál se obvykle zesiluje. Při tomto procesu je nutné zajistit odstup signálu od šumu, který vzniká elektrickým rušením či elektromagnetickým polem a ovlivňuje jak senzor, tak i zesilovač. Řešení této situace je speciální zapojení zesilovače a jeho frekvenční omezení signálu. Častým postupem je číslicové zpracování signálu, které vyžaduje A/Č převodník. Tím je umožněno užívání libovolných matematických operací, jako je násobení či derivace nebo zpracování pomocí signálových operací, jako je například číslicová filtrace. Výstup měřicího řetězce může být řešen přímo ukazujícím přístrojem nebo zapisovačem hodnot.

Inteligentní senzor (Smart Sensor) již obsahuje obvody pro zpracování a analýzu signálu v jednom kompaktním provedení. Čidlo s částí elektrických obvodů může být



propojeno optickým vláknem s výpočetní částí senzoru například v situaci, kdy je čidlo vystaveno extrémním podmínkám, jako je teplota či tlak.

Za typické požadavky kladené na snímače lze považovat: jednoznačnou závislost výstupní veličiny na veličině vstupní, přesnost snímače a reprodukovatelnost měření, vhodný tvar statické charakteristiky, nejlépe lineární s velkou strmostí a minimální závislost parazitních vlivů (teplota, vlhkost a vibrace). Do dynamických parametrů lze zahrnout: časovou odezvu, šířku frekvenčního pásma a rychlost. [6], [7]

### 1.1.1 Snímače teploty a tepelného množství

Teplota je fyzikální veličina, která vyjadřuje míru tepelného stavu tělesa a patří do základních jednotek SI. Naproti tomu teplo je forma energie vycházející z neuspořádaného pohybu elementárních částic. V odborných disciplínách jsou tyto pojmy označovány jako tepelné množství a tepelná energie. Pro kvantitativní popis tepelných stavů je nutné jim přiřadit hodnotu a stupnici. Ke stanovení teploty se využívá závislosti určitých fyzikálních veličin na teplotě. Pro měření existují dvě základní stupnice. První je tzv. termodynamická absolutní, známá jako Kelvinova. Má dva základní body, absolutní nulu (0 K) a trojný bod vody (273,16 K při tlaku  $p = 609,8$  Pa). Druhá stupnice je Celsiova. Má také dva základní body, 0 °C pro bod tání a 100 °C pro bod varu. Velikost jednotek obou stupnic je shodná a platí následující vztah:

$$T = \vartheta + 273,15 \text{ [K]} \quad (1.1.1)$$

### 1.1.2 Odporové snímače teploty

Při dotykovém měření teploty se musí senzor ohřát na teplotu snímaného prostoru. Dojde tak k úplnému předání energie a poté lze měřit fyzikální změny na senzoru. Ačkoliv existuje mnoho druhů snímačů, zde budou uvedeny pouze odporové kovové, protože jsou použity v tepelné komoře. Jejich čidlem je měřicí odpor, který převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického odporu. Tuto závislost označuje teplotní součinitel odporu označovaný symbolem  $\alpha$ . Jedná se o poměr změny odporu vztážený na jednotku změny teploty:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta \vartheta} \text{ [K}^{-1}\text{]} \quad (1.1.2)$$



Hodnota součinitele odporu  $\alpha$  je řádu  $10^{-3} K^{-1}$ . Pro platinové materiály je  $\alpha_{Pt} = 0,00385 [K^{-1}]$ , pro ostatní používané materiály je rovna  $\alpha_{Cu} = 0,00426 [K^{-1}]$ ,  $\alpha_{Ni} = 0,00618 [K^{-1}]$ . Stálost hodnoty parametru  $\alpha$  je v co možná největším rozsahu teplot nejdůležitější vlastnost při výběru odporového senzoru. Závislost odporu snímače  $R_v$  na teplotě, kde  $R_0$  je základní odpor při teplotě  $0^\circ C$  a  $\Delta v$  změna teploty, lze vyjádřit následovně:

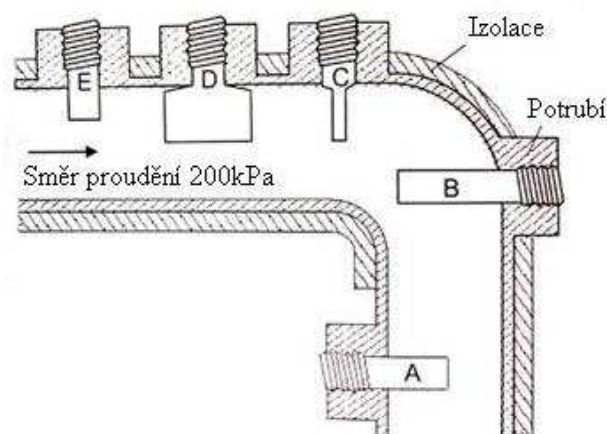
$$R_v = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta v) \quad [\Omega] \quad (1.1.3)$$

Nejpoužívanějšími odporovými kovovými snímači jsou platinové, případně niklové či měděné. Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Základní konstrukční část teploměru tvořená odporem se vyrábí drátkovou, tenkovrstvou nebo tlustovrstvou technologií. Drátkový měřicí odpor je tvořen spirálovitě stočeným platinovým drátkem, který je zataven do keramiky nebo do skla. Teplotní roztažnost platiny je různá od teplotní roztažnosti materiálu použitého pro izolaci. Z těchto důvodů je nejlepší stabilita platinového měřicího odporu při uložení platinové cívky ve vzduchu nebo směsi helia a kyslíku. Standardní hodnota platinového senzoru je  $100 \Omega$  při  $0^\circ C$ . Vedle toho se vyrábějí platinové senzory s hodnotami 50, 200, 500, 1000 a  $2000 \Omega$ . [6], [7]

### 1.1.3 Umístění snímače teploty

Umístění teplotního senzoru je díky rozložení teplotního pole velice důležité. Záleží nejen na okolí, ve kterém se senzor nachází, ale v úvahu je nutné brát také pozici vzhledem k proudění, vzdálenost od stěny, izolaci potrubí a tloušťku stěn.

Možnosti umístění jsou vidět na obrázku 1.2. U senzoru A, kde potrubí není izolováno, dochází ke špatnému obtékání za kolenem a chyba měření dosahuje až  $40^\circ C$ . U varianty E je krátká jímka a navíc je senzor ochlazován potrubím. Chyba je zde menší, řádově  $15^\circ C$ . Senzory D a E trpí horším obtékáním. Za ideálně umístěný lze považovat senzor B. [13]



Obr. 1.2 – Možnosti umístění tepelného senzoru [13]

## 1.2 Programovatelné automaty

Systémy v průmyslu jsou řízeny řadou technických prostředků počínaje analogovými regulátory až po výkonné počítačové stanice. Nejrozšířenějšími prvky na úrovni řízení jsou programovatelné automaty označované zkratkou PLC (Programmable Logic Controller) nebo také PAC (Programmable Automation Controller). Dle normy ČSN EN 61131-1 je PLC číslicově pracující elektronický systém konstruovaný pro použití v průmyslovém prostředí. Programovatelný automat je řídicí systém přizpůsobený pro řízení v technických procesech a je specializovaný na úlohy logického typu. Náročné pracovní podmínky, jako je elektromagnetické rušení, prach, otřesy, střídání teplot nebo vlhkost kladou na hardwarové provedení i obvodové řešení vysoké nároky.

Výrobní procesy zaujímají často velké plochy a vzdálenost mezi programovatelnými automaty může činit i několik kilometrů. Využívá se zde proto distribuovaného systému, který zvyšuje bezpečnost a odolnost proti dílčím chybám a redukuje se objem přenášených dat. Zatímco osobní počítače mají zem procesoru vyvedenou přímo na paralelní i sériový port, u programovatelných automatů se používají mnohonásobné, vzájemně oddělené země. Díky tomu je izolován vlastní procesor od vstupních a výstupních modulů a zároveň jednotlivé vstupy a výstupy mezi sebou. Tím je zajištěna imunita proti vnějšímu rušení a přepětí. Při realizaci náročnějších operací se rozšiřují základní možnosti o speciální přídatné periferie. Ty posílají řídicímu programu již předzpracované výsledky.



Hlavní částí programovatelného automatu je modul s procesorem doplněným o programovací prostředí. Rozhraní používá protokol pro sériovou nebo ethernetovou komunikaci. V systémové paměti typu ROM je uložen operační systém a firmware od výrobce, který lze přeinstalovat, ale pro uživatele je jeho modifikace nepřístupná. V paměti RAM je část pro program a pro data, kde jsou uloženy vstupně-výstupní informace, vnitřní proměnné a funkce. Lze také připojit externí EPROM paměť pro načítání programu. [2], [4], [6]

### 1.2.1 Typy provedení

Programovatelné automaty lze dělit dle výkonnosti, vhodné aplikační oblasti či vnějšího provedení. Z hlediska možností volby I/O modulů se dělí na dvě hlavní kategorie. Kompaktní provedení obsahuje pouze interní I/O moduly o neměnné struktuře. Jsou vhodné pro jednodušší a levnější řízení. Druhou variantou jsou modulární programovatelné automaty, které využívají výměnné I/O moduly. Z nich lze sestavit požadovanou kombinaci vstupů a výstupů. Umožňuje to vyšší variabilitu pro vyřešení požadované úlohy. [2], [6]

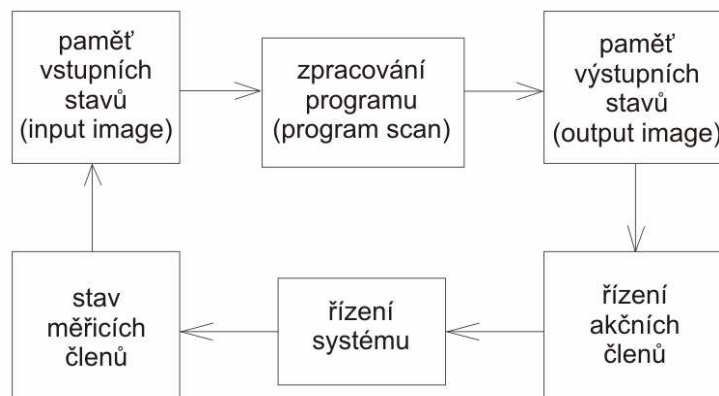
### 1.2.2 Principy programování

Vysoká bezpečnost provozu řízených systémů vyžaduje jiný režim práce programovatelných automatů oproti běžným počítačům. V technologii nelze čekat několik vteřin na start operačního systému. Po znovuoobnovení napájení musí během zlomku vteřiny načíst svůj režim a v případě poruchy paměti vykonat okamžitě příslušné kroky. Několikaminutová prodleva by mohla způsobit závažnou havárii.

Zpracovávaný program se vykonává periodicky v neustále se opakujícím uzavřeném cyklu. Nepřístupuje se v něm k vstupům a výstupům přímo, ale pracuje se s obrazy jejich dat uložených ve dvou pamětech. V obrazech vstupů a v obrazech výstupů. Při vykonávání se opakuje cyklus tzv. scan složený ze tří následujících kroků:

- 1) Vzorkování vstupů (input scan) – paralelní načtení hodnot ze vstupních modulů do paměti zvané input image.
- 2) Zpracování programu (program scan) – sériové řešení programu (postupné čtení a vykonávání jeho příkazů).

3) Zápis výstupů (output scan) – paralelní zápis obrazu výstupu do výstupních modulů.



**Obr. 1.3 – Tok informací v řídicím systému s PAC**

Cyklické chování programu je vidět z obrázku 1.3. Zde je po vykonání poslední instrukce uživatelského programu (obvykle E0) předáno řízení systémovému programu. Z důvodů eliminace chyb spojených s I/O změnami při běhu programu je před vzorkováním zapsán stav vstupů a výstupů, tzv. input a output image. Tím si programovatelný automat udrží tyto hodnoty konstantní, bez ohledu na právě probíhající děj a s ním spojené změny. Na rozdíl od jiných programovatelných systémů se programátor nemusí starat o to, aby se na konci programu vrátil zpět na začátek, protože to za něj zajistí systémový program. Naopak dlouhodobé setrvání v programové smyčce je systémem označeno jako překročení doby cyklu. [2],[4],[6]

### 1.2.3 Používané jazykové prostředky

Nejlépe lze objasnit činnost programovatelného automatu ukázkou základních programových konstrukcí. Původně byly určeny jako náhrada kontaktních i bezkontaktních logických řídicích systémů. To ovlivnilo programovací jazyky, které na začátku musely splňovat možnost přímého přepisu logických funkcí do řídicího programu. Dnes už jsou jejich součástí instrukce pro popis činnosti regulátoru a díky tomu je mohou plně nahradit.

Přímá přenositelnost programů mezi programovatelnými automaty různých výrobců není možná. Avšak existuje mezinárodní norma IEC 1131-3, která sjednocuje programy pro tyto automaty. Klade podmínky na nezávislost technického vybavení a programovacího jazyka. Preferuje jednotný programovací přístup a možnost ladění během návrhu.



Jazyky se dělí do těchto typů:

- Jazyk mnemokódů (Instructions List – IL)
- Jazyk kontaktních reléových schémat (Ladder Diagram – LD)
- Jazyk logických schémat (Function Block Diagram – FBD)
- Jazyk strukturovaného textu (Structured Text – ST)

### Jazyk mnemokódů (Instructions List – IL)

Představuje programování na úrovni blízké assembleru a tento jazyk je také strojově orientovaný. Každá instrukce programovatelného automatu odpovídá jednomu příkazu jazyka. Je zde možnost využít návěští pro cíle skoků, symbolická jména číselných hodnot a označení vstupních, výstupních a vnitřních proměnných. Příklad:

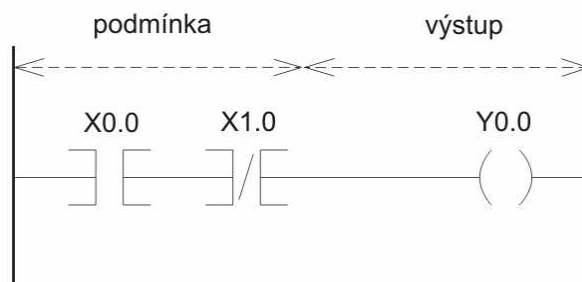
*LD X0.0;* načtení hodnoty vstupu

*ANC X1.0;* načtení a negování hodnoty vstupu s funkcí logického and

*WR Y0.0;* sepnutí výstupního stykače

### Jazyk kontaktních reléových schémat (Ladder Diagram – LD)

Patří k nejdéle používaným programovacím nástrojům pro logické řízení a tvoří náhradu za reléovou logiku. Jedná se o síť spínacích a rozpínacích kontaktů, cívek elektromagnetů a logických funkcí. Spínací kontakty představuje dvojice svislých čar a rozpínací kontakt má navíc přidané lomítko. Cívky jsou označeny dvojicí závorek a funkční bloky, například pro čítače, jsou v obdélníkové značce. Tento jazyk je nezastupitelný při požadavku na rychlý servis z důvodu zvýraznění vodivé cesty ve schématu. Vhodný je pro sekvenční úlohy. Ukázka programování v Ladder Diagramu je na obrázku 1.4.



**Obr. 1.4 – Ukázka programování v Ladder Diagram**

### Jazyk logických schémat (Function Block Diagram – FBD)

Jedná se o grafický jazyk s logickými operacemi. Využívá se při popisu a programování systémů zpracovávajících analogové proměnné. Vhodný je při programování měřicích a regulačních úloh. Ukázka programování Function Block Diagram je na obrázku 1.5.



**Obr. 1.5 – Ukázka programování s Function Block Diagram**

### Jazyk strukturovaného textu (Structured Text – ST)

Je obdobou vyšších programovacích jazyků, jako je Pascal. Řeší úlohy automatického řízení s využitím algoritmického jazyka. Vhodný je pro matematické úlohy. Ukázka programování strukturovaného textu:

```

PROGRAM AUTOMAT
VAR
K : CHAR
BEGIN
IF UPCASE (K) = 'S' THEN
SOUND (300)
END

```

Tyto jednoduché a čitelné jazyky slouží nejen k realizaci řízení, ale také k údržbě zařízení při provozu. Proto na rozdíl od programů osobních počítačů trvá etapa odladění mnohem déle. Složitější technologie, například pro spalovací kotel v elektrárně, vyžaduje sledování řádů tisíců bitových signálů a stovek analogových veličin. Proto nelze vyzkoušet reakce na všechny kombinace vstupů. Chyby vznikají nejen při špatném algoritmu, ale především při odlišném chování řízené technologie oproti předpokladům. Siemens a Teco preferují strojový kód, zatímco u automatů Allen-Bradley tvoří žebříčkový diagram primární nástroj a strojový se zde využívá minimálně. Nejméně frekventovaný je vyšší programovací jazyk. Ten je vhodný výhradně pro aplikace, které mají čistě výpočetní charakter. [2], [4], [6]



## 1.3 Regulátory

Regulátor je zařízení, kterým se realizuje samočinná regulace. V širším pojetí lze pod tímto pojmem chápat všechny prvky ve zpětné vazbě k regulovanému systému. Patří sem snímač, ústřední regulační člen a akční člen. Tyto tři části nejsou vždy jednoznačně odděleny. Nejzávažnější a nejdůležitější částí regulátoru po technické i teoretické stránce je ústřední člen. Je to tím, že hlavním požadavkem kladeným na snímače a akční členy je co nejvěrnější transformace. U snímačů měřené veličiny je to transformace na zpracováváný signál a u akčních členů signál ústředního členu na akční zásah. Z toho plyne, že se zvyšující kvalitou transformace těchto signálů roste kvalita regulace. Naopak požadavky na nastavení ústředního členu mohou být různé, někdy i protichůdné. Pod pojmem regulátor bude v této diplomové práci vždy myšlen pouze ústřední člen. Jeho hlavní funkcí je vytvářet signál regulační odchylky. Ta vzniká rozdílem žádané a měřené hodnoty regulované veličiny. Další funkcí regulátoru je tento signál dle zvoleného algoritmu zpracovat. Úkolem projektanta řídicího systému je zvolit vhodný typ regulátoru, což znamená správně zvolit jeho statické a dynamické vlastnosti. Základní požadavky na typ regulace jsou: přesnost, jakost a stabilita. Hlavní snahou při volbě je přenos řízení roven jedné a nulový přenos poruchy. Jinak řečeno, regulovaná veličina musí co nejlépe sledovat hodnotu řídicí (žádané) veličiny a vliv poruchy musí regulátor co nejvíce eliminovat. [6]

### 1.3.1 Dvoupolohová regulace

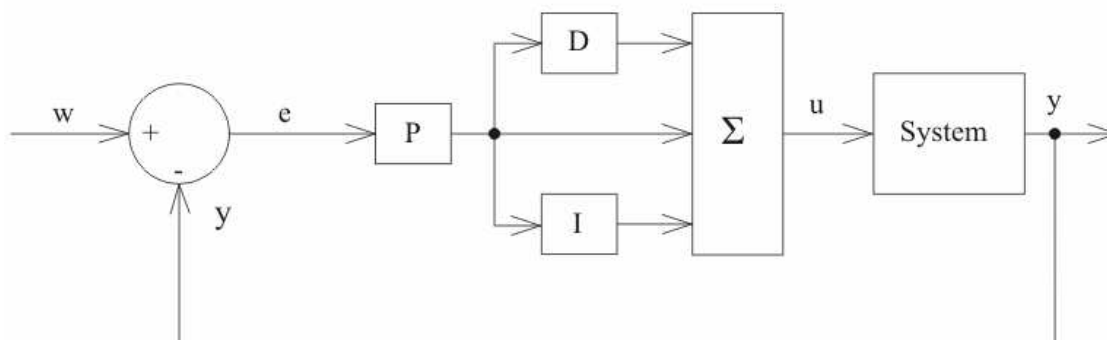
Výstupní signál těchto regulátorů, tedy akční zásah, je nespojitá funkce regulační odchylky. Je to dáno konstrukcí, u které je na výstupu spínací prvek a není proto třeba proporcionálních výkonových zesilovačů. S tímto konstrukčně jednoduchým řešením je spojená ekonomická optimalizace a také vysoká spolehlivost. Vhodné jsou pro regulaci menších technologických zařízení.

Existují i nespojitě regulace působící spojitě, u kterých lze dosáhnout ustáleného stavu. Ten vznikne vysokou frekvencí spínání. Časovým posuvem okamžiku spínání lze měnit střední hodnotu a tím dosáhnout toho, že regulační děj bude navenek působit jako spojitý.

Naopak u dvoupolohové regulace nemůže vzniknout ustálený stav regulačního obvodu. Je to dáno trvalou oscilací akční veličiny mezi dvěma stavy. [6]

### 1.3.2 Spojitá regulace

Spojité regulátory jsou vhodné při vysokých nárocích na kvalitu regulace a nekmitavý průběh regulačního děje. Spojitý regulátor je tvořen třemi základními částmi. První je proporcionální – P, druhá je integrační – I a třetí je derivační – D. Zapojením těchto tří částí, obvykle paralelně, vzniká regulátor. Viz obrázek 1.6.



**Obr. 1.6 – Spojitý PID regulátor s předřazenou proporcionální složkou**

Proporcionální část generuje signál akční veličiny tím větší, čím větší je regulační odchylka. Když v rovnovážném stavu kdy  $e = 0$  vznikne porucha, je nutná k její eliminaci změna hodnoty akční veličiny. To je při proporcionální regulaci možné pouze s nenulovou regulační odchylkou. V praxi to znamená, že proporcionální regulátor odchylku neodstraní, protože ji ke svému působení vlastně potřebuje.

Pokud je tedy regulační odchylka nenulová, je pro její odstranění nutné trvale měnit akční veličinu a to nejlépe rychlostí úměrnou okamžité velikosti odchylky. Regulační obvod se tak dostane do rovnovážného stavu rychleji. Výsledná hodnota akční veličiny je rovna součtu dílčích změn. Podle jejího aditivního (součtového) charakteru je nazývána integrační. Výsledný regulační průběh urychluje, ale vlivem zpožděného projevu měřené veličiny za účinkem akční, bude mít regulovaná veličina tendenci k překmitu. Integrační složka je tak zdrojem setrvačných projevů a může být příčinou kmitání a nestability.

Pro potlačení tendence ke kmitání způsobeného integrační složkou je potřeba vyhodnocovat tendenci změn regulační odchylky a následně ji brzdit. Je to z toho důvodu, aby regulovaná veličina nepřekmitla. Toto působení akční veličiny se vzhledem k její úměrnosti rychlosti změny regulované veličiny (derivaci) proti jejímu smyslu ještě před tím, než regulovaná veličina dosáhne řídicí, nazývá derivační. [6]



### 1.3.3 Popis spojitého PID regulátoru

Rovnici spojitého PID regulátoru v paralelním tvaru v časové oblasti lze vyjádřit vztahem:

$$u(t) = r_0 \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.3.1)$$

V přenosové oblasti je rovnice ve tvaru:

$$U(s) = r_0 \left[ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_d s \right] E(s) \quad (1.3.2)$$

Výstup PID regulátoru je dán součtem použitých složek a elektronickou realizaci lze uskutečnit třemi paralelně zapojenými operačními zesilovači. Každý z nich zvlášť realizuje funkci P, I a D. V praxi se proporcionalní člen zapojuje před rozvětvací bod I a D složky kvůli zesílení odchylky před jejím integrováním a derivováním (viz obrázek 1.6). [1], [6]

### 1.3.4 Numerická optimalizace parametrů regulátoru

Při zlepšování kvality regulace lze optimalizovat čas ustálení regulačního pochodu, jeho dynamiku či velikost překmitu žádané veličiny. Tyto požadavky na zlepšení regulace bývají protichůdné a je nutné zvolit kompromis mezi nimi. Jednou z možností je minimalizace regulační plochy pomocí integrálního kritéria. V ideálním případě by tato plocha byla nulová a výstupní veličina by měla stejný průběh jako žádaná. To u reálné soustavy nelze, proto cíl seřízení regulátoru je:

$$J \rightarrow \min \quad (1.3.3)$$

Symbolem  $J$  je označen integrál regulační plochy v celém průběhu regulačního pochodu. Je to plocha sevřená průběhem  $e(t)$  a časovou osou. Pro lineární regulační plochu s kmitavým regulačním pochodem je vhodné kritérium:

$$J = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| dt \quad (1.3.4)$$



V případě kvadratické regulační plochy je výpočet kritéria:

$$J = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 dt \quad (1.3.5)$$

Kvadratická regulační plocha při optimalizaci zajistí stabilitu obvodu. Jejím rozšířením o vážení akčního zásahu pomocí váhy  $\kappa$  (kappa) lze regulační pochod zklidnit a zpomalit. Kritérium je následující:

$$J = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 + [\kappa \cdot u]^2 dt \quad (1.3.6)$$

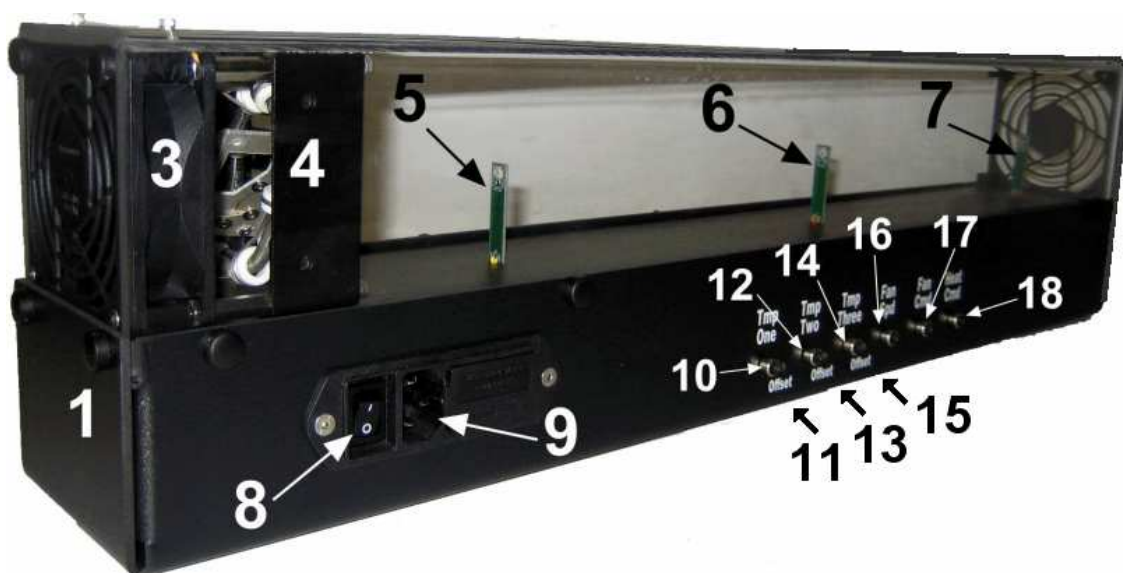
Rozsah váhy  $\kappa$  akčního zásahu lze měnit v rozsahu 0–1. Malé hodnoty pro rychlé regulační pochody a naopak. Pomocí iterační metody lze dosáhnout optimální kombinace nastavení parametrů regulátoru. Tato metoda je založena na opakovaném výpočtu úlohy s různým nastavením parametrů a pomocí Matlabu ji lze použít s funkcí *fminsearch()* .[16],[17]

## 2 POPIS EXPERIMENTU S TEPELNOU KOMOROU

V této kapitole jsou nejprve popsány jednotlivé komponenty tepelné komory. Další kapitola je věnována modelování tepelných procesů v tepelné komoře, jako je například skoková změna akční veličiny, dvoupolohová On-Off regulace a řízení pomocí proporcionálně-integračního regulátoru. Nakonec je uveden *windup* efekt způsobený použitím integrační složky.

### 2.1 Tepelná komora

Pro účely výuky byla vybrána tepelná komora výrobce Quanser Innovate Educata. Z hlediska regulace chápeme tuto tepelnou komoru jako soustavu vybavenou třemi teplotními čidly (Platinum Micro model S101503 PF12) umístěnými ekvidistantně, tedy v konstantní vzdálenosti. Tím získáváme výstupní regulovanou veličinu. Pohyb vzduchu je vyvolán ventilátorem umístěným na jednom konci komory a větracím otvorem na konci opačném. Za tímto ventilátorem je umístěna tepelná spirála, sloužící pro ohřev vzduchu. Viz obrázek 2.1. Tento přípravek již má vestavěný zesilovač pro topení a ventilátor. K dispozici je také tachometr připojený na ventilátor pro měření rychlosti otáček. [8]



Obr. 2.1 – Experiment s tepelnou komorou [10]

Účel tohoto experimentu je vymodelovat systém druhého řádu s použitím skokové změny akční veličiny. Toto je technika používaná k nalezení systému modelu

prvního řádu pro konkrétní tepelný snímač. Druhé hlavní téma je regulace teploty. Ta je regulována s použitím dvupolohového spínače a PID regulátoru. Na obrázku 2.1 lze vidět tepelnou komoru s popisem jednotlivých částí. Jejich význam je uveden v tabulce 2.1. Pro lepší přehlednost je ponecháno označení vstupů a výstupů dle výrobce. [8]

**Tab. 2.1 – Přiřazení popisu a komponenty v tepelné komoře**

Popis	Komponenta	Popis	Komponenta
1	Tepelná komora	10	Tmp One Connector
2	Sklolaminátový plášť	11	Temperature sensor 1 Offset
3	Dmychadlo	12	Tmp Two Connector
4	Topná spirála	13	Temperature sensor 2 Offset
5	Tepelný snímač 1	14	Tmp three Connector
6	Tepelný snímač 2	15	Temperature sensor 3 Offset
7	Tepelný snímač 3	16	Fan Spd Connector
8	Hlavní spínač	17	Fan Cmd Connector
9	Napájecí konektor 230 V	18	Heat Cmd Connector

### 2.1.1 Komponenty tepelné komory

Tepelný tok je vyvolán axiálně umístěným ventilátorem FBA08A12M společnosti NMB-MAT s maximálním průtokem vzduchu 32,1 metrů krychlových za minutu. Jeho jmenovité otáčky činí 2450 otáček za minutu. Nainstalovaný tachometr pro měření úhlové rychlosti dmychadla je kalibrován na 1063 otáček za minutu na Volt. Topná spirála typu AF-400-120-X10-3.1 je stejně jako dmychadlo umístěna axiálně. Maximální výkon činí 400 W/120 V. Uživatel může díky zabudované regulaci upravit hodnotu střídavého napětí napájení cívky a tím regulovat výstupní teplotu. Izolační vrstvu komory tvoří kryt z masivního plexiskla. Parametry tepelné komory a použitých komponent jsou uvedeny v příloze 9.7. Z důvodu stálého odvádění tepla správným směrem je rychlost otáček dmychadla omezena a nelze nastavit na nulu. [10], [12]

### 2.1.2 Regulační odchylka v ustáleném stavu

Regulační odchylka je rozdíl mezi žádanou, tedy řídicí a výstupní hodnotou ze systému. Problematice regulátoru se věnuje kapitola 1.3 „číslicové regulátory“. Po změně řídicí veličiny dochází k ustálení regulační odchylky za čas  $t$ :

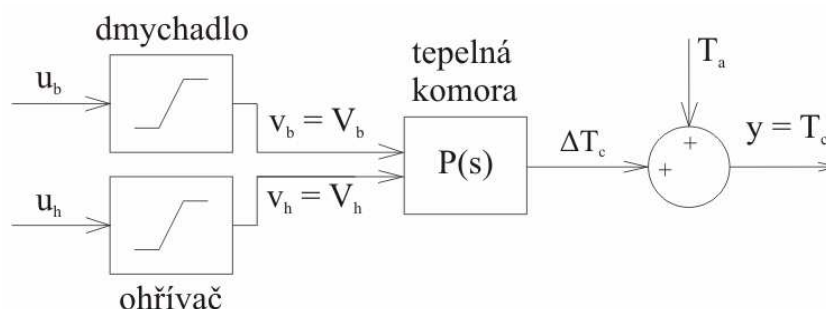
$$e_{ss} = r_{ss}(t) - y_{ss}(t) \quad (2.1.1)$$



kde  $r_{ss}(t)$  je hodnota řídicí veličiny v ustáleném stavu (Steady-State) a  $y_{ss}(t)$  je výstupní hodnota ze systému také v ustáleném stavu. [8]

## 2.2 Modelování tepelných procesů v tepelné komoře

Blokové schéma termodynamického modelu je uvedeno na obrázku 2.2 a zobrazuje vstupy a výstupy systému, kde  $u_b$  je akční veličina dmyhadla (Blower) a  $u_h$  akční veličina ohřívače (Heater). Tyto dvě veličiny reprezentují vstupní napětí, kde  $v_b = V_b$  respektive  $v_h = V_h$  a vstupují do soustavy (tepelné komory).



**Obr. 2.2 – Dynamika systému s tepelnou komorou**

Teplotu uvnitř komory na čidle  $n$  lze popsat pomocí funkce:

$$\frac{d}{dt}T_n(t) = f(V_h, V_b, T_a, x_n) \quad (2.2.1)$$

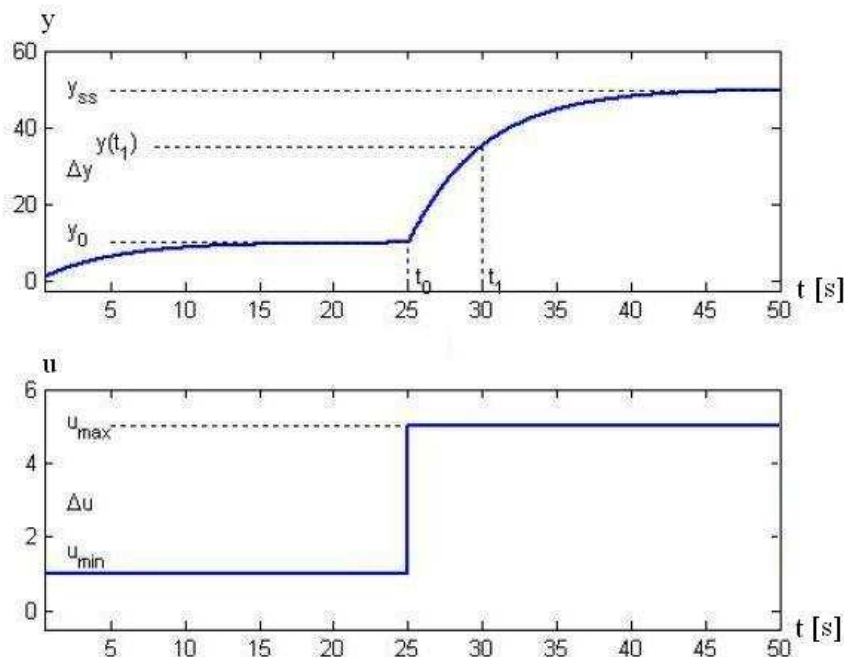
Kde  $T_n$  je teplota na senzoru  $n$ .  $V_h$  a  $V_b$  jsou napětí na topné spirále a ventilátoru.  $T_a$  odpovídá teplotě okolí. Hodnota  $x_n$  je vzdálenost mezi senzorem  $n$  a topnou spirálou. Pro účely navrhování teploty regulátoru použijeme přenosovou funkci systému prvního řádu:

$$T_n(s) = \frac{K_n \cdot V_h(s)}{\tau_n \cdot s + 1} \quad (2.2.2)$$

na snímači teploty  $n$ , při zesílení v ustáleném stavu  $K_n$  a s časovou konstantou  $\tau_n$ . [8]

### 2.2.1 Skoková změna akční veličiny

Skoková odezva je test založený na reakci stabilního systému a provádí se následujícím způsobem. Konstantní hodnota vstupu je změněna a stabilní systém by měl zareagovat ustálením zpět do rovnovážné hodnoty. Zaznamenána je při tom vstupní a výstupní hodnota. Viz graf 2.1.



Graf 2.1 – Vstupní a výstupní signál pro skokovou odezvu [8]

Přechodová charakteristika zobrazená v grafu 3.1 je tvořena pomocí přechodové funkce:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad (2.2.3)$$

Parametry  $K = 10$  a  $\tau = 5$  [s]. Vstupní signál  $u$ , je změněn v čase  $t_0$  z hodnoty  $u_{min}$  na hodnotu  $u_{max}$ . Výsledný výstupní signál je zpočátku roven  $y_0$  a jakmile dojde ke skokové změně vstupu, ustálí se na hodnotě  $y_{ss}$ . Po ustálení je tedy zesílení

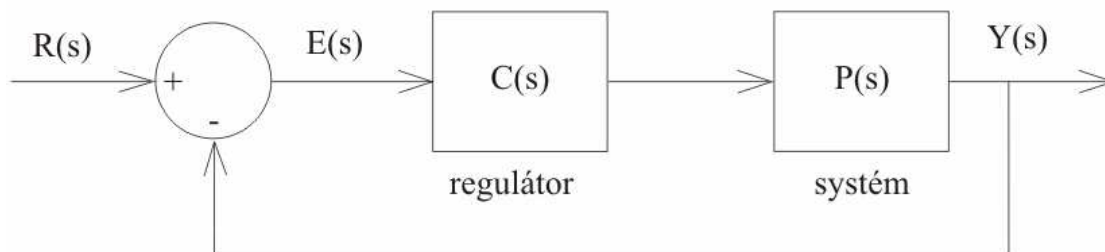
$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad [-] \quad (2.2.4)$$

kde  $\Delta y = y_{ss} - y_0$  a  $\Delta u = u_{\max} - u_{\min}$ . Za účelem nalezení modelu s časovou konstantou  $\tau$  je definován výstupní signál  $y(t_1) = 0,632y_{ss} + y_0$  a čas je  $t_1 = t_0 + \tau$ . Z tohoto modelu je časová konstanta rovna:

$$\tau = t_1 - t_0 \quad [\text{s}] \quad (2.2.5) [8]$$

### 2.2.2 Systém druhého řádu

Blokové schéma uvedené na obrázku 2.3 je obecný systém se zápornou zpětnou vazbou a s regulátorem (Compensator)  $C(s)$ . Přenosová funkce reprezentující průběh je označena  $P(s)$ . Měřený výstup  $Y(s)$  odpovídá referenčnímu signálu.  $R(s)$  je řídicí veličina.



**Obr. 2.3 – Systém se zpětnou vazbou**

Výstup systému  $Y(s)$  dle obrázku 2.3 je roven:

$$Y(s) = C(s) P(s) (R(s) - Y(s)) \quad (2.2.6)$$

a přenosová funkce uzavřené smyčky pro  $Y(s)$  je rovna:

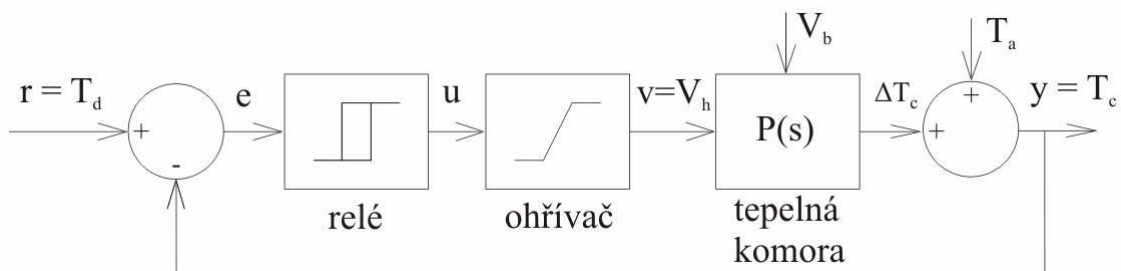
$$Y(s) = \frac{C(s) P(s) R(s)}{1 + C(s) P(s)} \quad (2.2.7)$$

přenosová funkce (napětí-teplota):

$$P(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad (2.2.8)$$

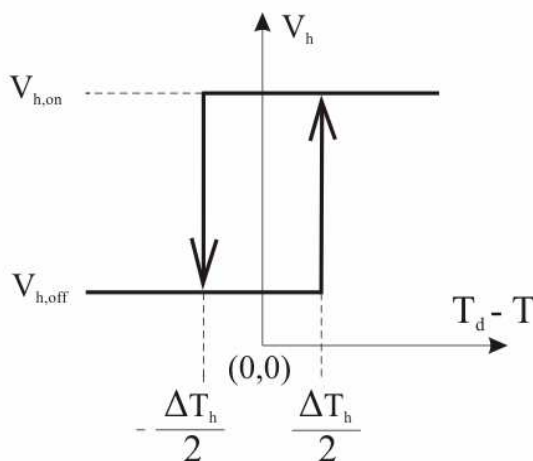
### 2.2.3 Dvoupolohová regulace

Metoda dvoupolohového řízení zvaná On-Off může být realizována pomocí různých přepínačů. Blokové schéma je uvedeno na obrázku 2.4. Ukazuje On-Off regulátor, u kterého je řízení prováděno pomocí reléového spínače. Také je zde vidět nelinearita dynamiky topného tělesa, které je omezeno v intervalu 0–5 V.



Obr. 2.4 – Blokové schéma On-Off regulace s relé

Vlastnosti relé jsou znázorněny na obrázku 2.5. Pokud je ve stavu sepnutí, tedy On, tak výstup spínacího relé je roven napětí  $V_{h,on}$ . Ve stavu vypnutí Off je výstup topení  $V_{h,off}$ . Hysterezi šířky  $\Delta T_h$  lze upravit dle požadavku a ovlivní výsledný výkon řízení. [8]



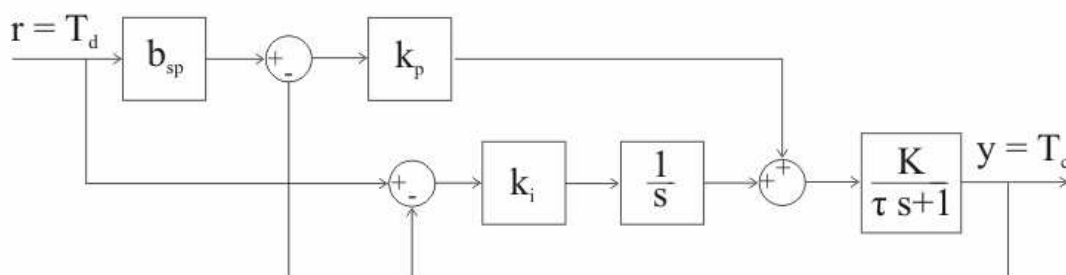
Obr. 2.5 – Hystereze reléového přepínače

### 2.2.4 Proporcionálně-integrační řízení

Proporcionálně–integrační (PI) regulátor používá pro řízení tepelného experimentu s komorou následující strukturu.

$$V_h(t) = k_p (b_{sp} T_d(t) - T(t)) + k_i \int T_d(t) - T(t) \quad (2.2.9)$$

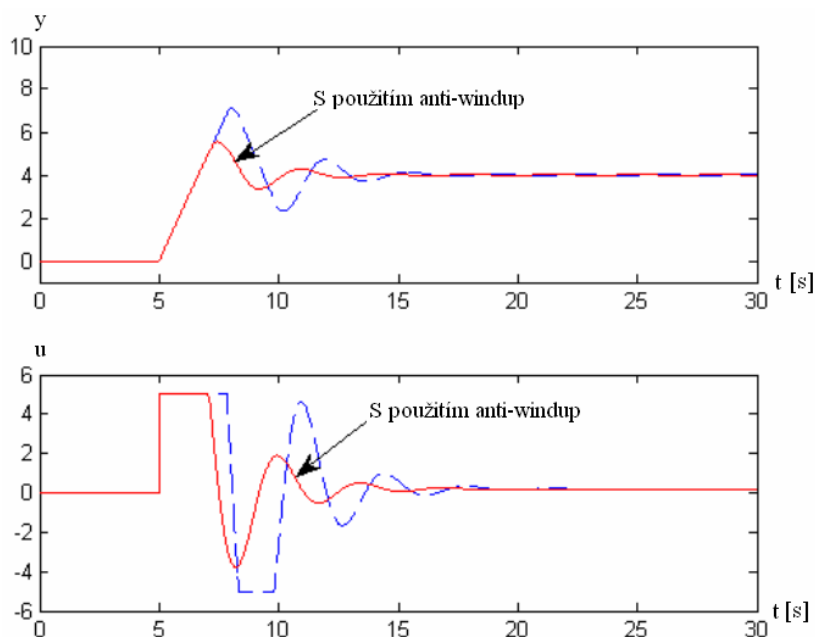
kde  $k_p$  je proporcionální zesílení,  $b_{sp}$  váha žádané veličiny (set-point),  $k_i$  integrační zesílení,  $T_d(t)$  je žádaná hodnota teploty (desired),  $T(t)$  je naměřená teplota v komoře na konkrétním senzoru a  $V_h(t)$  je napětí na ohřívači (Heater). Blokové schéma PI regulace je vidět na obrázku 2.6. Teplota v komoře je řízena jedním senzorem, buď  $S1$ ,  $S2$  nebo  $S3$ . Od této chvíle se již označení  $T_n$  nebude používat a bude nahrazeno zápisem  $T$ , který odpovídá teplotě na jednom senzoru. Obvykle bude myšlen senzor  $S1$ . [8]



**Obr. 2.6 – Proporcionálně-integrační řízení**

### 2.2.5 Windup efekt

*Windup* efekt vzniká v důsledku nelinearity v regulátoru a akčním členu. Rozsah ovládacího napětí pro topnou spirálu je omezen v intervalu 0–5 V. Mimo tento rozsah dochází k saturaci (nasycení). Tato nelinearita může způsobit problémy při použití regulátoru s integrační složkou. Ta může u číslicového regulátoru narůstat prakticky neomezeně a přesáhnout maximum hodnoty realizovatelné akčním členem, aniž by se to projevilo na výstupu. Ve chvíli kdy dojde ke změně znaménka u regulační odchylky trvá dlouho, než integrační složka poklesne tak, aby to ovlivnilo akční veličinu. Řešením v této situaci je přidat na výstup omezovač (tzv. *anti-windup*). Další možností potlačení *windup* efektu je dynamickým omezením integrační složky. Přírůstek, který by vedl k překročení meze realizovatelné akčním členem je pokládán za nulový. Efekt s omezením *windup* je vidět v grafu 2.2.



**Graf 2.2 – Efekt použití regulátoru s anti-windup [8]**

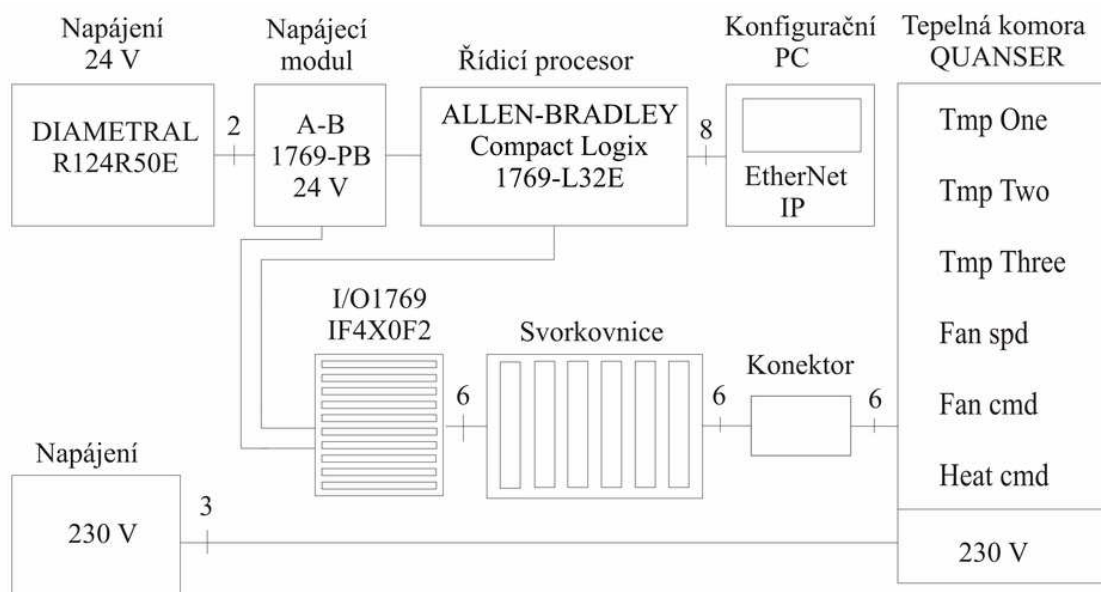
V grafu 2.2 je vidět použití *anti-windup* ochrany. Čárkovaná modrá čára představuje odezvu bez použití *anti-windup* a červená čára je odezva s použitím *anti-windup* ochrany. Když *windup* efekt nastane, integrační složka narůstá a způsobí prodloužený překmit žádané veličiny. Nicméně s *anti-windup* je vstup do integrátoru snížen a pokud dojde k saturaci, dojde poté k výraznému snížení překmitu žádané veličiny. *Anti-windup* je zvláště důležitý v pomalých systémech s velkými časovými konstantami, jako je tepelný tok, protože integrátor má více času na *windup*. [1], [6], [8]

### 3 NÁVRH A IMPLEMENTACE REÁLNÉHO MODELU

První část této kapitoly se nejprve zabývá propojením programovatelného automatu od výrobce Allen-Bradley s tepelnou komorou od výrobce Quanser Innovate Educate [10]. Hlavní výhodou je nezávislost na počítači při běhu programu a nový postup řízení v předmětu „Prostředky automatického řízení“. V druhé části této kapitoly je popsána počáteční inicializace experimentu s tepelnou komorou a ve třetí části je identifikována regulovaná soustava.

#### 3.1 Propojení programovatelného automatu a tepelné komory

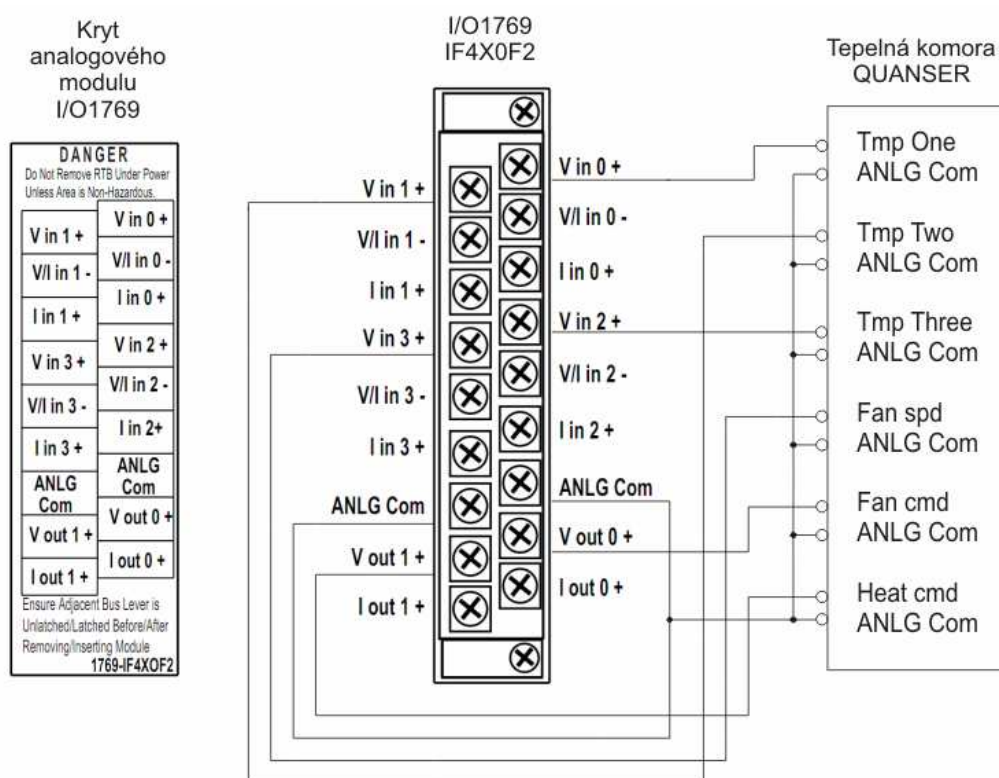
Pro účely výuky byl použit programovatelný automat Allen-Bradley od společnosti Rockwell Automation typu Compact Logix L32E. Přínos této metody pro výuku, jak již bylo zmíněno, je především v nové metodě řízení procesu pomocí programovatelného automatu. Do této chvíle se k řízení vždy používaly počítačové karty v kombinaci s počítačovým prostředím Matlab Simulink.



**Obr. 3.1 – Blokové schéma zapojení řízení pomocí PAC**

Pro řízení tepelného toku v komoře slouží dva analogové vstupy. První je pro ovládání otáček na ventilátoru pomocí napětí v rozsahu 0–5 V s označením *Fan Cmd*. Druhý je určen pro ohřev tepelné spirály s označením *Heat Cmd* opět s rozsahem 0-5 V. Viz obrázek 3.1. Pro získání informace z tepelné komory slouží čtyři analogové výstupy. První tři jsou pro získání napětí v rozsahu 0–5 V odpovídající teplotě na

platinových senzorech. Jejich označení je dle výrobce: *Tmp One*, *Tmp Two* a *Tmp Three*. Pro přehlednost se bude toto označení v následujícím textu používat i nadále, pouze v případě nutnosti zkrácení zápisu bude použito označení *S1*, *S2* a *S3*. Poslední analogový výstup je připojen na zabudovaný otáčkoměr s označením *Fan Spd* a slouží k získání informace o počtu otáček za minutu, případně o objemovém toku. Zapojení bylo navrženo a realizováno dle blokového schématu na obrázku 3.1. Označení „*Konfigurační PC*“ je chápáno jako osobní počítač pouze pro účely komunikace s programovatelným automatem a pro jeho prvotní konfiguraci. „*Řídící procesor*“ slouží jako hlavní řídicí část programovatelného automatu během chodu nahraného programu. Dále je zde napájecí modul 24 V 1769-PB a vstupně-výstupní analogový modul 1769-IF4X0F2 včetně svorkovnice pro připojení kabeláže. Tepelná komora vyžaduje napájení 230 V.



**Obr. 3.2 – Schéma propojení vstupů a výstupů mezi PAC a tepelnou komorou**

Nejprve bylo připojeno napájecí napětí 24 V pro modul PAC 1769-PB pomocí regulovatelného stejnosměrného zdroje napětí DIAMETRAL R124R50E s příkonem 50 W. Poté byla připojena ethernetová komunikace prostřednictvím externí karty TP-LINK TG-3468. Na závěr bylo realizováno propojení mezi analogovým modulem programovatelného automatu 1769-IF4X0F2 a tepelnou komorou s vyhověním požadavku jednoduchého odpojení z důvodu stěhování na výuku a zpět. Propojení



analogových vstupů a výstupů bylo realizováno vždy mezi *VinX+*, případně *VoutX+* proti zemnicímu vodiči. Každý vodič je pro přehlednost a případnou modulaci vždy označen. Bližší náhled propojení vstupů a výstupů mezi analogovým modulem 1769 IF4XOF2 a tepelnou komorou je na obrázku 3.2. Celkový pohled na zapojenou soustavu a její řídicí část včetně napájení je na obrázku 3.3.



**Obr. 3.3 – Realizace řízení pomocí PAC Rockwell Automation**

### 3.2 Počáteční inicializace experimentu s tepelnou komorou

Po dokončení realizace hardwarové části je zapotřebí nainstalovat na řídicí počítač potřebný software. Pro komunikaci přes ethernet slouží BOOTP/DHCP Server, kde se zaregistruje přidělená IP adresa počítače (192.168.1.103) k MAC adrese programovatelného automatu (00:00:BC:3C:4F:47).

Při spuštění programu RSLogix 5000 Enterprise Series je nutné vytvořit nový projekt a přiřadit vstupně-výstupní moduly v kolonce I/O Configuration/CompactBus Local. Poté vybrat přesný typ příslušného modulu, což je v tomto případě analogový vstupně výstupní modul s označením 1769-IF4XOF2/A analog\_io. Dále je nutné zvolit programovací jazyk, ve kterém se vytvoří celý program pro programovatelný automat. Pro sekvenční úlohy je výhodnější LD (Ladder Diagram) a pro funkční nebo regulační úlohy vyhovuje více FB (Function Block). Pro tuto diplomovou práci byl zvolen jazyk funkčních bloků z důvodů regulace pomocí PIDE bloku, který v Ladder diagramu nelze použít a také proto, že se jedná o regulační úlohu. Zvolíme volbu *new FB*. Podrobnější popis je vytvořen a umístěn v příloze na CD.



### 3.2.1 Kalibrace senzorů

Kalibrace senzorů teploty *Tmp One*, *Tmp Two* a *Tmp Three* byla provedena dle pokynů výrobce s pomocí multimetru DIGITAL MULTIMETER RE3900. Pokojové teplotě 20 °C odpovídá napětí na výstupu senzoru 1 V. Při měření byla okolní (pokojová) teplota 22 °C a napětí bylo nastaveno pomocí OFFSETU (ladění pro kalibraci) na 1,1 V. Tato hodnota napětí na výstupu senzoru odpovídá po navzorkování programovatelným automatem hodnotě 1408. U všech tří senzorů po celou dobu měření, které trvalo dvě minuty, byla naměřena konstantní navzorkovaná hodnota 1408.

### 3.2.2 Přesnost vzorkování a kvantování

Přesnost měření je ovlivněna v celém měřicím řetězci. Přesnost odporového senzoru dle výrobce tepelné komory [10] je nejméně  $\pm 0,1$  °C. Dalším prvkem přinášejícím chybu do měření je A/Č převodník v programovatelném automatu. Jeho označení je 1769-IF4X0F2 a vzorkovací perioda se kterou pracuje, lze pomocí RSLogix 5000 nastavit na mezní hodnoty 1 až 750 ms. Pro měření teploty v komoře bylo ve většině případů nastaveno vzorkování s periodou 500 ms. Rozsah napětí pro I/O modul je 0–10 V a rozsah ovládaných a snímaných vstupů, respektive výstupů tepelné komory je 0–5 V. Ve výsledku to znamená, že programovatelný automat pracuje pouze v polovině svého rozsahu. To platí v případě řízení tepelné komory programovatelným automatem. V situaci opačné, kdy jsou získávány informace z tepelné komory o teplotě na snímačích, je pracovní rozsah napětí 1,1–3,6 V. Využívá se tak 25 % rozsahu programovatelného automatu. Ten pracuje s rozlišením 8 bitů, což odpovídá rozsahu 256 hodnot. Při maximálním napětí je navzorkována hodnota 32640. Znamená to tedy, že krok, se kterým pracuje programovatelný automat je roven 127,5 (32640/255). Výrobce programovatelného automatu [15] uvádí rozlišení 41,18 mV/LSB. Příklad výpočtu napětí pro navzorkovanou hodnotu 4736 je následující:

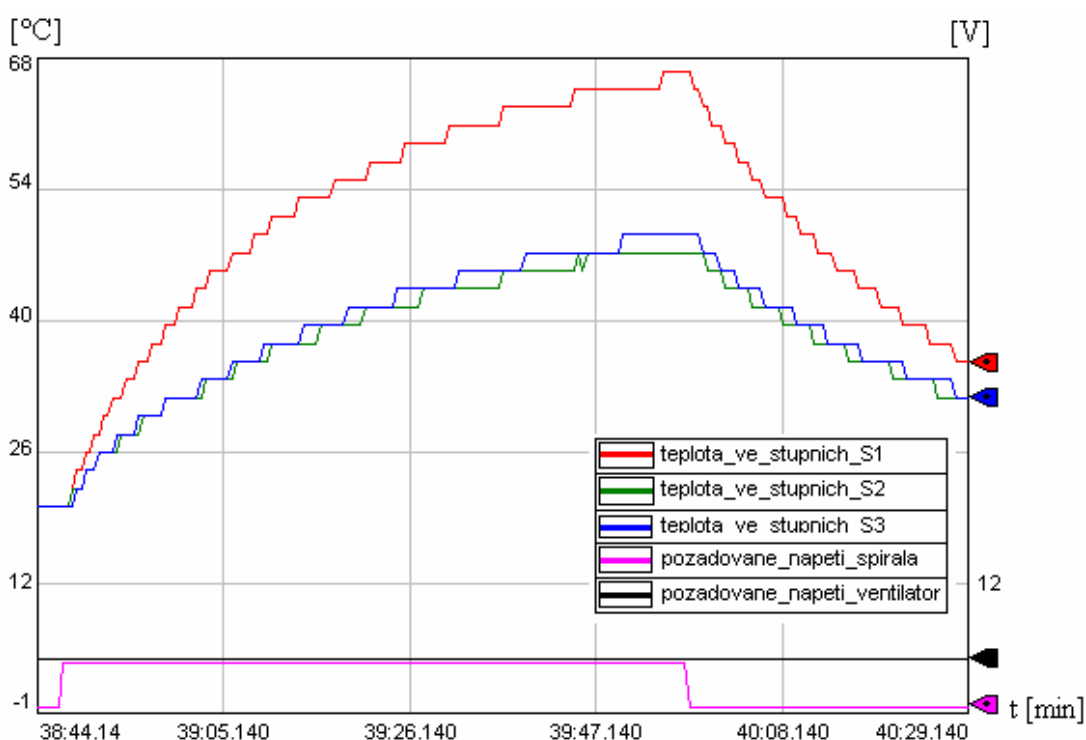
$$U_n = \frac{4736 \cdot 0,04118}{127,5} = 1,53 \quad [\text{V}] \quad (3.2.1)$$

Rozlišení, se kterým pracuje vstup programovatelného automatu je

$$0,0149 \cdot 127,5 = 1,9 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2.2)$$

### 3.2.3 Měření poklesu teploty na senzorech

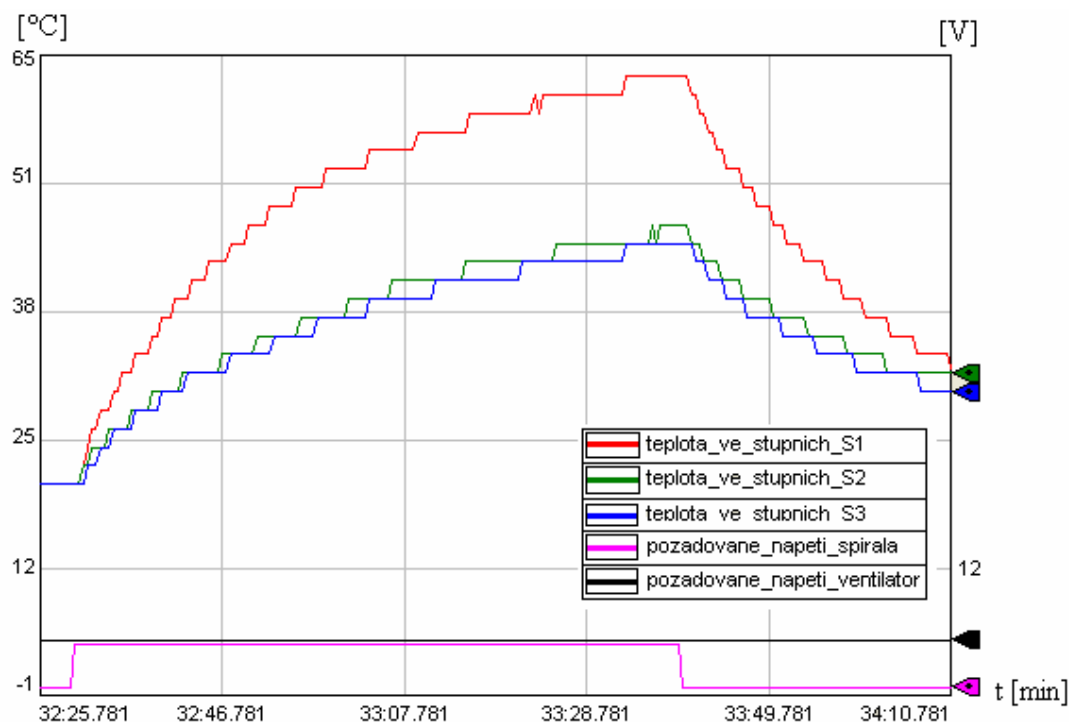
Při měření výstupní teploty vykazuje senzor *Tmp Three* vyšší hodnoty oproti senzoru *Tmp Two*. Z hlediska konstrukce tepelné komory, ve které je na jedné straně topná spirála a ventilátor, lze očekávat pokles teploty s rostoucí vzdáleností od těchto akčních členů. Za předpokladu, že tomu tak není, je vhodné odstranit na protější straně plastový kryt, který nemá 100% propustnost tepelného toku a zjistit, zda není příčinou tohoto jevu. Průběh odezvy na skokovou změnu před odstraněním krytu je v grafu 3.1, kde si lze všimnout tohoto jevu. Na senzoru *S3* (*Tmp Three* – modrá barva) je po celou dobu měření vyšší teplota oproti senzoru *S2* (*Tmp Two* – zelená barva).



**Graf 3.1 – Odezva na skokovou změnu akční veličiny s plastovým krytem**

Druhé měření proběhlo za stejných podmínek. Po celou dobu měření byl akční zásah ventilátoru nastaven na 5 V. Poté byl skokově změněn akční zásah napětí spirály z hodnoty 0,0 na 4,5 V. Po dosažení teploty 64 °C byl akční zásah vrácen na původní hodnotu 0 V. Zásadní změnou při celém měření je absence plastového krytu výdechu tepelné komory. Ten byl z důvodů špatného odvádění tepelného toku odšroubován, Jak ukazuje měření v grafu 3.2 byl příčinou kumulování vzduchu na konci tepelné komory a zvyšování teploty v tomto prostoru. Nyní vykazuje senzor *S3* (*Tmp Three* – modrá barva) v celém rozsahu měření vždy nižší hodnotu teploty oproti senzoru

S2 (*Tmp Two* – zelená barva), respektive S1 (*Tmp One* – červená barva). Další měření a regulace již probíhaly bez tohoto krytu.



**Graf 3.2 – Odezva na skokovou změnu akční veličiny bez plastového krytu**

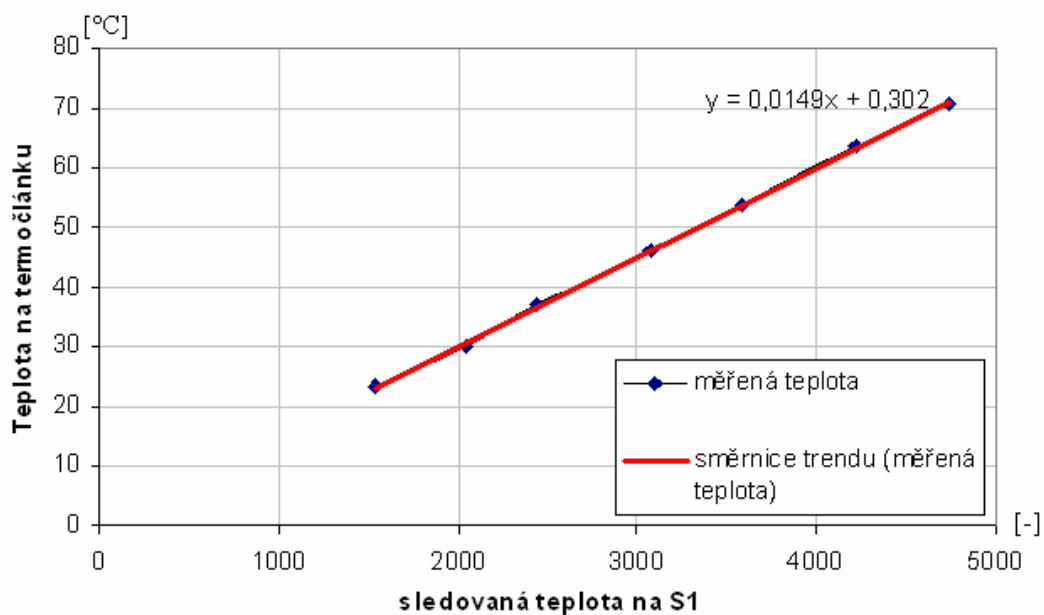
### 3.2.4 Přepočítání hodnoty vstupu PAC na stupně Celsia

Výstupní signál senzorů teploty (Platinum Micro model S101503 PF12) uvnitř komory je napětí v rozsahu 0–5 V. Tento signál je přiveden na vstup programovatelného automatu do modulu analog I/O (1769-IF4XOF2). Procesor navzorkuje tento signál a dále s ním pracuje jako s hodnotou. Pro snadné ovládání a přesné pozorování této hodnoty je výhodné přepočítat výsledek na stupně Celsia.

**Tab. 3.1 – Výsledky měřených hodnot pro rovnici regrese**

napětí na spirále (u) [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
sledovana_teplota_S1 [-]	1408	1408	1408	1536	2048	2432	3072	3584	4224	4736	4992
tep. termočlánek u S1 [°C]	20,7	20,7	20,7	23,6	30,1	36,9	46	53,8	63,5	70,8	75,5
napětí na senzoru 1(y)[V]	1,04	1,04	1,04	1,19	1,52	1,87	2,37	2,77	3,26	3,64	3,86

V kapitole 3.3.1 je zjištěn lineární průběh teploty na senzorech v intervalu akčního zásahu 1,5–4,5 V. Proto je výhodné nalézt rovnici regrese (viz graf 3.3) v tomto intervalu a použít ji pro přepočítání do stupňů Celsia.



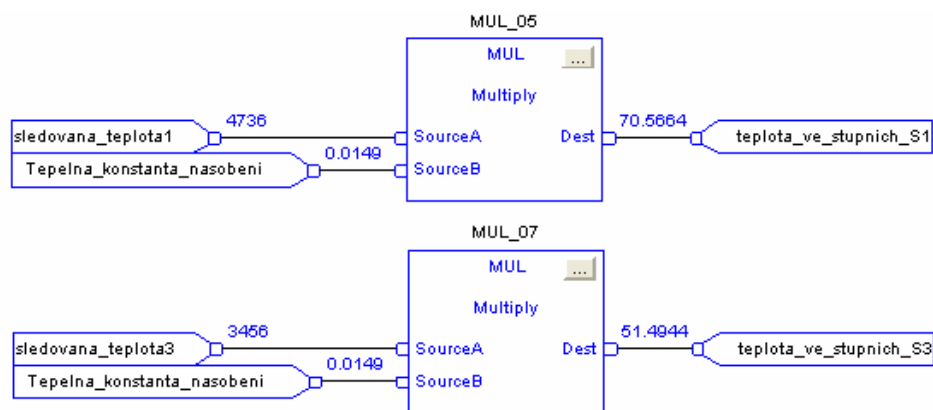
**Graf 3.3 – Lineární spojnice průběhu teploty s rovnicí regrese**

Při měření teploty byla použita měřicí ústředna AGILENT 34970A v kombinaci s kartou AGILENT 34901A pro připojení termočláčku. Zaznamenává na byla vždy navzorkovaná hodnota programovatelného automatu na senzoru S1 a teplota měřená pomocí termočláčku v těsné blízkosti senzoru S1. Výsledky měření jsou v tabulce 3.1.

Výsledná směrnice trendu odpovídá rovnici regrese:

$$y = 0,0149x + 0,302 \quad (3.2.3)$$

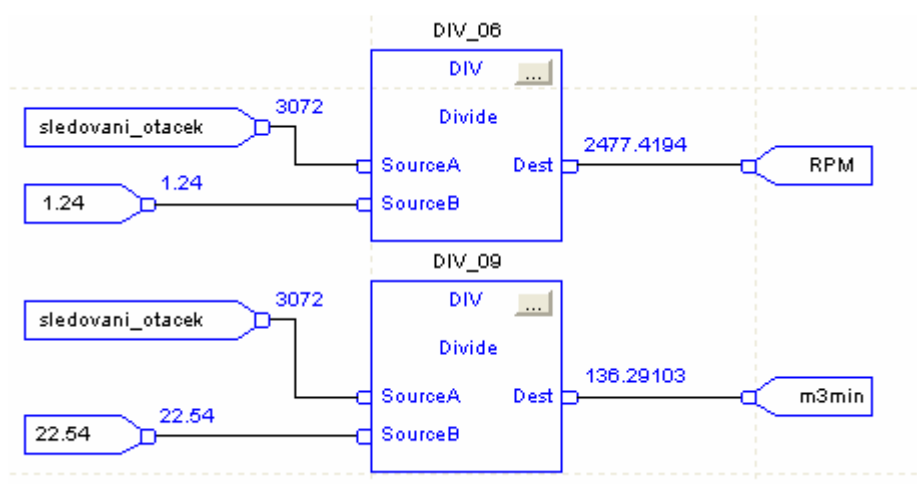
Hodnota  $y$  odpovídá reálné teplotě naměřené termočláčkem a hodnota  $x$  odpovídá navzorkované teplotě programovatelným automatem. Tím získáme konstantu pro násobení rovnající se 0,0149, která je označena jako *Tepelna\_konstanta\_nasobeni* viz obrázek 3.4.



**Obr. 3.4 – Přepočítání hodnoty PAC na stupně Celsia**

### 3.2.5 Přepočítání hodnoty vstupu PAC na otáčky za minutu a objemový tok

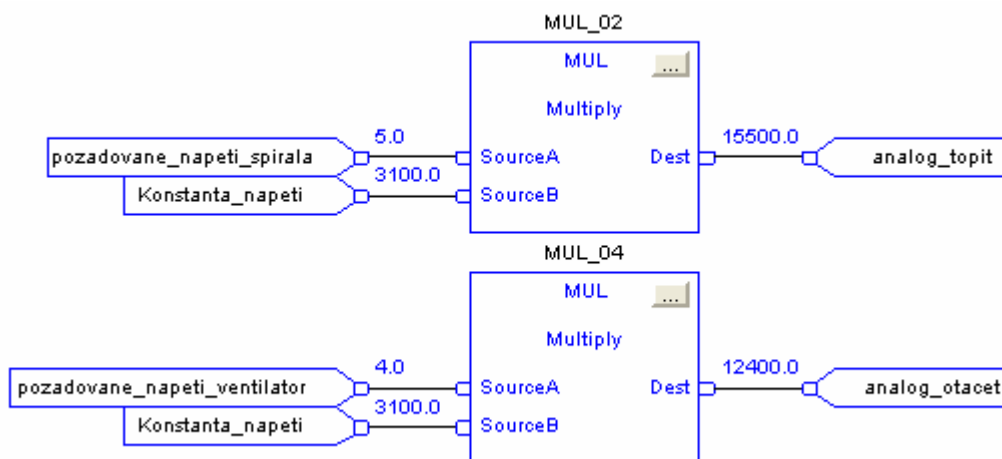
Vstupní hodnota programovatelného automatu je přepočítána na otáčky za minutu. V tepelné komoře je zabudován tachometr, dosahující při maximálních otáčkách ventilátoru 2580 otáček za minutu. Tento údaj lze využít k přepočtu z navzorkované hodnoty programovatelného automatu na hodnotu odpovídající otáčkám za minutu. Při maximálních otáčkách programovatelný automat navzorkuje hodnotu ventilátoru na 3200, což odpovídá hodnotě 2580 otáček za minutu. Po vydělení  $3200 / 2580$  tak dostáváme potřebnou konstantu pro dělení 1,24, viz obrázek 3.5, kde navzorkované hodnotě 3072 ze vstupu PAC odpovídá hodnotě 2477,42 otáček za minutu. Ze stejného vstupu lze také získávat objemový tok. Při maximálním výkonu ventilátoru dosahuje objemový tok 142 metrů krychlových za minutu a konstanta pro dělení je rovna podílu  $3200 / 142$ . Jak je vidět z obrázku 3.5, navzorkovaná hodnota pomocí programovatelného automatu je rovna 3072 a je následně dělena konstantou 22,54. Objemový tok v tomto případě je roven 136,29 metrů krychlových za minutu.



Obr. 3.5 – Přepočítání hodnoty PAC na otáčky za minutu a objemový tok

### 3.2.6 Přepočítání napětí ventilátoru a topné spirály na hodnotu PAC

Tepelná komora disponuje dvěma analogovými vstupy. Jsou jimi napětí pro řízení ventilátoru a topné spirály. Obě tyto hodnoty jsou v rozsahu 0–5 V. Proto je výhodné přepočítat tyto hodnoty podobně jako v předchozích kapitolách. Zde se ovšem jedná o opačnou operaci, kde je nutné získat konstantu pro násobení. Při výstupní hodnotě z PAC 15500 se napětí na ventilátoru rovná 5 V. Tzn.  $15500 / 5$  je rovno 3100 a touto konstantou, označenou jako *Konstanta\_napeti*, je násobena navzorkovaná hodnota programovatelného automatu dle obrázku 3.6.



**Obr. 3.6 – Přepočítání požadovaného napětí na hodnotu PAC**

Uživatel zvolí konstantu *pozadovane\_napeti\_spirala*, která odpovídá rozsahu napětí 0–5 V. Stejným způsobem je přepočítáno i napětí pro ventilátor. Například při hodnotě 4 na *pozadovane\_napeti\_ventilator* bude napětí na ventilátoru rovno 4 V díky násobení konstantou 3100, která zvýší výstupní hodnotu PAC na 12400. Pro ověření správnosti výsledků byl použit multimetr DIGITAL MULTIMETER RE3900, pomocí kterého se v celém rozsahu teplot ověřila správnost násobící konstanty *Konstanta\_napeti*.

### 3.3 Identifikace soustavy

Tato kapitola se zabývá měřením statických charakteristik systémů, měřením přenosu soustavy a výpočtem dopravního zpoždění

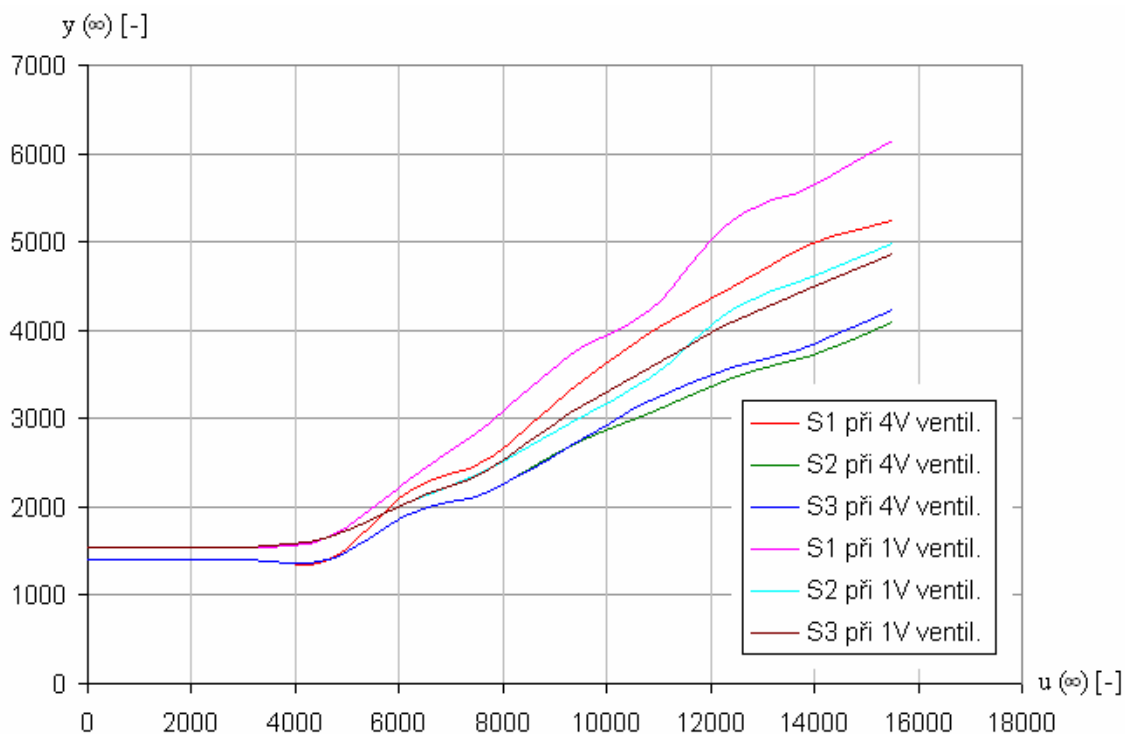
#### 3.3.1 Měření statických charakteristik systémů

Dle [14] je statická charakteristika grafické vyjádření závislosti ustálené hodnoty výstupního signálu  $y(\infty)$ , na ustálené hodnotě budicího signálu  $u(\infty)$  po odeznění přechodového děje. U lineárních dynamických systémů je vždy statická charakteristika přímka jdoucí počátkem

$$y(\infty) = K \cdot u(\infty) \quad (3.3.1)$$

kde  $K$  představuje statické zesílení.

V tomto případě, dle grafu 3.4, vykazuje systém na senzoru  $S1$ , při napětí na ventilátoru 4 V, mírnou nelinearitu v krajních hodnotách. Z tohoto důvodu je návrh regulace pro akční zásah omezen na interval 1,5–4,5 V. V příloze 9.9 je tento interval označen šedivou barvou v pozadí tabulky. Průběhy jednotlivých systémů lze vidět na v grafu 3.4.



**Graf 3.4 – Graf měřených statických charakteristik systémů**



Důležitým prvkem průběhu zesílení je také samotný počátek grafu, který by měl směřovat z počátku soustavy souřadnic. V tomto případě je to však ovlivněno faktem, kde při nulovém akčním zásahu  $u(0) = 0$  lze naměřit na výstupu ze senzoru  $SI$  nenulovou hodnotu napětí. To je způsobeno nenulovou teplotou v místnosti. Tuto skutečnost je zapotřebí vzít v úvahu při výpočtu statického zesílení. Konstanta  $\Delta u$  je rovna akčnímu zásahu napětí v rozmezí 0,0–4,5 V. Odpovídající rozsah výstupu  $\Delta y$  je omezený teplotou v místnosti. To znamená, že  $y_0 \neq 0$  V. Výsledné statické charakteristiky jsou v grafu 3.5. Zesílení pro senzor  $SI$  je rovno:

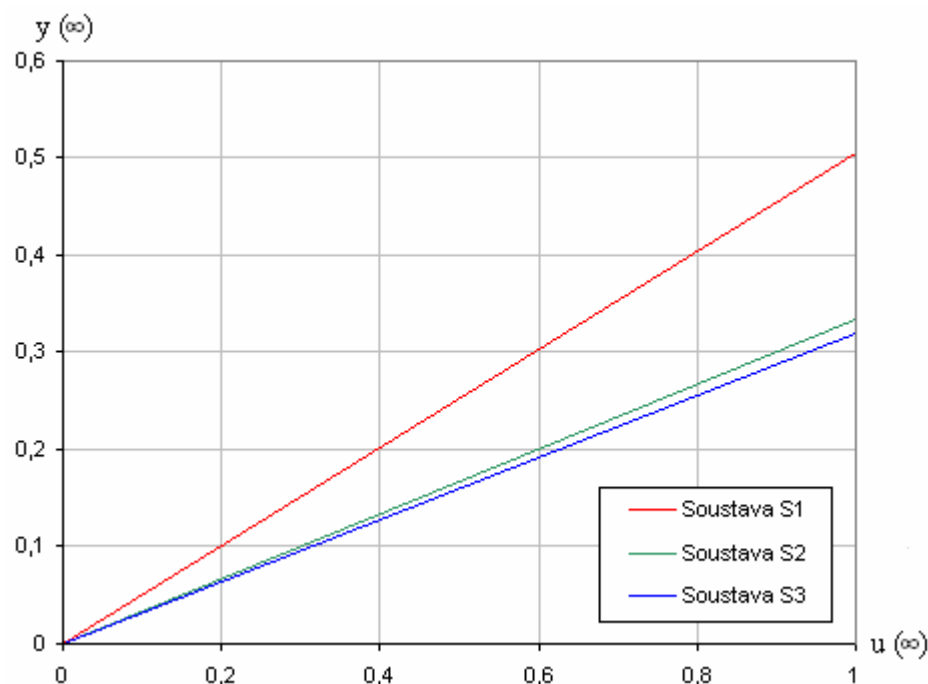
$$y_0 = 1,01 \text{ [V]} \quad (3.3.2)$$

$$y_{ss} = 3,29 \text{ [V]} \quad (3.3.3)$$

$$\Delta y = 2,28 \text{ [V]} \quad (3.3.4)$$

$$\Delta u = 4,5 \text{ [V]} \quad (3.3.5)$$

$$K_{S1} = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2,28}{4,5} = 0,506 \text{ [-]} \quad (3.3.6)$$



Graf 3.5 – Statické charakteristiky systémů

### 3.3.2 Měření přenosu soustavy

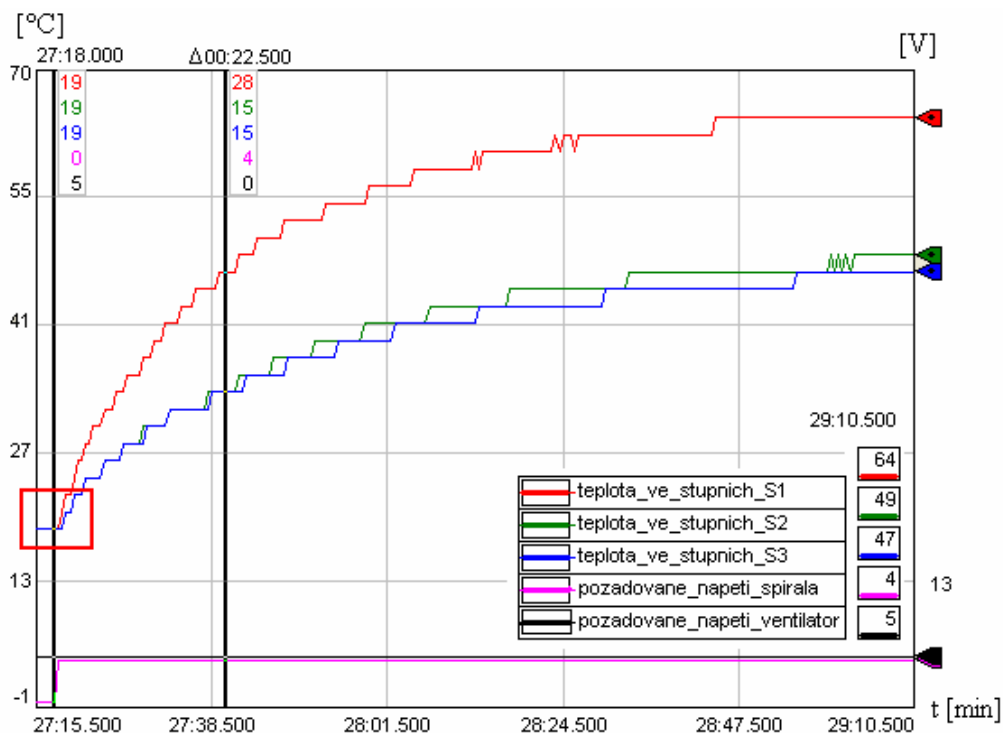
Měření přenosu soustavy je založeno na měření výstupu stabilního systému při změně vstupní veličiny. Systém by se měl dostat do jiného, ale opět stabilního stavu. První rovnovážný stav dle grafu 3.6 je v čase 27:18 minut, kdy je napětí na spirále rovno 0 V a hodnota napětí ventilátoru je nastavena na 5 V. V tuto chvíli je senzor teploty *S1* roven 19 °C, tedy  $y_0 = 19$  °C. Po změně řídicí veličiny z 0 V na 4,5 V se začne zvyšovat teplota na senzorech. Druhý ustálený stav při napětí na spirále 4,5 V a napětí na ventilátoru rovnému 5 V je teplota na senzoru *S1* rovna 64 °C, tedy  $y_{ss} = 64$  °C. Časová osa je vzorkována s periodou 500 ms. Pro senzor *S1* je výpočet časové konstanty  $\tau$  následující:

$$y(t_1) = (63\% \Delta y + y_0) = 0,63 \cdot 45 + 19 = 28,34 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.3.7)$$

$$\tau_{S1} = t_1 - t_0 = 40,5 - 18 = 22,5 \quad [\text{s}] \quad (3.3.8)$$

Přenos soustavy pro senzor *S1*:

$$G_{S1}(s) = \frac{K_{S1}}{\tau_{S1} \cdot s + 1} = \frac{0,506}{22,5 \cdot s + 1} \quad [-] \quad (3.3.9)$$

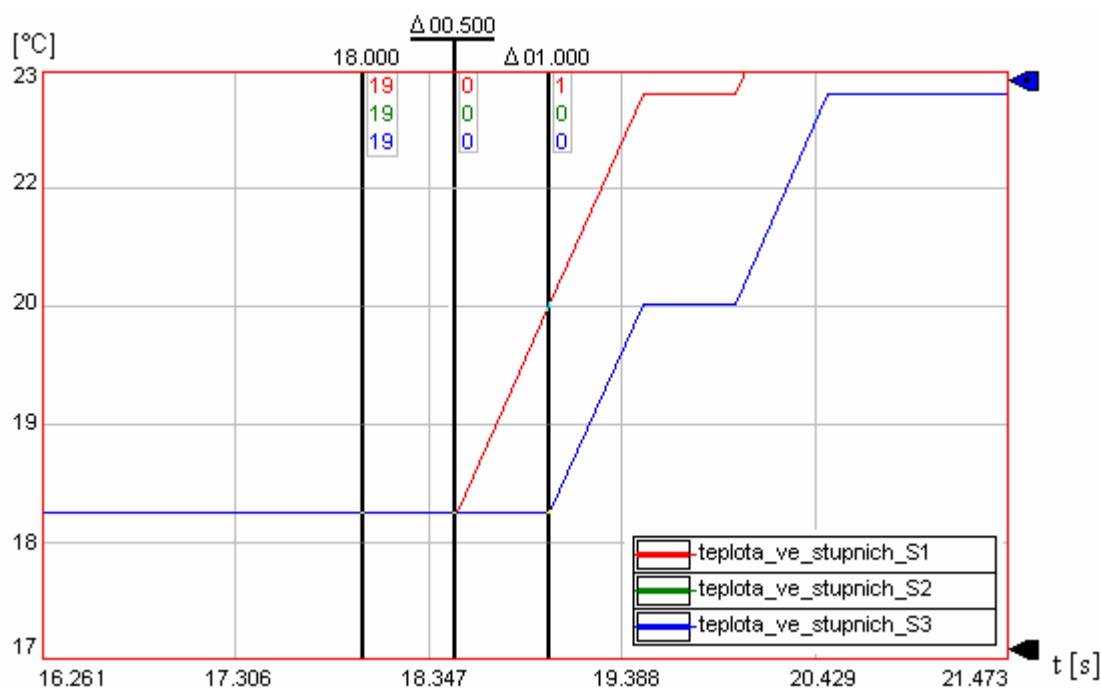


Graf 3.6 – Měření odezvy při skokové změně vstupu

### 3.3.3 Výpočet dopravního zpoždění

Tato kapitola se věnuje dopravnímu zpoždění, které vyplývá z konstrukce tepelné komory. V grafu 3.6 je v levé části vyznačen červený obdélník, který odpovídá výřezu v grafu 3.7. Pomocí grafické metody pro senzor  $S1$  byla v grafu v programu RSlogix vyznačena delta rozdílu  $t0$  odpovídající skokové změně akční veličiny, a  $t1$  pro čas, kdy se začala zvyšovat teplota. Po přeměření výsledků podle naměřené tabulky v programu RSlogix byla první změna teploty na senzoru  $S1$  v čase 18,5 sekund a dopravní zpoždění bylo rovno 0,5 sekund.

Pro další dva senzory  $S2$  a  $S3$  vyšlo dopravní zpoždění stejné. Oba senzory zareagovali ve stejném čase 19 sekund. Dopravní zpoždění vyšlo v tomto případě rovno jedné sekundě. Průběh reakce senzorů  $S1$ ,  $S2$  a  $S3$  lze vidět v grafu 3.7, kde průběh senzorů  $S2$  a  $S3$  v tomto intervalu měření vykazuje stejný průběh a proto dochází v tomto grafu k jejich překrývání. Celkový výpočet statického zesílení a přenosu s dopravním zpožděním pro soustavy  $S2$  a  $S3$  je v příloze 9.10.



**Graf 3.7 – Dopravní zpoždění na senzoru S1, S2 a S3**

Výsledný přenos soustavy 1. řádu s dopravním zpožděním je následující:

$$G_{S1}(s) = \frac{K}{\tau_{S1} \cdot s + 1} \cdot e^{-Ts} = \frac{0.506}{22.5 \cdot s + 1} \cdot e^{-0.5s} \quad (3.3.10)$$

## 4 REALIZACE ŘÍZENÍ POMOCÍ AUTOMATU

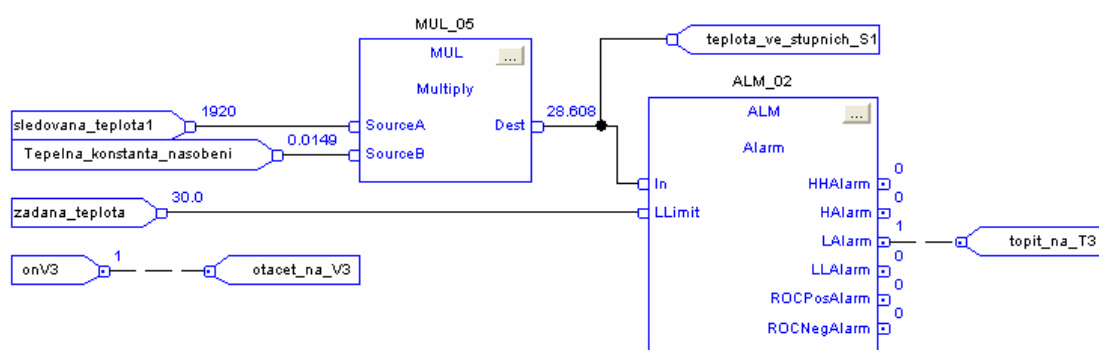
Tato kapitola se zabývá realizací řídicích algoritmů, optimalizací parametrů regulátoru a jejím ověřením. Nakonec je použito dynamické odstranění *windup* efektu .

### 4.1 Realizace řídicích algoritmů

V této kapitole je nejprve uvedena realizace dvouplošové a proporcionální regulace. Dále je uveden návrh a realizace proporcionálně-integrační regulace.

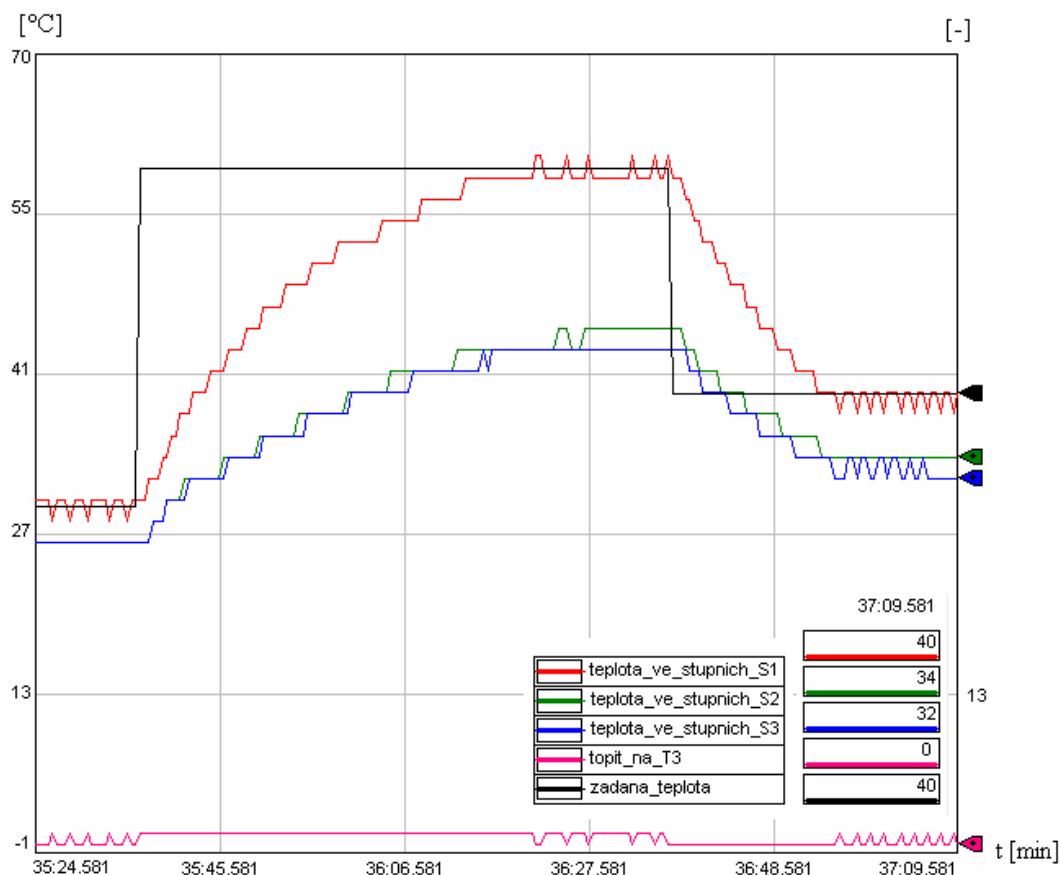
#### 4.1.1 Realizace dvouplošového regulátoru

Dvouplošová regulace označována jako On-Off řízení byla použita pro sledování chování systému. Pro snímání teploty byl vybrán senzor *Tmp One* s použitím bloku pro přepočet hodnoty PAC na teplotu dle obrázku 4.1. Pro reléové řízení byl vybrán blok *Alarm*. Vstupem do tohoto bloku je aktuální teplota a *LLimit* pro nastavení řídicí veličiny, která je rovna 30 °C. Blok *Teplota\_ve\_stupnich\_S1* je použit pro grafické sledování vývoje této hodnoty. Výstup tedy může dosahovat dvou stavů: „topí“ „netopí“. Tzn. že na výstup označený *topit\_na\_T3* je posílána logická jednička, případně logická nula. Ventilátor je pouze přídatný výstup, aby nedošlo k přehřátí spirály a aby bylo eliminováno dopravní zpoždění. Je nastavený na plný výkon, tedy 5 V. To je zajištěno blokem *onV3* připojeným k bloku *otacet\_na\_V3*, dle obrázku 4.1.



Obr. 4.1 – Blokové schéma řízení pro metodu On-Off

Z průběhu v grafu 4.1 s periodou vzorkování času 100 ms lze pozorovat hodnotu žádané veličiny, která je označena černou barvou. V tomto případě odpovídá označení *zadana\_hodnota*.

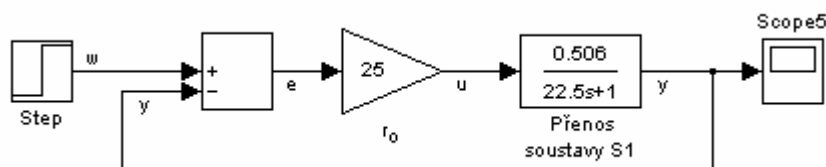


**Graf 4.1 – Průběh řízení metodou On-Off**

Na počátku je hodnota rovna 30 °C, poté v čase 35:36,58 minut je změněna na 60 °C a naposledy na 40 °C. Z průběhu je vidět, že perioda průběhu akční veličiny *topit\_na\_T3* se mění s výškou požadované teploty. Přesněji řečeno, se zvýšením žádané veličiny se perioda akční veličiny zmenší. Pásmo necitlivosti je zde díky velkému kvantování 1,9 °C.

#### 4.1.2 Realizace proporcionálního regulátoru

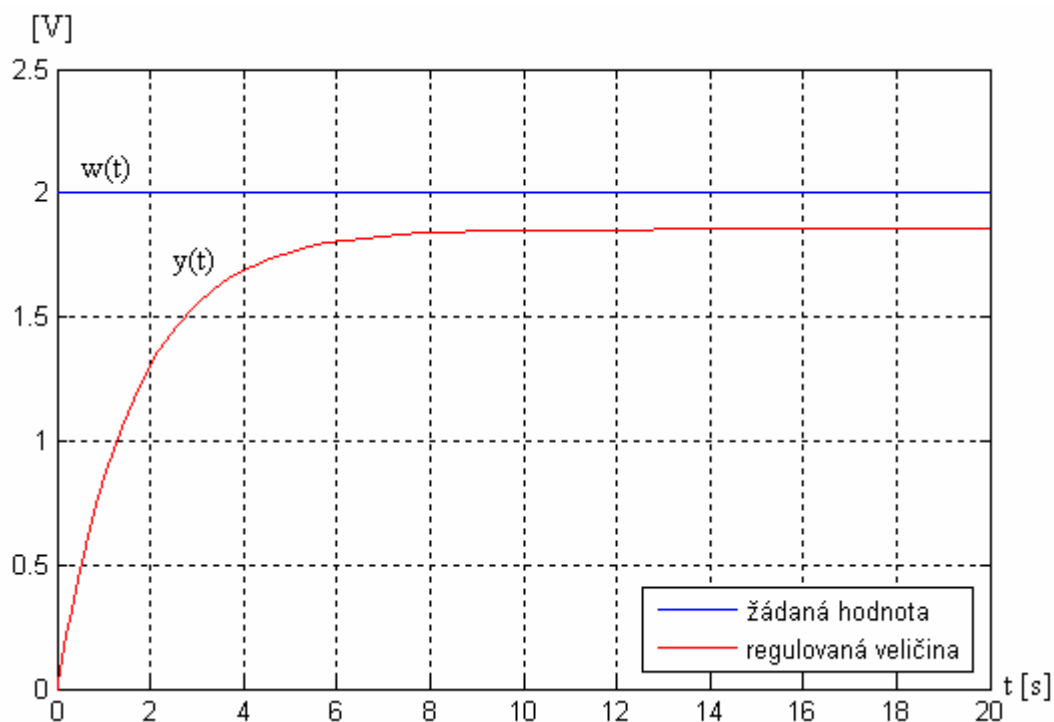
Proporcionální regulace využívá ve zpětné vazbě sumátor pro získání regulační odchylky, která vzniká odečtením výstupní veličiny od řídicí. Regulační odchylka  $e$  je následně zesílena pomocí proporcionální části, kterou tvoří zesilovač se zesílením  $r_0 = 25$ . Tato hodnota byla zvolena ručně a není optimalizována. Výstup ze zesilovače je akční veličina  $u$ , jež vstupuje do soustavy jako velikost napětí na spirále. Nejprve byl vytvořen model v prostředí Matlab Simulink dle obrázku 4.2 a poté bylo navržené schéma ověřeno na reálné soustavě.


**Obr. 4.2 – Proporcionální regulační smyčka**

Vybrána je regulovaná soustava řízená snímačem teploty S1 s přenosem rovným:

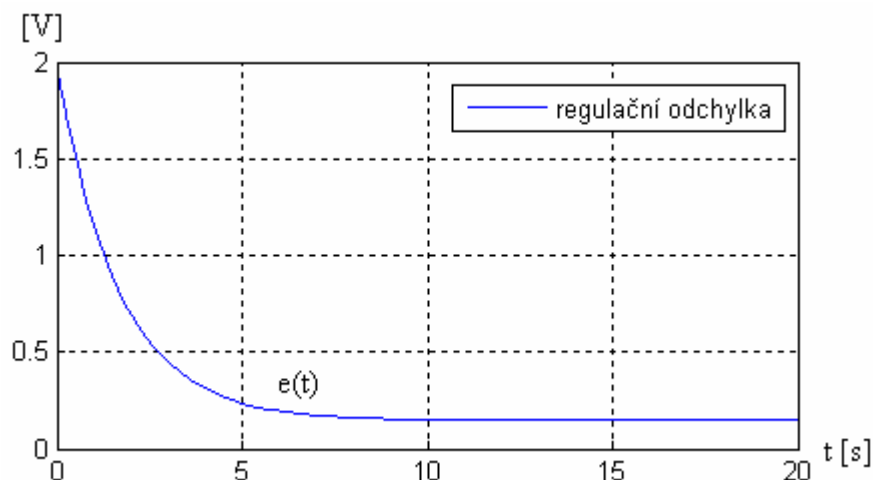
$$G(s) = \frac{0,506}{22,5s + 1} \quad [-] \quad (4.1.1)$$

Při zesílení proporcionální složky  $r_0 = 25$  a s žádanou hodnotou 2 V dochází ke vzniku trvalé regulační odchylky rovné 0,2 V.


**Graf 4.2 – Průběh řídicí a výstupní veličiny v čase**

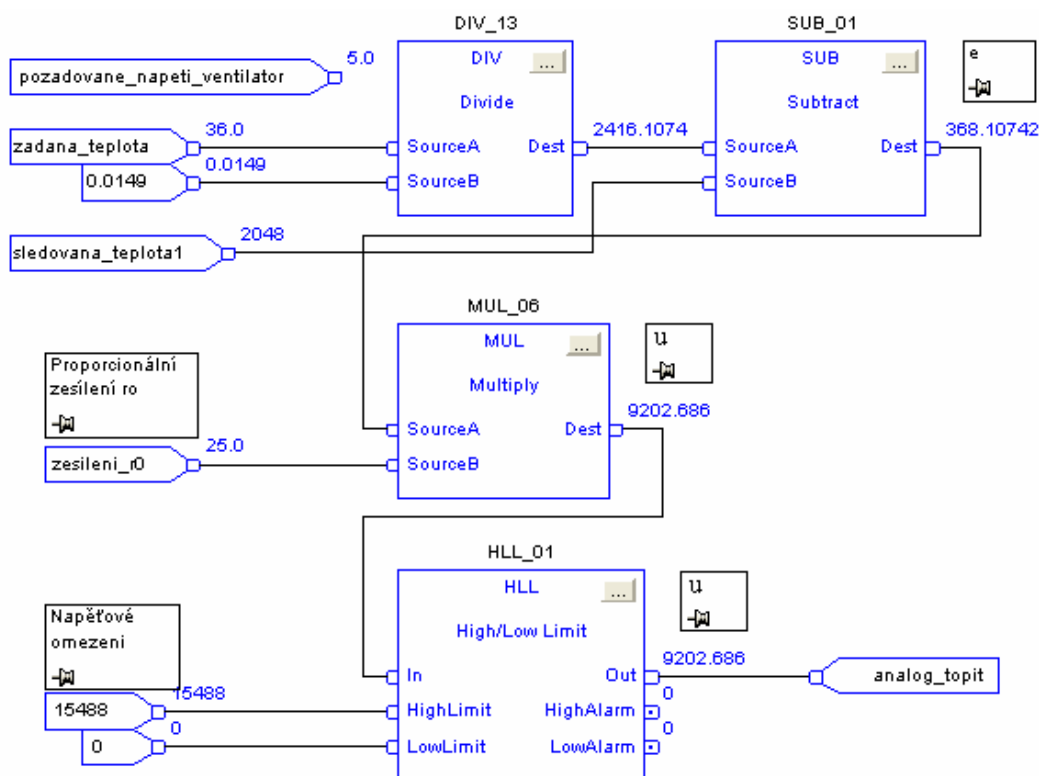
V grafu 4.2 je patrný jev, kdy výstupní regulovaná veličina nedosáhne požadované řídicí veličiny. V čase  $t = 10$  sekund zůstává výstupní veličina konstatní a vzniká trvalá regulační odchylka, při žádané hodnotě 2 V kterou lze vidět v grafu 4.3. Na počátku je skok řídicí veličiny z 0 na 2 V, proto je regulační odchylka rovna dvěma. Následně je násobena hodnotou 25. Akční zásah do regulované soustavy je tak v tomto modelu roven 50 V. Poté je regulační odchylka snížena, ale nedojde k jejímu úplnému odstranění. Jednou z možností jak snížit trvalou regulační odchylku je zvyšováním hodnoty proporcionálního zesílení, ale nelze jí odstranit úplně. K tomu aby byla

odstraněna je nutná integrační složka, které se věnuje následující kapitola s proporcionálně-integračním regulátorem.



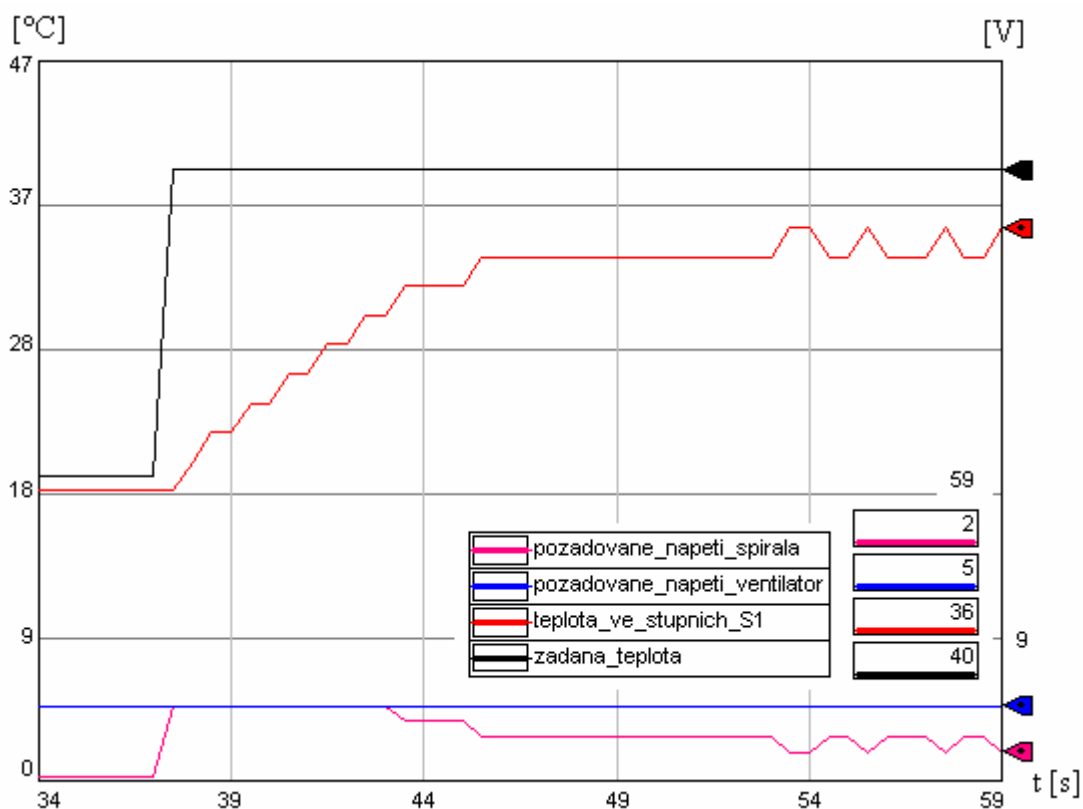
**Graf 4.3 – Průběh regulační odchylky v čase**

Při ověření na reálné soustavě bylo realizováno zapojení dle obrázku 4.3, kde konstanta *pozadovane\_napeti\_ventilator* je nastavena na 5, což odpovídá akčnímu zásahu na ventilátoru. Ten je po celou dobu měření na konstantní hodnotě. Blok DIV\_13 přepočítává řídicí veličinu na jednotku zpracovatelnou programovatelným automatem.



**Obr. 4.3 – Proporcionální regulace pomocí RSLogix**

V bloku SUB\_01 je od řídicí veličiny odečtena výstupní a vzniká tak regulační odchylka  $e$ . Proporcionální zesílení  $r_0 = 25$  je opatřeno pomocí bloku MUL\_06. Akční veličina je omezena v intervalu 0–15488, který odpovídá rozsahu napětí 0–5 V. Blokové zapojení, které je na obrázku 4.3 pracuje paralelně s programem pro přepočítání hodnot, kterému byla věnována kapitola 3.2.4. Časový průběh regulačního pochodu, se skokovou změnou žádané veličiny z 20 na 40 °C, je vidět v grafu 4.4 na kterém lze pozorovat trvalou regulační odchylku, jako byla zjištěna u modelu v grafu 4.2. Na reálné soustavě odpovídá trvalá regulační odchylka 4 °C, což odpovídá naměřenému napětíovému rozsahu 0,25 V. V porovnání s modelem je tento interval 0,2 V. Zvyšováním proporcionální složky lze dosáhnout dalšího zmenšení trvalé regulační odchylky. Nikdy by však, jak již bylo zmíněno, nebyla odstraněna úplně. Z toho důvodu je použita integrační složka dle následující kapitoly.

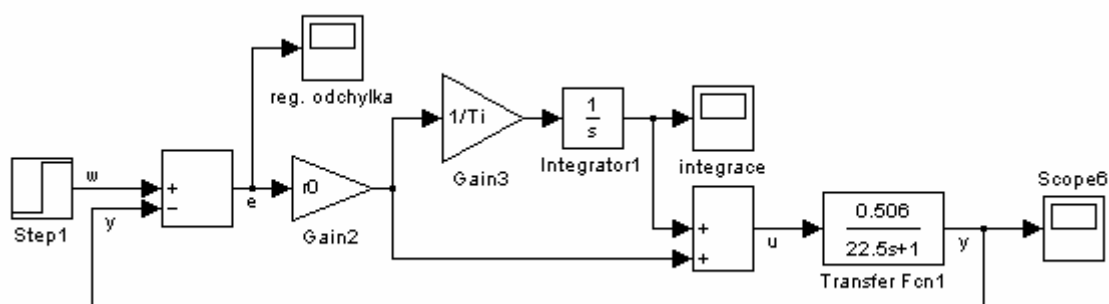


**Graf 4.4 – Průběh proporcionální regulace v čase**



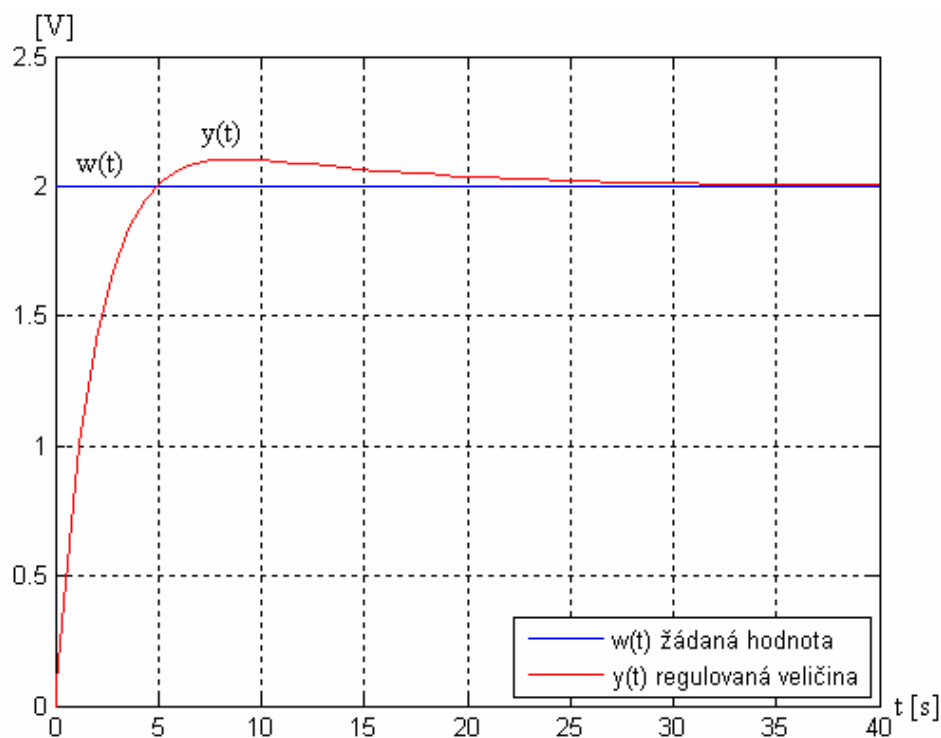
### 4.1.3 Návrh modelu s proporcionálně-integračním regulátorem

Přínos integrace oproti předchozí variantě regulátoru byl již zmíněn. Jejím úkolem je odstranění trvalé regulační odchylky. Struktura regulátoru je použita dle obrázku 4.4 a vyplývá z kapitoly 1.3.2 o spojitě regulaci. Proporcionální zesílení  $r_0 = 25$  je předřazeno před integrační větev. Regulátor je doplněn o integrátor se zesílením  $K_I = \frac{1}{T_I}$  a je nastaven na 0,1 a  $T_I = 10$  sekund. Tyto parametry jsou zvoleny ručním nastavením a nejsou optimalizovány.



Obr. 4.4 – Návrh PI regulátoru a regulovaná soustava

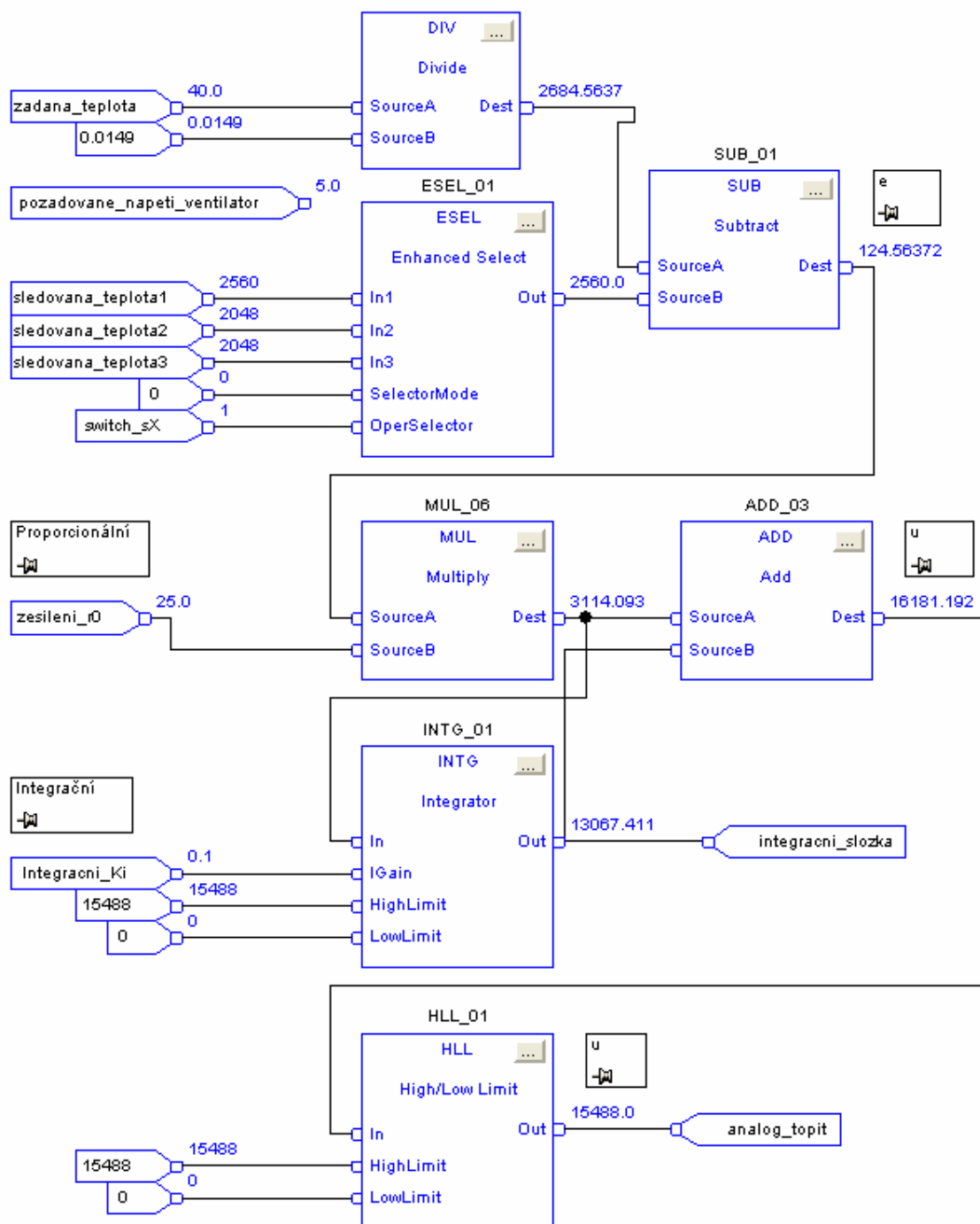
Při skokové změně žádané veličiny  $w$  z 0 na 2 V dochází dle grafu 4.5 k odstranění trvalé regulační odchylky v čase 32 sekund.



Graf 4.5 – Průběh řídicí a výstupní veličiny v čase

#### 4.1.4 Realizace návrhu PI regulátoru pro reálnou soustavu

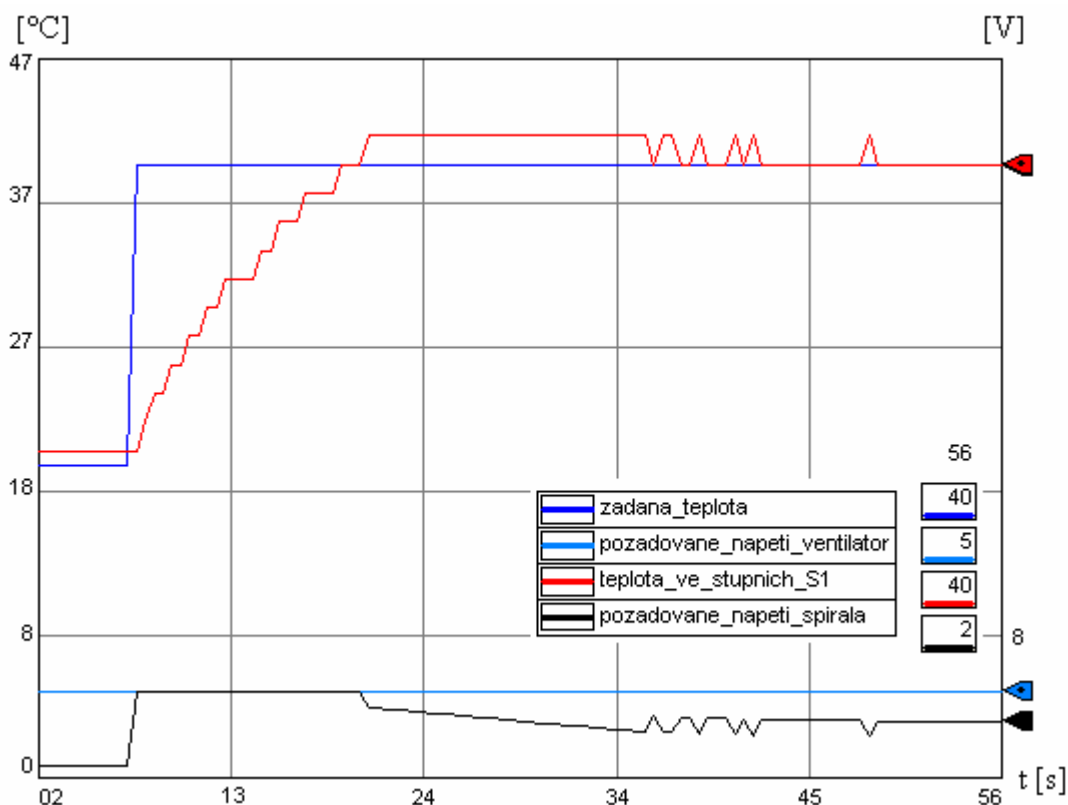
Pro lepší názornost při výuce byl použit rozkreslený návrh regulátoru dle obrázku 4.5. Navrhnuté blokové schéma je tvořeno třemi hlavními částmi. První část je ošetření regulační odchylky, druhá se zabývá vlastním regulátorem tvořeným proporcionální a integrační větví. Poslední část představuje sumaci jednotlivých větví spolu s ošetřením *windup* efektu.



Obr. 4.5 – Blokové schéma proporcionálně-integrační regulace

Do členu SUB\_01, ve kterém je ošetřena regulační odchylka, vstupuje řídicí veličina, která je zde označena jako *zadana\_teploata*. Ta je dle kapitoly 3.2.4 přepočítána na hodnotu zpracovatelnou programovatelným automatem. Druhou vstupní veličinou do tohoto bloku je výstupní hodnota ze soustavy, tedy teplota měřená na senzoru. Je zde možnost výběru ze senzorů *S1*, *S2* a *S3*. Přepínání mezi jednotlivými vstupy je v režii bloku ESEL\_01, který na základě proměnné *switch\_sX* rozhodne, jaký senzor bude vybrán. Při hodnotě rovnající se jedné je vybrán vstup ze senzoru *S1* označený jako *teplota\_ve\_stupních\_S1*.

Blok SUB\_01 poté odečte od řídicí veličiny výstupní. Tím je získána regulační odchylka. V tomto případě je rovna 124,56 a vstupuje přímo do regulátoru. Ten tvoří dvě větve, proporcionální a integrační. V proporcionální větvi je zesilující člen MUL\_06, který je násoben konstantou odpovídající *zesileni\_r0 = 25*. V rámci integrační větve vstupuje regulační odchylka do bloku INTG\_01 a integrační časová konstanta je rovna  $T_I = 10$  sekund a zesílení  $K_I$  je nastaveno na 0,1 ( $1/T_I$ ), kde je postupně integrována.



Graf 4.6 – Průběh proporcionálně-integrační regulace v čase



Integrační složka by se neomezeně integrovala a docházelo by k tzv. *windup* jevu. Pro omezení tohoto vlivu je zde použito omezení *HighLimit* a *Lowlimit* v rozmezí 0 až 15488, což odpovídá rozmezí akční veličiny 0–5 V rovnající se napětí spirály. Výstup integrační a proporcionální části je následně sčítán v bloku *ADD\_03*. V tuto chvíli už lze tento součet chápat jako akční veličinu. Ta je omezena v rozsahu 0–5 V a je přivedena do členu *analog\_topit*. Tím je regulační obvod uzavřen a vzniká tak regulovaná smyčka tvořená soustavou a regulátorem typu PI. Celkový čas regulačního pochodu je roven 51 sekund. dle grafu 4.6.

## 4.2 Optimalizace parametrů regulátoru

Struktura PID regulátoru byla již zmíněna v kapitole 1.3.2. Pro řízení komory je zvolena proporcionálně-integrační varianta. Po zvolení struktury regulátoru je nutné nastavení jeho chování pomocí parametrů  $r_0$  a  $T_I$ . Zvoleným požadavkem je dosažení žádané veličiny s minimálním překmitem v co nejkratším čase. Pro nastavení optimálních parametrů regulátoru je použito nejprve ruční nastavení, následně numerická optimalizace pomocí Matlabu.

Na struktuře regulátoru dle obrázku 4.5 bylo nejprve ručním nastavením zvoleno  $K_I$  rovné nule aby byla vyřazena integrační složka a hodnota  $r_0$  na 0,2. Při žádané hodnotě 40 °C (odpovídá napětí 2 V) je akční veličina rovna 0,1 V a je nutné zvyšovat zesílení proporcionální části. Postupným zvyšováním bylo nastaveno zesílení  $r_0$  až na hodnotu 25, kdy už se trvalá regulační odchylka snižuje již pomalu a akční veličina má hodnotu 3,06 V. V tuto chvíli je připojena integrační složka, která při zesílení  $K_I = 0,1$ , což odpovídá  $T_I = 10$  sekund, odstraní trvalou regulační odchylku. Ruční nastavení regulátoru je  $R_0 = 25$  a  $T_I = 10$  sekund. Tyto parametry jsou vstupem pro následující numerickou optimalizaci.

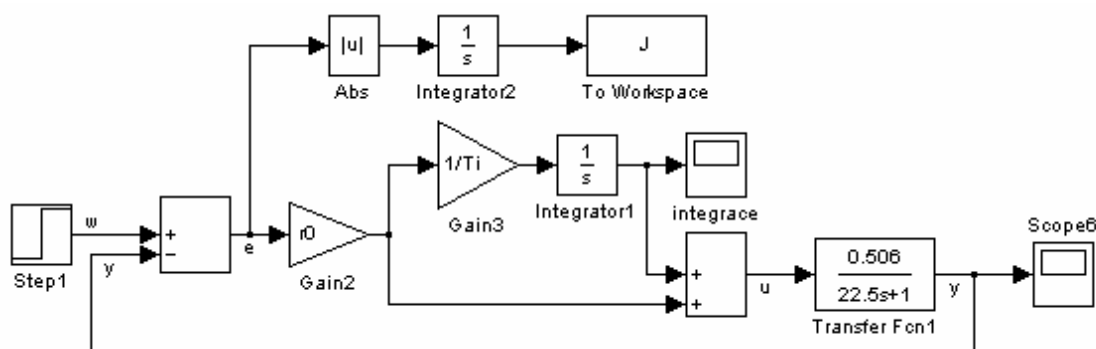
Cílem této optimalizace parametrů regulátoru je minimalizace integrálu regulační plochy. V ideálním případě, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.4, je tato plocha nulová. Dalším sledovaným požadavkem bude ustálení regulované veličiny na žádané hodnotě. Pro optimalizaci jsou vybrána tři integrální kritéria. Každé z nich přináší jinou dynamiku regulace a je tedy vhodné nejprve porovnat průběhy oproti ručnímu nastavení a následně jednotlivé optimalizované průběhy mezi sebou.

#### 4.2.1 Minimalizace lineární plochy s integrálním kritériem

Jako první optimalizace je použita minimalizace lineární plochy s integrálním kritériem v absolutní hodnotě z plochy regulace. Absolutní hodnota je zde zavedena z důvodu překmitnutí regulované soustavy, protože tím by vznikla záporná hodnota regulační odchylky. Integrální kritérium je následující:

$$J = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| dt \quad (4.2.1)$$

Blokové zapojení dle obrázku 4.6 využívá bloku *To Workspace* pro export hodnot funkce  $J$ . Regulační odchylka v absolutní hodnotě vstupuje do integrátoru. Tím je získána hodnota  $e(t)$ . Hodnota  $e(\infty)$  odpovídá časové ose, protože předpokladem je  $e(\infty) = 0$ .



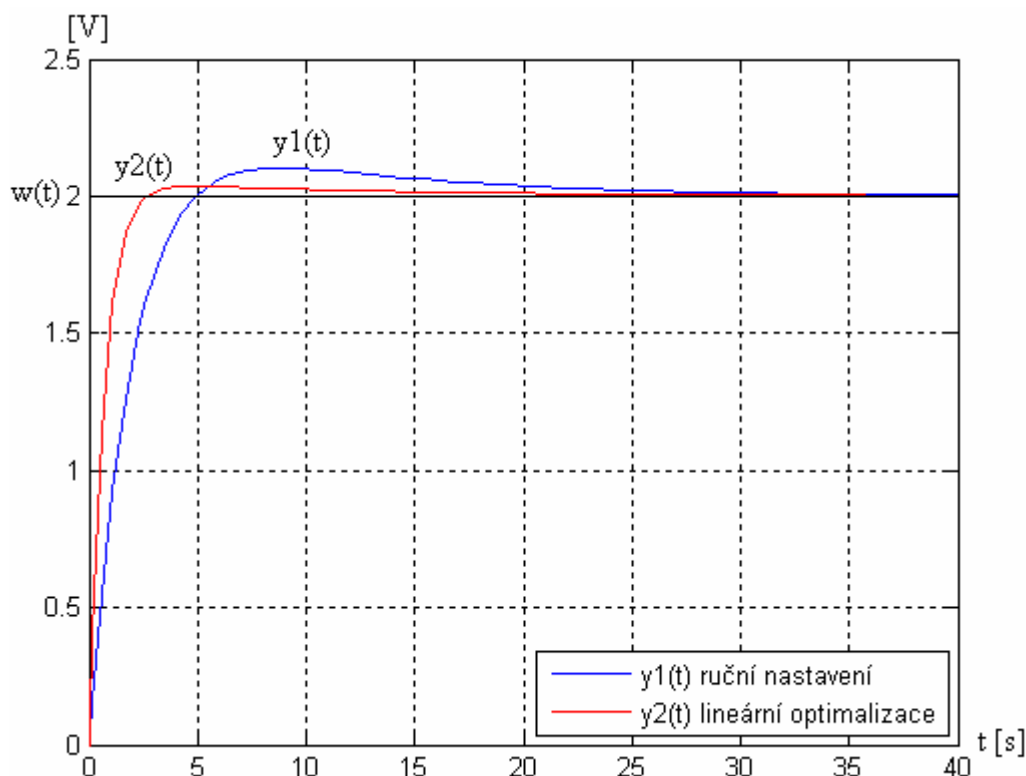
**Obr. 4.6 – Regulační smyčka s exportem do Workspace**

Pro dokončení optimalizace je nutné propojení mezi blokovým schématem, hlavním skriptem a funkcí. Hlavní částí skriptu je simplexová metoda použitá ve funkci *fminsearch()*. Ta má vstupní parametry: optimalizovanou funkci '*fce*' a počáteční vektor  $x0$ , který obsahuje počáteční nastavení  $r_0$  a  $T_I$ . V parametru *options* je nastavení maximálního počtu kroků iterace a výpis optimalizovaných hodnot do *Command Windows*. Ukázka skriptu je na obrázku 4.7. Celý skript i s použitou funkcí je v příloze 9.11.

```
options=optimset('MaxIter',7,'Display','iter');%nastaveni parametru
%pro optimalizaci
%max. povoleny pocet kroku iterace a vypis pri kazde iteraci
x=fminsearch('fce',x0,options); % optimalizace simplexovou metodou
```

**Obr. 4.7 – Funkce fminsearch() a její parametry**

Výsledky optimalizace jsou v kapitole 4.2.4 „porovnání optimalizačních kritérií“, kde parametr  $J$  odpovídající ploše regulace je zmenšen z hodnoty  $4,38 \rightarrow 1,74$ . Tato metoda minimalizuje regulační plochu zvýšením proporcionální složky  $r_0$  z hodnoty  $25 \rightarrow 66,39$  a zmenšením integračního zesílení  $K_I$  zvýšením časové konstanty  $T_I$  z  $10 \rightarrow 12,41$  sekund. Průběh odezvy na skokovou změnu vstupu s ručním nastavením a po lineární optimalizaci je v grafu 4.7. Vykazuje menší překmit, větší dynamiku při náběhu a je také snížen čas regulace z 31 na 21 sekund.



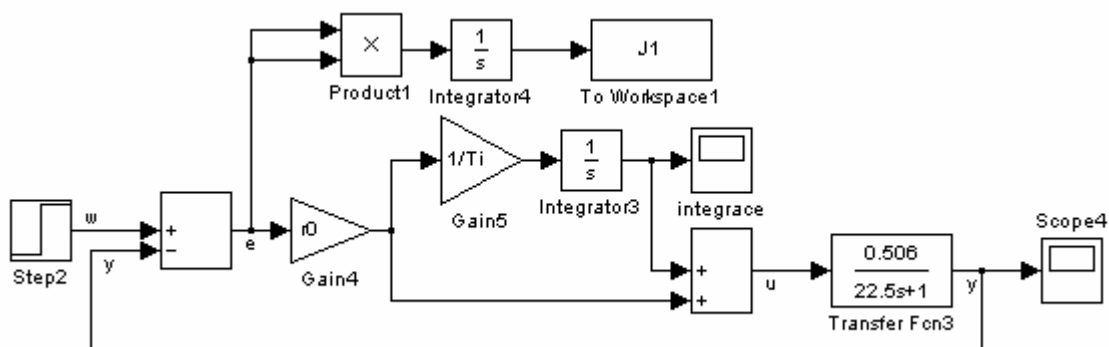
**Graf 4.7 – Odezva po optimalizaci lineární plochy**

#### 4.2.2 Minimalizace kvadratické plochy s integrálním kritériem

Druhým použitým kritériem je kvadratická plocha regulační odchylky. Zde již není nutnost využívat absolutní hodnotu při překmitu žádané hodnoty. Integrální kritérium je následující:

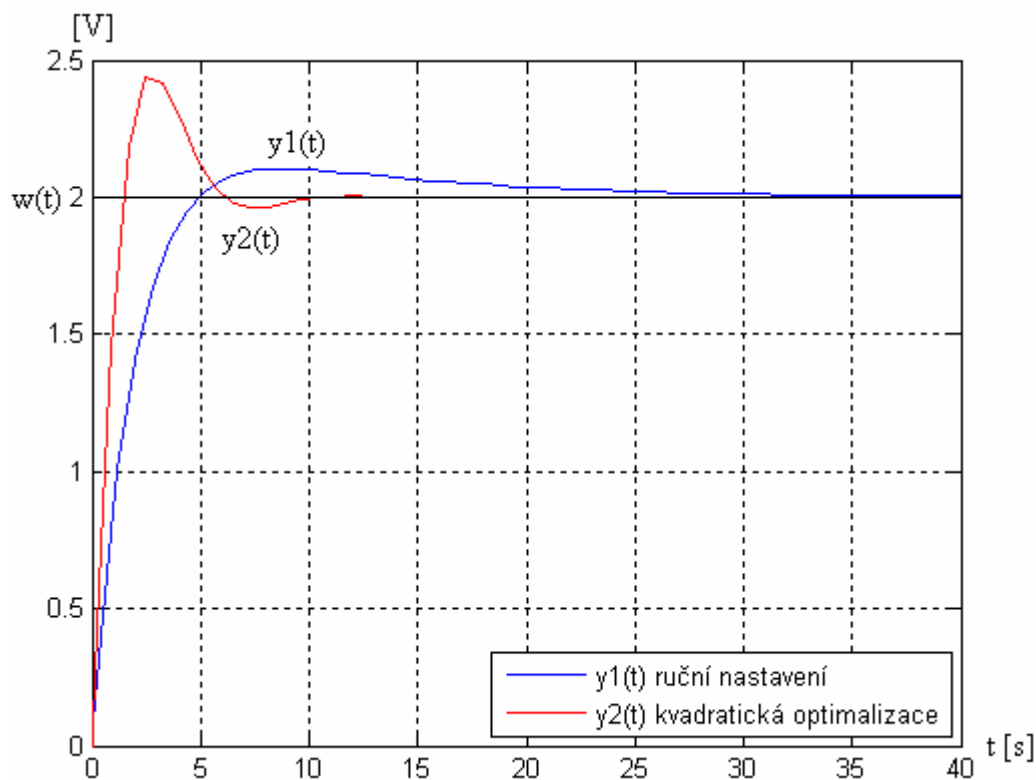
$$J = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 dt \quad (4.2.2)$$

Blokové zapojení je na obrázku 4.8.



**Obr. 4.8 – Regulační smyčka s opt. kvadratické plochy reg. odchylky**

Pro optimalizaci je opět použita iterační funkce  $fminsearch()$ . V osmi krocích iterace je parametr  $J$  snížen z hodnoty  $3,41 \rightarrow 1,91$ . Regulační plocha je zmenšena díky zvýšení proporcionální složky  $r_0$  z hodnoty  $25 \rightarrow 44,77$ . Rozdíl oproti předchozí lineární optimalizaci je ve zvýšení integračního zesílení  $K_I$  snížením časové konstanty  $T_I$  z  $10 \rightarrow 1,38$ . Průběh odezvy na skokovou změnu vstupu s ručním nastavením a po kvadratické optimalizaci je v grafu 4.8. Odezva je se zvýšeným překmitem, větší dynamikou při náběhu a trojnásobným zkrácením doby regulace.

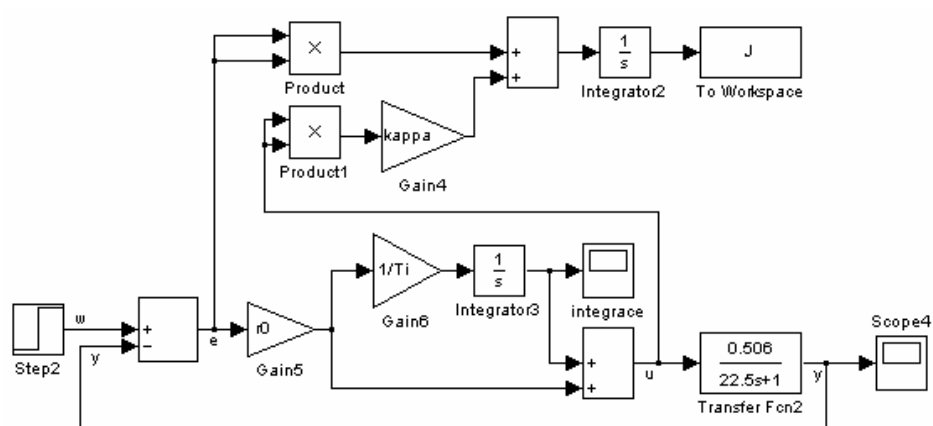


**Graf 4.8 – Odezva po optimalizaci kvadratické plochy reg. odchylky**

### 4.2.3 Minimalizace kvadratické plochy s vážením akční veličiny

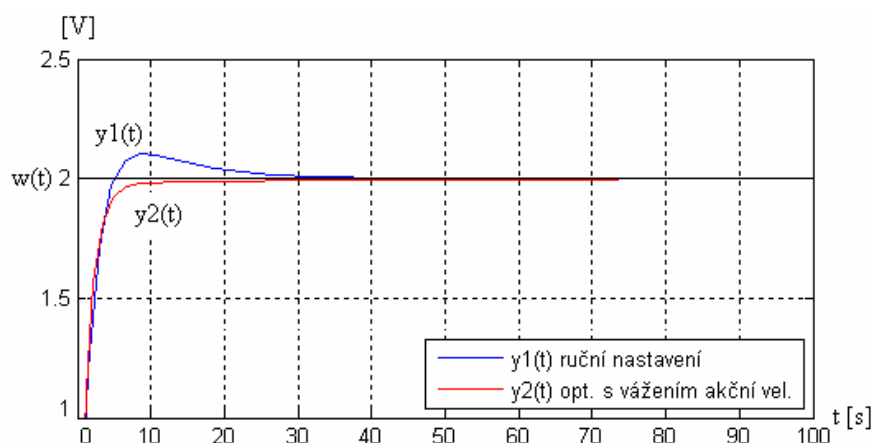
Poslední použitá optimalizace vychází z předchozí kvadratické. Využívá navíc nastavení váhy akčního zásahu pomocí proměnné kappu  $\kappa$ . Tu lze měnit v rozsahu 0–1 a zde byla zvolena 0,001 z důvodu použití relativně „rychlé“ regulované soustavy. Toto nastavení by mělo „zklidnit“ jinak rychlý regulační pochod. Integrální kritérium je následující:

$$J = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 + [\kappa \cdot u]^2 dt \quad (4.2.3)$$



Obr. 4.9 – Regulační smyčka s vážením akční veličiny

Ve dvaceti krocích iterace přinesla tato metoda zmenšení parametru  $J$  z hodnoty  $7,74 \rightarrow 7,49$ . Je tak dosaženo zvýšením proporcionální složky  $r_0$  z hodnoty  $25 \rightarrow 31,76$  a zmenšením integračního zesílení  $K_I$  zvýšením časové konstanty  $T_I$  z  $10 \rightarrow 26,59$  sekund. Průběh odezvy dle grafu 4.9 vykazuje nulový překmit a mírné zvýšení dynamiky. Doba regulace je však dvojnásobně zvýšena. Blokové zapojení viz Obr. 4.9.

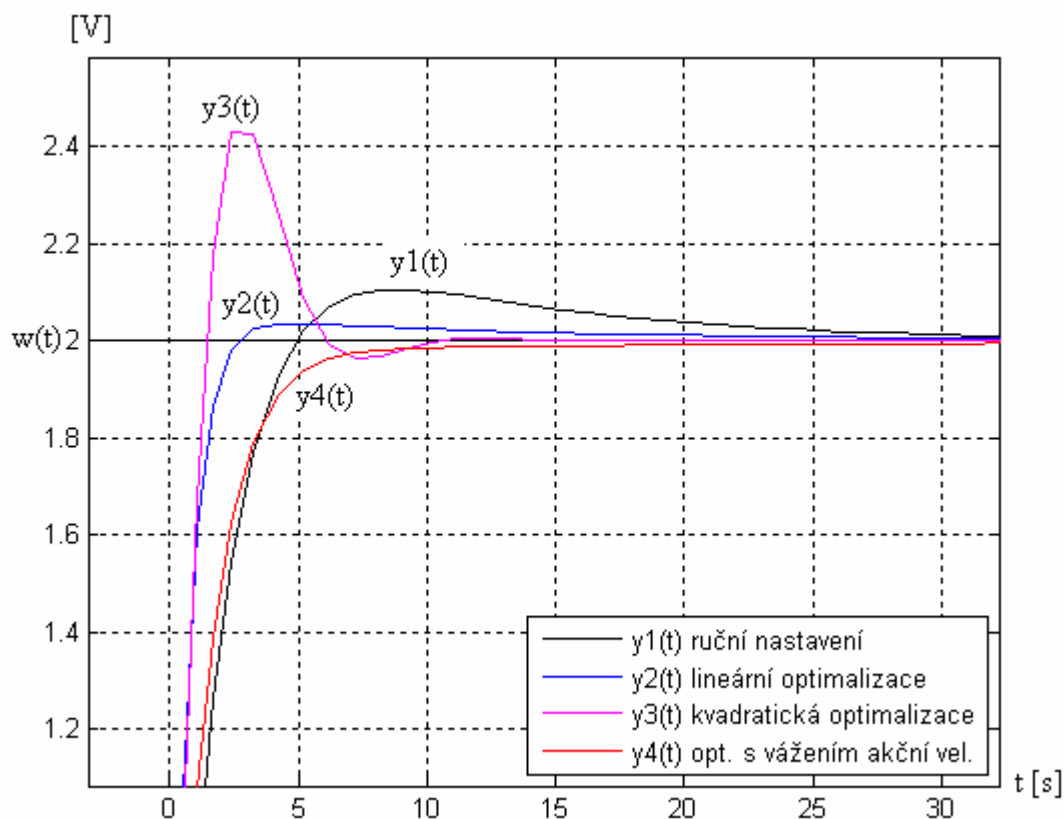


Graf 4.9 – Odezva po optimalizaci s vážením akční veličiny



#### 4.2.4 Porovnání optimalizačních kritérií

Po využití minimalizačních metod z předchozích tří kapitol je vhodné jejich porovnání. I přes fakt, že všechny metody zmenšují plochu regulace snížením parametru  $J$ , je průběh odezvy vždy odlišný. Nejlépe je toto porovnání vidět v grafu 4.10. Zde je znázorněno ruční nastavení parametrů regulátoru, lineární a kvadratická optimalizace a nakonec optimalizace s vážením akční veličiny.



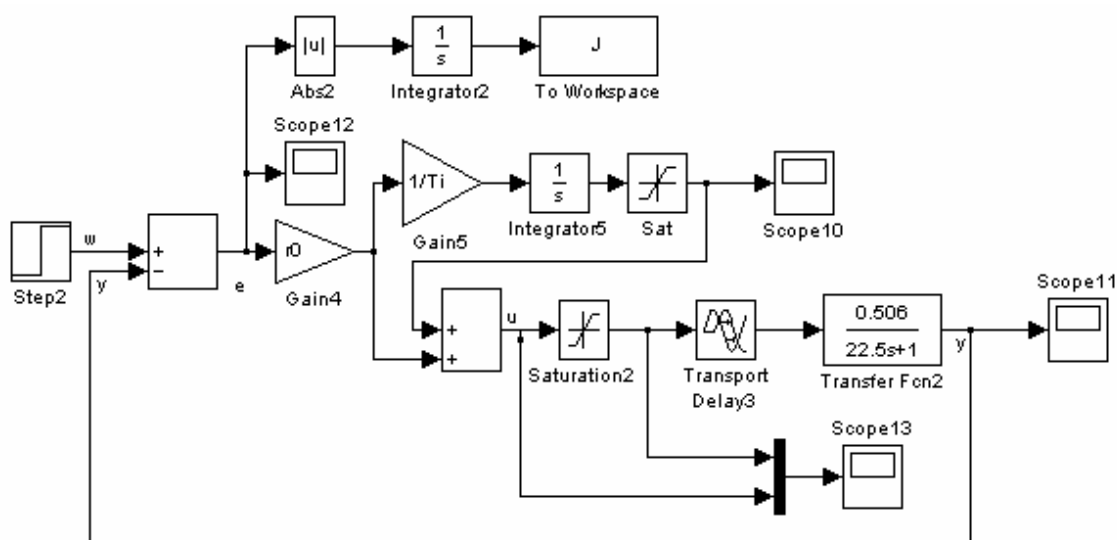
**Graf 4.10 – Detail porovnání optimalizací regulačního pochodu**

Z výsledků porovnání jednotlivých optimalizací dle grafu 4.10 vykazuje optimalizace kvadratické plochy  $y3(t)$  nežádoucí překmit žádané hodnoty o 0,41 V. Na druhou stranu optimalizace s pomocí vážení akční veličiny  $y4(t)$  překmitu nedosahuje, ale žádané veličiny je dosaženo až v čase 80 s. Jako nejvhodnější optimalizace je vybrána lineární plocha  $y2(t)$ . Z tabulky 4.1 je vidět, že optimalizace s tímto lineárním kritériem dosahuje zmenšení plochy regulace  $J$  na 1,7 z původních 4,38. Doba ustálení je sice u kvadratické plochy nižší, ovšem za cenu velkého překmitu žádané veličiny. Výsledky optimalizace ovlivní i další zpřesnění simulace s dopravním zpožděním a ošetřením *windup* jevu. Tím se zabývá následující text.

**Tab. 4.1 – Výsledky optimalizací regulačního pochodu**

	J	J opt.	r0	r0 opt.	Ti	Ti opt.	čas ustálení
<b>Lineární</b>	4,38	1,74	25	66,39	10	12,41	30
<b>Kvadratická</b>	3,41	1,91	25	44,78	10	1,38	15
<b>S vážením</b>	7,74	7,49	25	31,76	10	26,59	80

Simulaci s numerickou optimalizací použitou v kapitole 4.2.1 je nutné doplnit o další dvě omezení. Prvním je ošetření *windup* jevu pomocí bloku saturace v integrační větvy a na výstupu z regulátoru. Toto opatření omezí zvyšování integrační složky nad realizovatelnou mez. Druhým zpřesňujícím prvkem je dopravní zpoždění reálné soustavy, které je rovné 0,5 s. (viz kapitola 3.3.3). Výsledné simulační blokové schéma je na obrázku 4.10. Zapojení je oproti obrázku 4.6 doplněno o bloky *Sat*, *Saturation2* a *transport delay3*.


**Obr. 4.10 – Model s anti-windup a dopravním zpožděním**

Výsledky této optimalizace jsou vidět v tabulce 4.2 v řádku lineární optimalizace. Důležitým výstupem z této optimalizace jsou nové parametry regulátoru, které odpovídají proporcionalní složce  $r_0 = 15,63$  a integrační časové konstantě  $T_I = 12,94$  sekund.

Tyto parametry jsou vstupem pro ověření na reálné soustavě v další kapitole.

**Tab. 4.2 – Výsledky optimalizací regulačního pochodu**

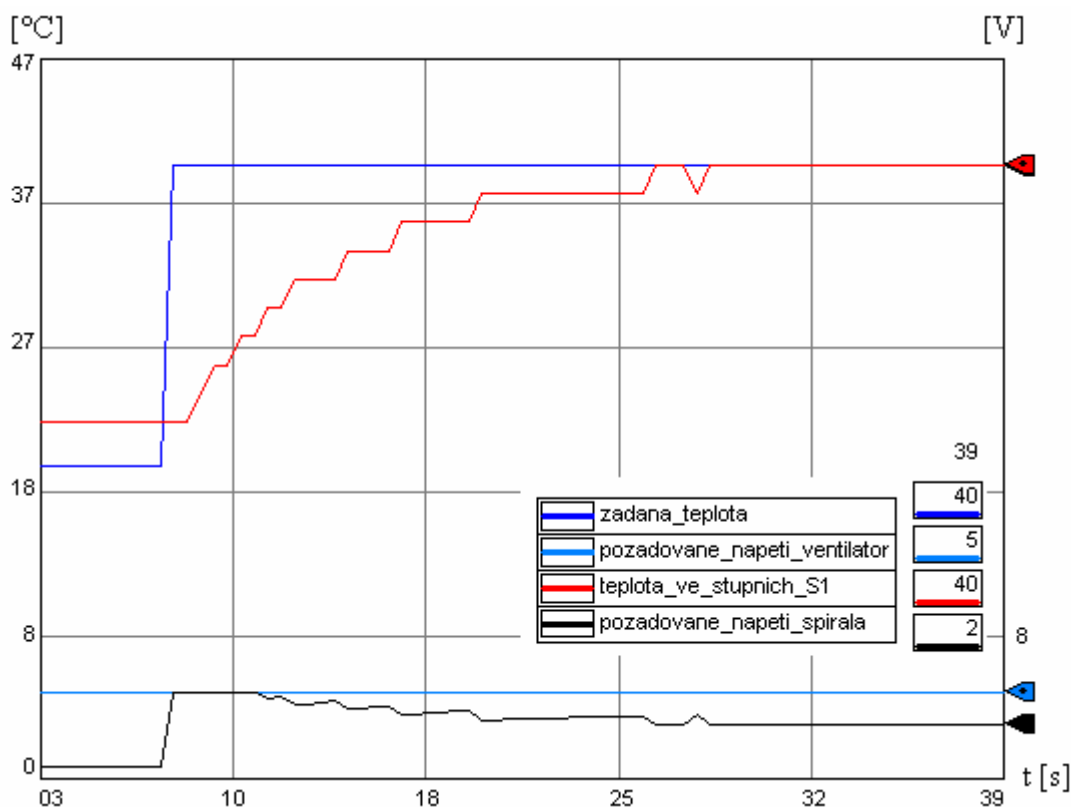
	J	J opt.	r0	r0 opt.	Ti [s]	Ti opt. [s]	ustálení [s]
<b>Lineární</b>	53,13	51,44	25	15,63	10	12,94	450
<b>Kvadratická</b>	34,02	33,12	25	93,12	10	16,36	800
<b>S vážením</b>	166,38	164,19	25	48,75	10	4,88	800

### 4.3 Ověření optimalizovaného modelu

V předchozí kapitole byly zjištěny parametry regulátoru, které je nutné ověřit na reálné soustavě. V této kapitole je nejprve realizováno řízení pomocí proporcionálně-integračního regulátoru a jeho odezva na změnu žádané hodnoty. Následuje měření odezvy při změně poruchové veličiny a realizace řízení pomocí PIDE regulátoru. Poslední kapitola se zabývá dynamickým omezením integrační složky.

#### 4.3.1 Řízení pomocí proporcionálně-integračního regulátoru

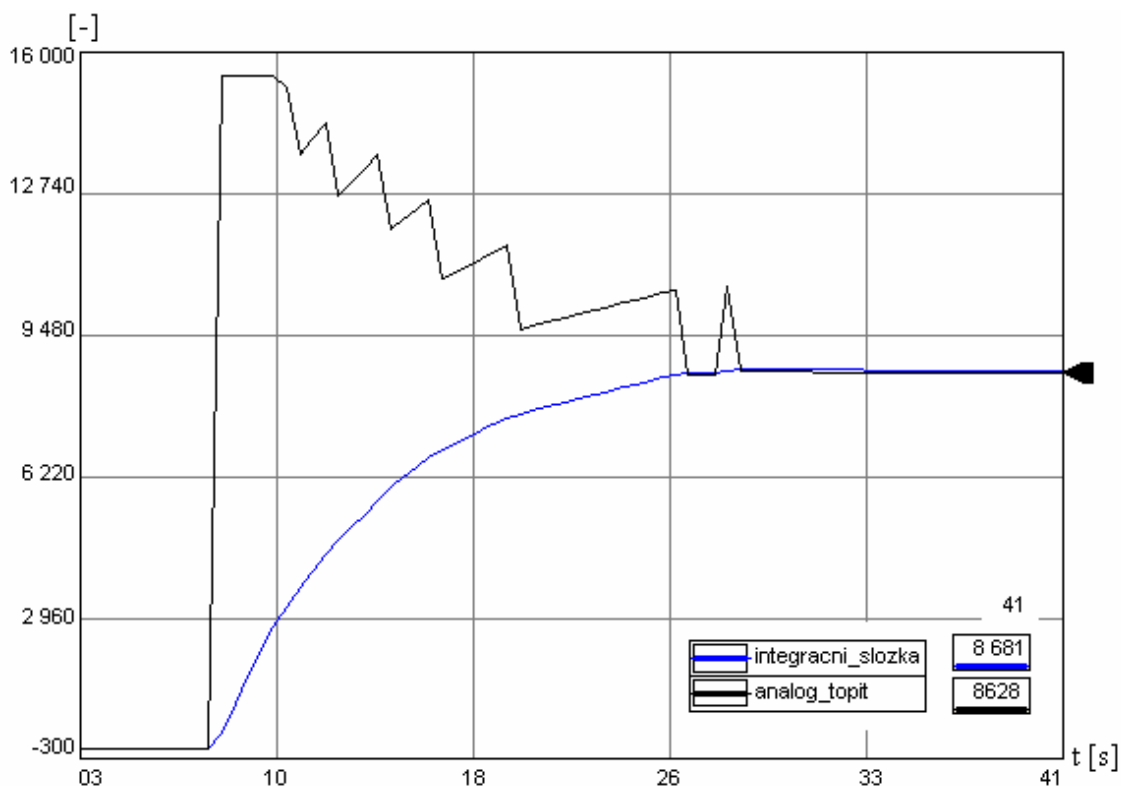
Pro ověření výsledků optimalice pomocí minimalizace lineární regulační plochy je použito blokové schéma na obrázku 4.5. Parametry regulátoru jsou po optimalizaci nastaveny na  $r_0 = 15,63$  a  $K_I = 0,077$ . Výsledkem je regulační pochod dle grafu 4.11. V porovnání s původním neoptimalizovaným průběhem v grafu 4.6, kde byl čas regulace 51 sekund a došlo k překmitu žádané veličiny, je optimalizovaný čas regulace zkrácen na 23 sekund a k překmitu žádané veličiny nedochází.



Graf 4.11 – Optimalizovaný regulační pochod



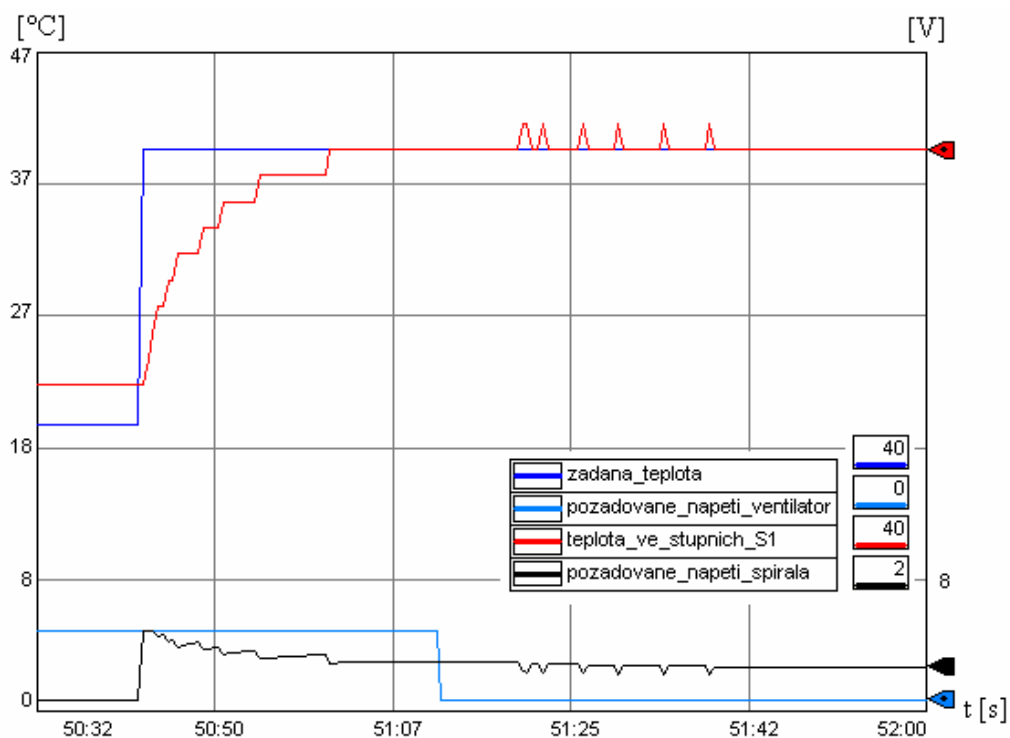
Průběh integrační složky a velikosti akčního zásahu *analog\_topit* je vidět v grafu 4.12. Do času 29 sekund je akční zásah postupně snižován k ustálené hodnotě 8628.



**Graf 4.12 – Průběh optimalizované integrace v čase**

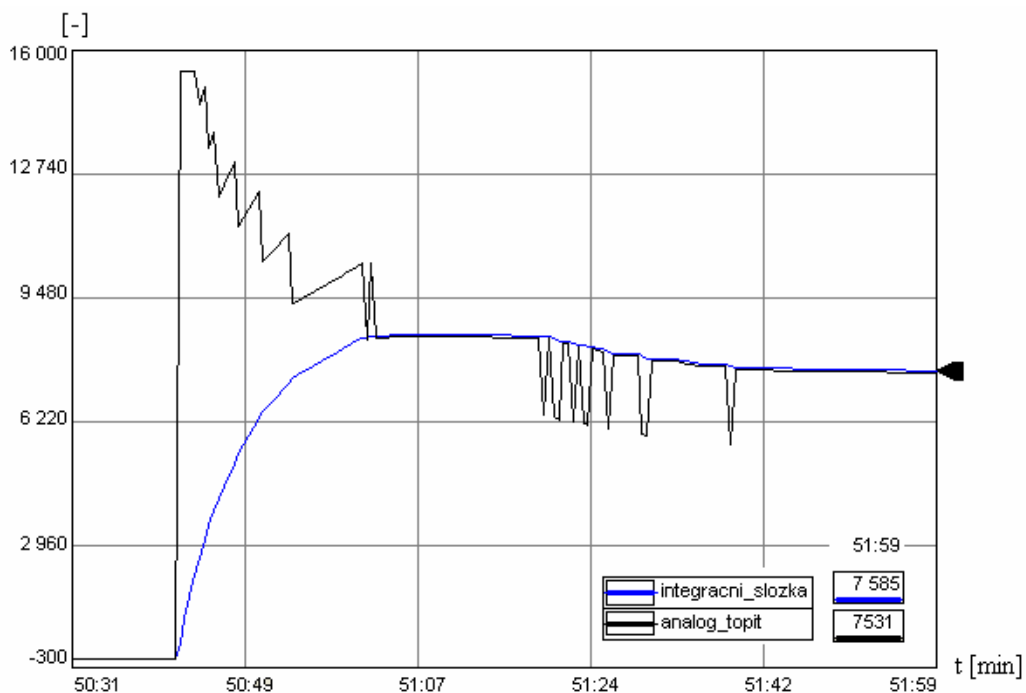
### 4.3.2 Odezva na poruchovou veličinu

Reálná soustava disponuje akčním zásahem odpovídajícím napětí topné spirály, ale také akčním zásahem odpovídajícím napětí ventilátoru. Tohoto analogového vstupu lze využít pro měření odezvy na poruchovou veličinu. Měření probíhá v ustáleném stavu výstupní veličiny. V tento okamžik jsou sníženy otáčky ventilátoru z maxima (5 V) na minimální hodnotu (0 V). Výsledkem je odezva v grafu 4.13. Čas potřebný k ustálení na nové akční veličině je roven 19 sekund. Při změně poruchové veličiny je nutná změna akčního zásahu, ta je vidět v grafu 4.14.



**Graf 4.13 – Odezva na poruchovou veličinu napětí ventilátoru**

Při snížení otáček na ventilátoru v čase 51:09 minut je nutné „odintegrovaní“ akční veličiny. Tím dojde ke snížení napětí na spirále. Z toho vyplývá, že snížením napětí na ventilátoru dochází ke zvýšení teploty na snímačích v tepelné komoře při konstantním akčním zásahu na spirále.



**Graf 4.14 – Průběh integrační složky a akční veličiny při změně poruchové vel.**

### 4.3.3 Řízení pomocí PIDE regulátoru

Pro jiný druh řízení byla využita funkce PIDE regulátoru implementovaného v RSLogix. Na obrázku 4.11 lze vidět výstupní veličinu *sledovaná\_teplo1* rovnající se hodnotě 1536 připojenou do vstupu PV (Process Variable). Řídící veličina označená jako *zadana\_hodnota* odpovídá hodnotě 50 a je připojena do vstupu SPPprog (Set Point Program Value). Akční zásah CVEU (Control Variable Output) je zaveden do analogového výstupu *analog\_topit*.

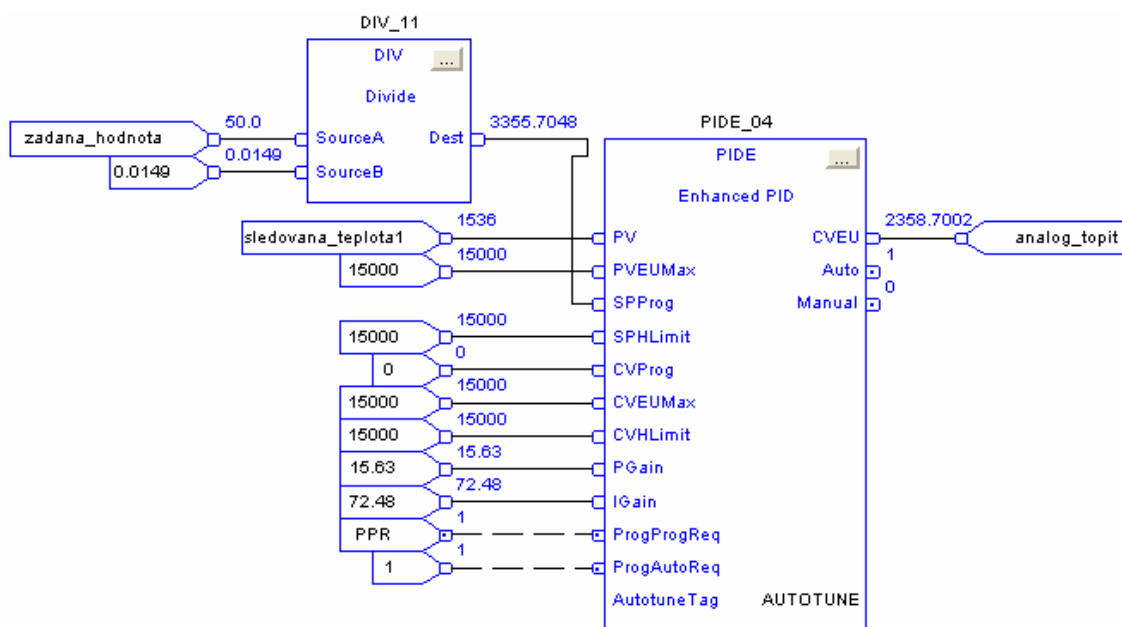
Blok PIDE\_04 používá algoritmus:

$$CV = K_p \cdot E + \sum K_I \cdot E \cdot \Delta t + K_D \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (4.3.1) [18]$$

Kde zesílení integrační složky  $K_I = \frac{K_p}{T_I}$  a  $T_I$  je integrační časová konstanta

uvedená v minutách. Výsledný parametr integrační složky je následující:

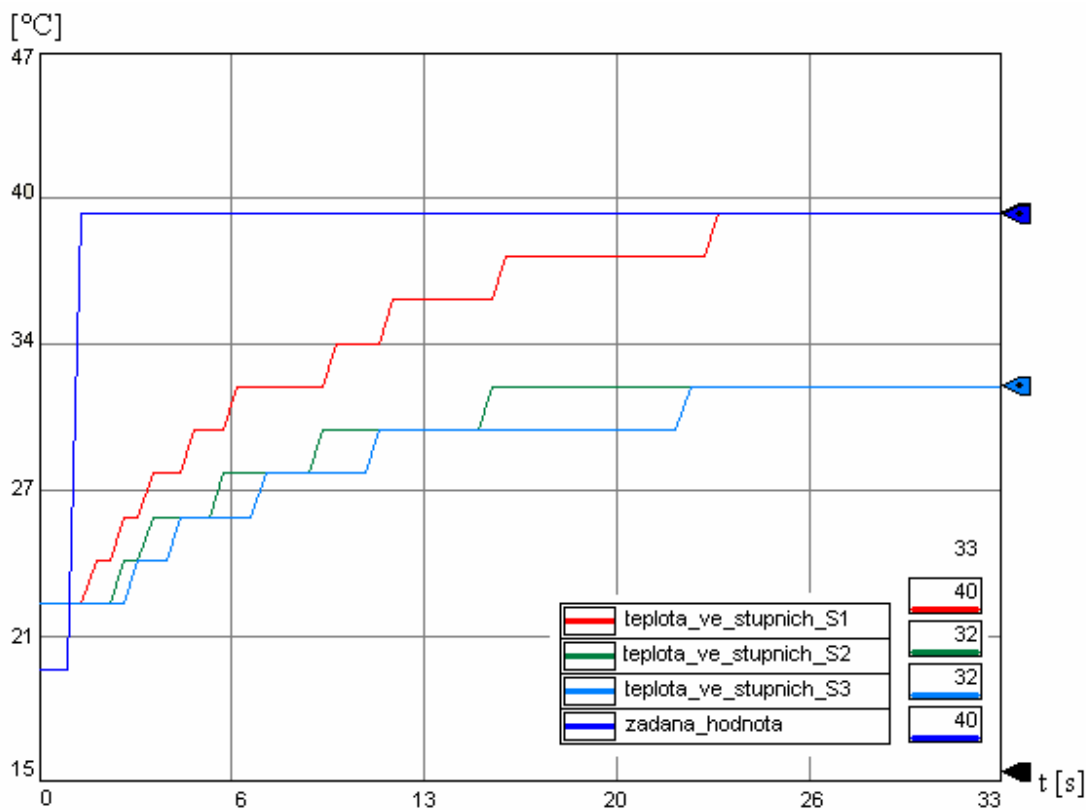
$$K_I = \frac{K_p}{T_I} = \frac{15,63}{12,93} \cdot 60 = 72,48 \quad (4.3.2)$$



Obr. 4.11 – Metoda řízení pomocí PIDE bloku

Blok PIDE\_04 je s následujícím nastavením parametrů regulátoru: zesílení proporcionální složky  $r_0 = 15,63$  a zesílení integrační složky  $K_I = 72,48$  s omezením výstupu v intervalu 0–15000. Průběh výsledného regulačního pochodu je vidět

v grafu 4.15. Celkový čas regulace je roven 22 sekund při změně žádané veličiny z hodnoty 20 °C na hodnotu 40 °C.



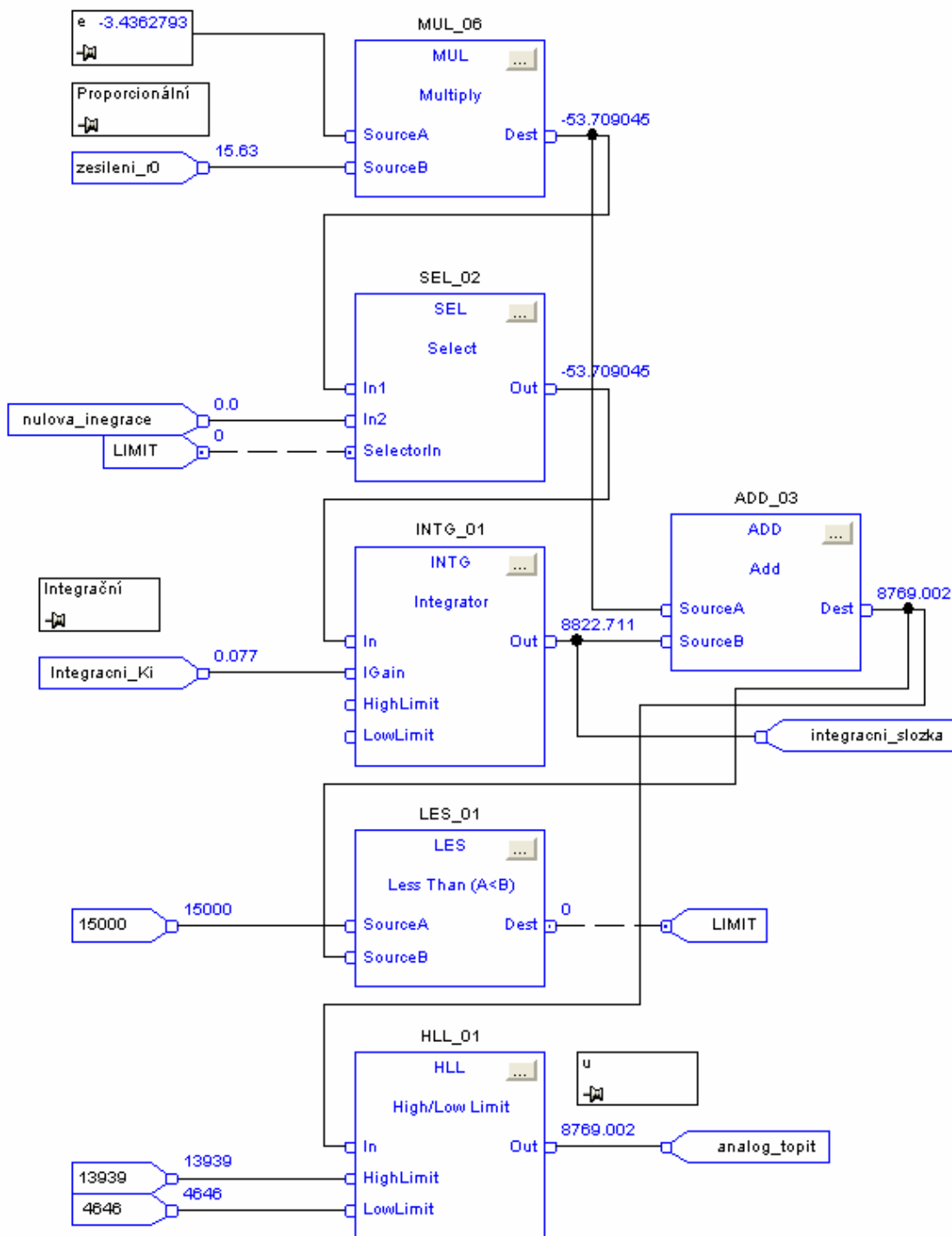
Graf 4.15 – Regulační pochod řízený pomocí PIDE bloku

#### 4.4 Dynamické omezení integrační složky

Do této chvíle bylo vždy použito omezení integrační složky po celou dobu trvání regulačního pochodu v intervalu akčního členu 0–5 V. V této kapitole je použita další možnost potlačení *windup* efektu pomocí dynamického omezení integrační složky. Tato metoda, dle kapitoly 2.2.5, pokládá přírůstek integrační složky, který by vedl k překročení meze realizovatelné akčním členem za nulový. V praxi to znamená, že připojení integrační složky je realizováno pomocí rozhodovacího členu, tzv. *threshold*. Ten je nastaven na hodnotu maximálního realizovatelného akčního zásahu. Jeho vstupem je neomezená akční veličina. V případě, kdy dojde k překročení limitu, tedy dochází k saturaci, je růst integrační složky pozastaven.

Na obrázku 4.12 je vidět tato realizace. Regulační odchylka  $e$  je nejprve zesílena v proporcionální části pomocí bloku SEL\_02. Rozhodovací člen je zde realizován pomocí bloku LES\_01, který v případě, že je neomezená akční veličina větší než realizovatelná mez, nastaví signalizační boolovskou proměnnou LIMIT na 1. Tato

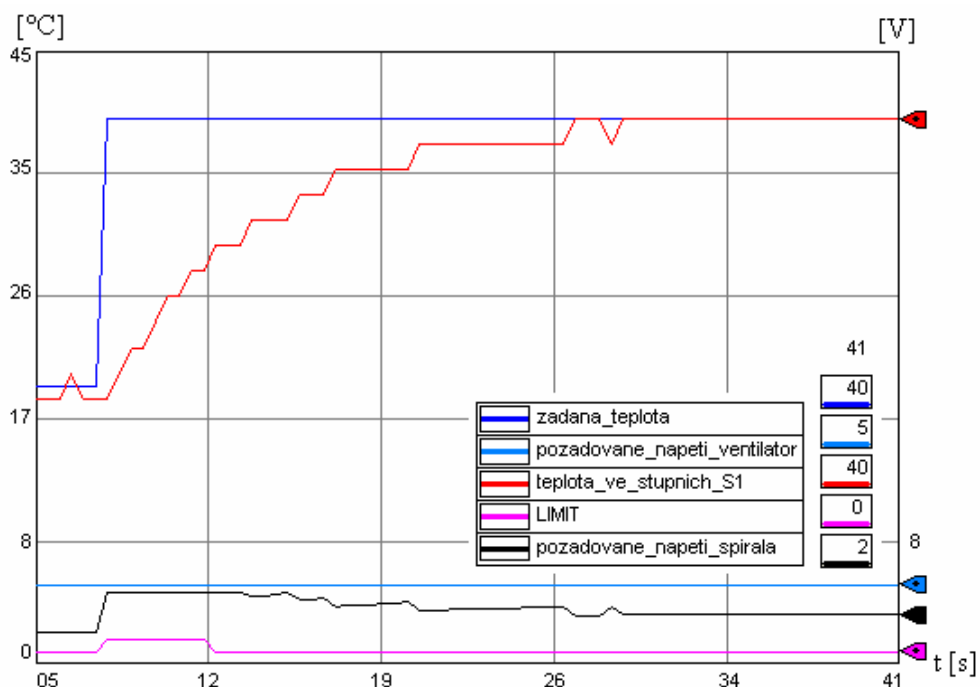
signalizace je využita v bloku SEL\_02, který je součástí rozhodovacího členu. V případě, že se výstup regulátoru nachází v saturaci, pozastaví tento blok růst integrační složky díky nulovému zesílení v této větvy. Po odeznění saturace je složka opět připojena.



Obr. 4.12 – Blokové schéma dynamického odpojení integrační složky

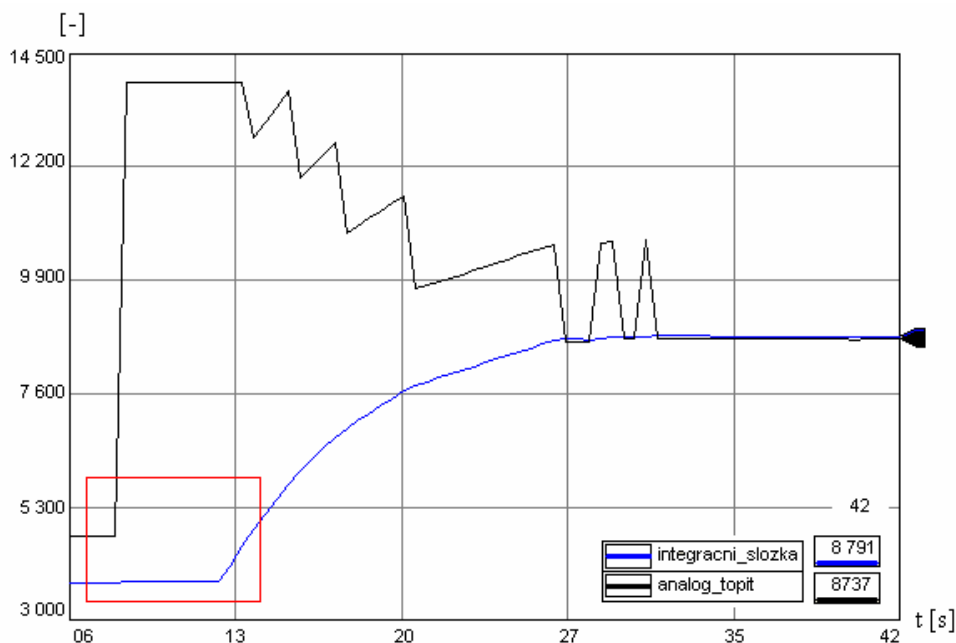


Při měření odezvy regulátoru je nutné dosáhnout saturace na výstupu pomocí velké změny žádané teploty a tím dosáhnout limitu realizovatelné akčním členem. V grafu 4.16 je v čase 6 sekund vidět dosažení tohoto limitu, který má za následek pozastavení růstu integrační složky dle grafu 4.17.



**Graf 4.16 – Regulační pochod při dynamickém odpojení integrační složky**

V porovnání s grafem 4.12 je vidět v grafu 4.17 v červeném obdelníku pozastavení růstu integrační složky při saturaci výstupu regulátoru.



**Graf 4.17 – Průběh integrační složky a akční veličiny**



## 5 REALIZACE ŘÍZENÍ POMOCÍ PC KARTY

Další možností řízení tepelné komory oproti programovatelnému automatu je pomocí osobního počítače. Výhodou je dvanácti-bitový převodník, který přináší zpřesnění kvantování o čtyři bity. Na druhou stranu je oproti programovatelnému automatu nutná přítomnost osobního počítače nejen při inicializaci, ale po celou dobu řízení. V této kapitole je popsána nejprve počáteční inicializace nutná k nastavení řízení tepelné komory a následně je realizováno porovnání simulované a reálné soustavy. Poslední část této kapitoly je věnována dynamickému omezení integrační složky. Jsou vybrány dvě metody odstranění *windup* efektu. Nejprve pomocí dynamického odpojování integrační složky, a poté pomocí vážení žádané veličiny.

### 5.1 Počáteční inicializace

K hardwarovému propojení tepelné komory a osobního počítače je použita svorkovnice PCLD-8710 a karta PCI-1711 od výrobce Advantech [19]. Propojení jednotlivých vstupů a výstupů je realizováno dle tabulky 5.1.

**Tab. 5.1 – Přiřazení vstupů a výstupů komory, karty PCI a svorkovnice PCLD**

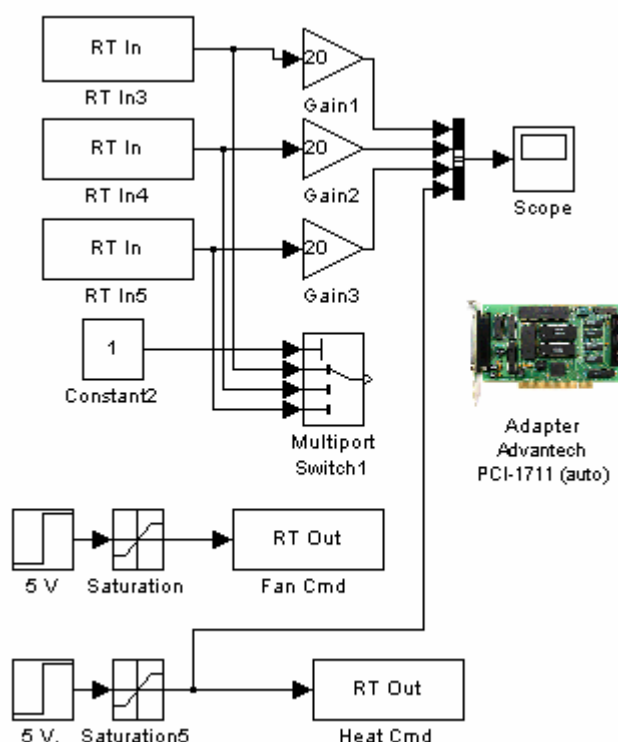
Karta PCI-1711	Kanál PCLD-8710	Tepelná komora
RT In3	AI0	Tmp One
RT In4	AI1	Tmp Two
RT In5	AI2	Tmp Three
RT Out Fan Cmd	DA0	Fan Cmd
RT Out Heat Cmd	DA1	Heat Cmd

Celkový náhled na zapojení při řízení PC kartou je na obrázku 5.1.



**Obr. 5.1 – Řízení pomocí karty PCI-1711**

Pro realizaci softwarové části je využito prostředí Matlab Simulink. Zde je nejprve nutné ošetření vstupů a výstupů pomocí bloku *adapter*. Ten používá pro svůj chod soubor PCI-1711.rtd, který je přiložen na CD k diplomové práci. Jelikož PCI karta pracuje v rozsahu  $\pm 5$  V je nutné ošetření vstupů a výstupů pomocí bloku saturace v rozmezí 0–5 V dle obrázku 5.2. Navzorkované hodnotě 1 V odpovídá teplota 20 °C, proto je výhodné přepočítat tento signál pomocí zesilovače s konstantním zesílením rovným 20 (viz obrázek 5.2).

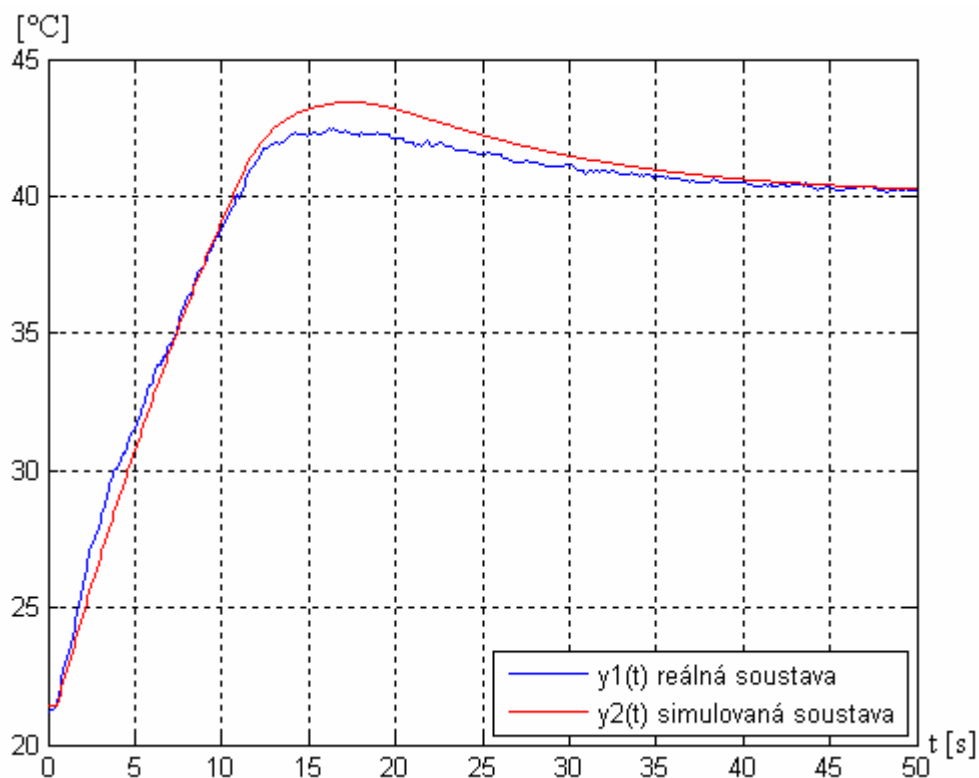


**Obr. 5.2 – Schéma komunikace mezi tepelnou komorou a kartou PCI-1711**

Vzorkovací perioda je nastavena na 0,1 sekund. Výhodou karty PCI je dvanácti-bitový rozsah kvantování, což přináší zpřesnění oproti řízení programovatelným automatem o 4 bity.

## 5.2 Porovnání simulované a reálné soustavy

V této kapitole je použit simulační model z kapitoly 4.1.3, který je porovnán s reálnou soustavou pomocí odezvy na změnu žádané veličiny. Výsledkem je graf 5.1. Modrý průběh odpovídá odezvě na změnu žádané hodnoty z 0 na 40 °C pro reálnou soustavu. Červenou barvou je označen průběh při stejné změně žádané veličiny pro simulovanou soustavu. Celkové schéma je v příloze 9.13.



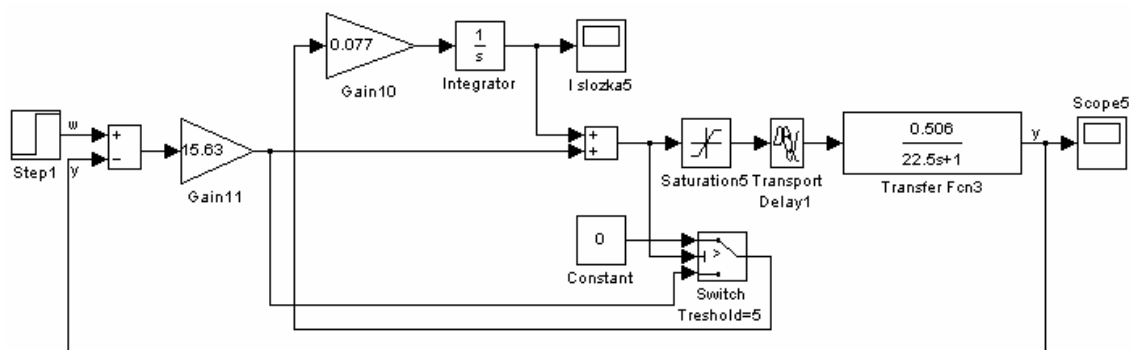
Graf 5.1 – Porovnání reálné a simulované soustavy

### 5.3 Anti-windup mechanismus

V této kapitole je popsáno nejprve dynamické omezení integrační složky a poté metoda vážení žádané veličiny. První metoda již byla realizována v RSLogix 5000 v kapitole 4.4.

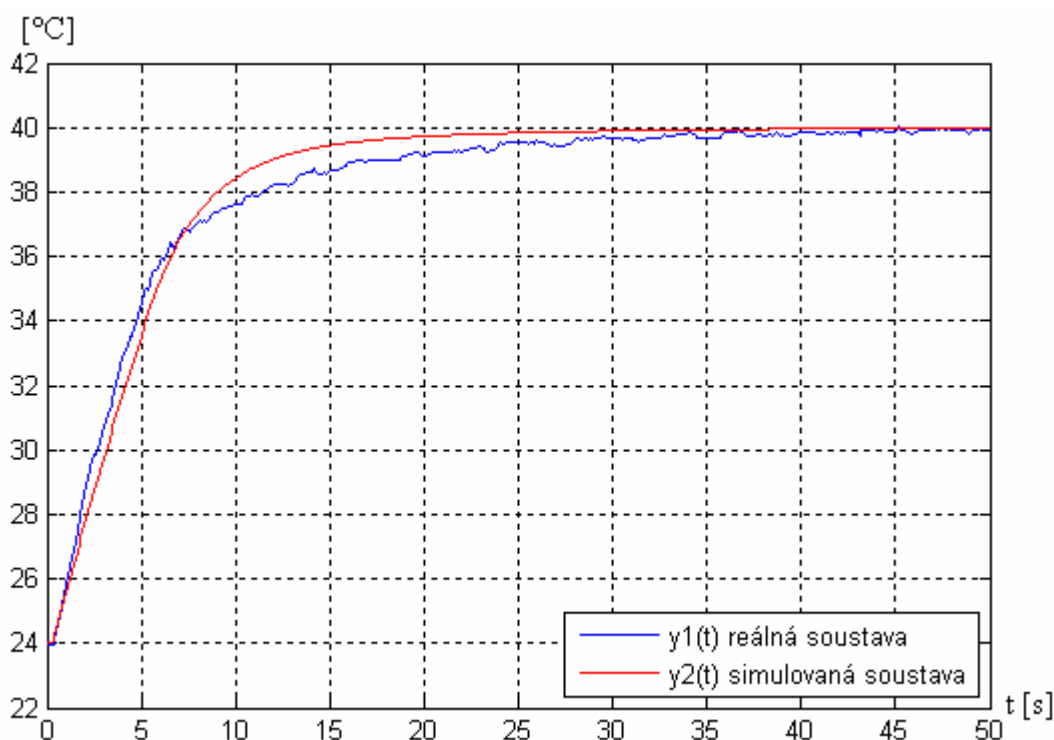
#### 5.3.1 Dynamické omezení integrační složky

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.4 tato metoda pokládá přírůstek integrační složky, který by vedl k překročení meze realizovatelné akčním členem, za nulový.



Obr. 5.3 – Dynamické omezení integrační složky

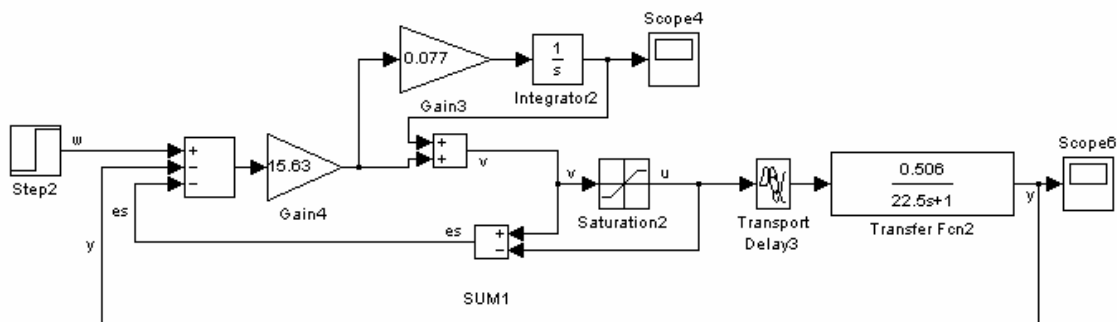
Zapojení na obrázku 5.3 odpovídá strukturou obrázku 4.12 a rozhodovací člen je zde realizován pomocí bloku *Switch Threshold* = 5. Ten, jako v případě uvedeném v kapitole 4.4, rozhodne zda bude integrační složka pozastavena. Hodnota konstanty *threshold* odpovídá konstantě *limit* z kapitoly 4.4. V obou těchto případech je omezení akčního zásahu 5 V. Při dosažení prahu (*threshold*) rovnému 5 V se pozastaví růst integrační složky. Výsledný regulační pochod je v grafu 5.2.



**Graf 5.2 – Porovnání reálné a simulované soustavy při dynamickém anti-windup**

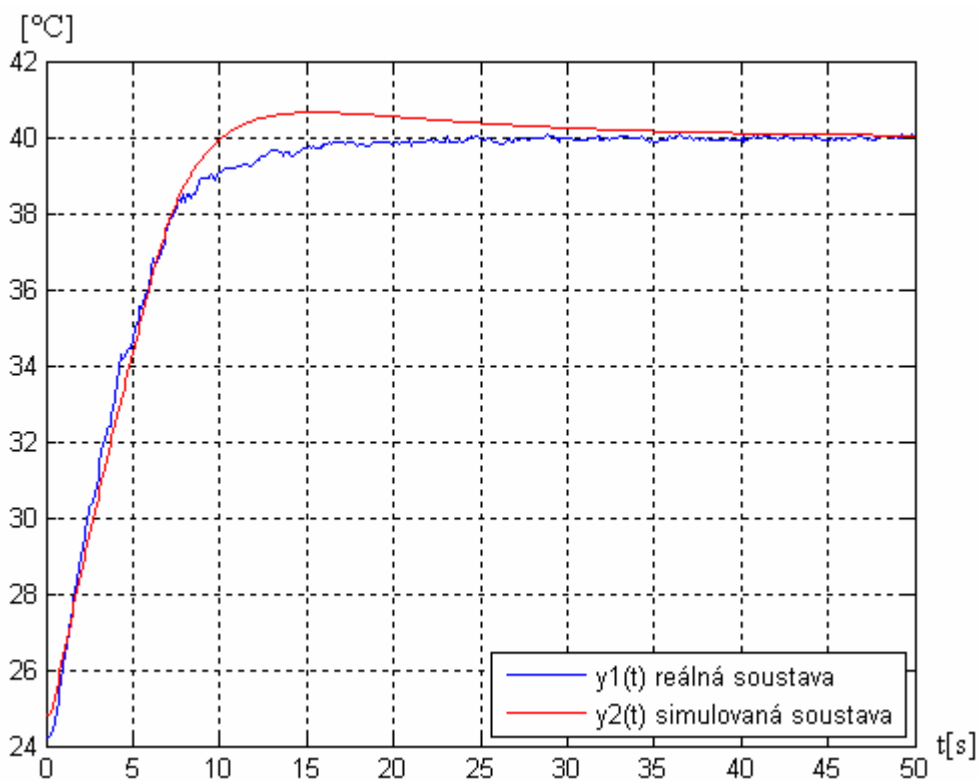
### 5.3.2 Metoda vážení žádané veličiny

V této kapitole je využita další možnost potlačení *windup* efektu pomocí dynamického omezení integrační složky, a to metodou vážení žádané veličiny. Regulátor je doplněn o druhou zpětnou vazbu dle obrázku 5.4, která je neaktivní v případě, kdy nedochází k saturaci akční veličiny. To je ošetřeno pomocí bloku *Saturation2* v kombinaci se sumátorem *SUM1*, který v případě  $v = u$  deaktivuje tuto zpětnou vazbu. V případě, že je výstup regulátoru v saturaci, tak pomocná zpětná vazba reguluje saturační chybu  $e_s$  tak, aby byla nulová. Tím způsobí, že hodnoty výstupu integrátoru jsou v saturačním limitu. To znamená, že je snížena žádaná hodnota na saturační limit ve chvíli, kdy je regulační odchylka záporná. Zapojení je na obrázku 5.4.



**Obr. 5.4 – Blokové schéma pro metodu vážení žádané veličiny**

V této souvislosti stojí za zmínku popis řešení situace, ve které při měření reálné a simulované soustavy nevycházely průběhy regulačních pochodů porovnatelně. Po důsledné kontrole byla zjištěna příčina, kterou byla absence teploty okolí v simulované soustavě. Pouhý posun hodnot po vertikální ose by nevedl k lepším výsledkům. Pro odpovídající simulaci, byl model doplněn o přičítání aktuální teploty ve zpětné vazbě regulační smyčky. V příloze 9.12. je tato konstanta rovna 1,07 a odpovídá pokojové teplotě 21,4 °C



**Graf 5.3 – Regulační pochod pro metodu vážení žádané veličiny**



## 6 VZOROVÁ ÚLOHA PRO ÚČELY VÝUKY

Experiment s tepelnou komorou bude po dokončení práce sloužit jako učební pomůcka v předmětu Prostředky automatického řízení. Jejím úkolem je seznámit studenta s novým vývojovým prostředím RSLogix 5000 oproti stávajícímu Simulinku. Vzorová úloha pro účely výuky je koncipována do čtyř následujících úkolů.

### Úkoly:

#### 1 SEZNÁMENÍ S PRVKY ÚLOHY

- a) Seznamte se s ovládáním a výstupem tepelné komory Quanser
- b) Prostudujte návod na počáteční inicializaci RSLogix 5000

#### 2 IDENTIFIKACE REGULOVANÉ SOUSTAVY

- a) Změřte odezvu a zesílení reálného systému
- b) Určete statické charakteristiky všech senzorů teploty
- c) Odměřte časovou konstantu a dopravní zpoždění pro snímač Tmp One
- d) Určete výsledný přenos i s dopravním zpožděním tohoto snímače

#### 3 NÁVRH REGULÁTORU

- a) Pro senzor Tmp One navrhnete:

Dvoupolohový regulátor

Proporcionální regulátor

Proporcionálně-integrační reg. s parametry  $r_0 = 15,63$   $T_I = 12,98$  sekund

- b) Porovnejte jednotlivé druhy regulátorů a jejich odezvy na skokovou změnu vstupu. Pro proporcionálně-integrační regulátor zjistěte odezvu na poruchovou veličinu změny napětí ventilátoru Fan Cmd.

#### 4 NÁVRH ANTI-WINDUP

- a) Navrhnete a ověřte mechanismus pro odstranění windup efektu
- b) Vykrešlete do grafu průběh integrační složky



Nejprve se student seznámí s prvky úlohy, které jsou v příložené dokumentaci se zadáním. Poté dostává za úkol identifikovat regulovanou soustavu a navrhnout vhodný regulátor. V poslední části navrhne *anti-windup* mechanismus. Jsou vyhotovena dvě zadání umístěná v příloze diplomové práce na CD. První je určeno pro studenta a druhé, které obsahuje i řešení zadání a návod na kalibraci snímačů, je určeno pro vyučujícího. Součástí zadání je i popis prvků úlohy a návod na počáteční inicializaci a základní ovládání funkcí RSLogix obsažený v příloze na CD.





## 7 ZÁVĚR

Vybavením laboratoře na počátku diplomové práce, byl programovatelný automat Compact Logix L32E od společnosti Rockwell Automation a tepelná komora výrobce Quanser Innovate Educata. Kompletní návrh a realizace struktury mezi těmito prvky je jednou z nepostradatelných součástí celkové realizace systému. Pro ověření funkčnosti na fyzikálním modelu bylo navrženo a realizováno blokové schéma uvedené ve třetí kapitole. Při zapojování elektrického obvodu bylo nutné nejprve seznámení se s konkrétním analogovým vstupně-výstupním modulem 1769-IF4X0F2 Rockwell a poté zvolit vhodnou strukturu zapojení. Vzhledem k tomu, že jsou v laboratoři k dispozici dva přípravky s tepelnou komorou a rovněž dva programovatelné automaty Rockwell Automation, byla vytvořena kabeláž pro obě úlohy.

Poté bylo nutné provést počáteční inicializaci experimentu s tepelnou komorou, která vyžadovala kalibraci senzorů teploty a vyřešení efektu zvýšeného kumulování tepelného toku v koncové části komory a tím docházelo ke zvyšování teploty v této části. Tento jev byl potlačen odstraněním plastového krytu výdechu tepelné komory, který neměl 100% propustnost tepelného toku a byl příčinou tohoto jevu. Poté byl proveden přepočítání vstupních a výstupních vzorkovaných hodnot jako je například teplota ve stupních Celsia či ovládání pomocí jednotek napětí. Na konci třetí kapitoly je identifikace řízené soustavy, která obsahuje výpočet přenosu soustavy s dopravním zpožděním.

Pro realizaci vybraných řídicích algoritmů byly použity dvoupolohové, proporcionální a proporcionálně-integrační struktury regulátoru. Z výsledků měření, i z předpokladů je patrné, že poslední varianta přináší nejlepší výsledky odezvy při změně řídicí veličiny. Jako dostačující je také struktura s dvoupolohovým řízením. Pro optimální nastavení bylo využito numerické iterační funkce *fminsearch()* pomocí Matlabu. Jako nejvhodnější kritérium jakosti vyšla optimalizace s lineární plochou regulace v absolutní hodnotě, která vykazovala minimální překmit řídicí veličiny a zkrácení doby regulace.

Realizovány byly *anti-windup* mechanismy, jednak omezením integrační složky, poté dynamickým omezením integrační složky a nakonec s vážením žádané veličiny. Tyto řídicí algoritmy byly realizovány na zapojení s programovatelným automatem



Compact Logix L32E od společnosti Rockwell a na zapojení s počítačovou kartou PCI-1711 Advantech. Jako nejvhodnější varianta *anti-windup* mechanismu vychází metoda s vážením žádané veličiny. V této souvislosti stojí za zmínku popis řešení situace, ve které při měření reálné a simulované soustavy nevycházely průběhy regulačních pochodů porovnatelně. Po důsledné kontrole byla zjištěna příčina, kterou byla absence teploty okolí v simulované soustavě. Pouhý posun hodnot po vertikální ose by nevedl k lepším výsledkům. Pro odpovídající simulaci, byl model doplněn o přičítání aktuální teploty ve zpětné vazbě regulační smyčky.

V šesté kapitole je uvedena vzorová úloha pro účely výuky v předmětu Prostředky automatického řízení. Obsahuje úkoly pro studenta v oblasti seznámení se s RSLogix 5000 Enterprise Series jako jsou: identifikace řízené soustavy, návrh rozdílných struktur regulátorů a návrh mechanismu pro odstranění *windup* jevu. Protože optimalizace parametrů je probírána v předcházejícím předmětu Základy spojitého řízení, není po studentovi vyžadována a úkoly se více zaměřují na struktury regulátorů a především na mechanismus *anti-windup*.

Měření regulačních pochodů při zapojení s PCI kartou sice vykazuje přesnější měření o 4 bity, avšak řízení pomocí programovatelného automatu se stejnou strukturou řídicího programu dosahuje porovnatelných výsledků. Rozdíl v přístupu programování pomocí Matlabu a RSLogix je nepatrně odlišný. Realizace uzavřené smyčky v prostředí Matlabu, například při řešení zpětné vazby regulátoru, povolí uzavření tohoto obvodu. Tento přístup myšlení v RSLogixu není možný. Řešením v této situaci je ukládání hodnot výstupu do pomocné proměnné a následné použití na vstupu. Tento fakt byl zjištěn při realizaci dynamického omezení integrační složky. Pomocnou proměnnou v tomto případě byl *LIMIT*.

Přínos této práce pro výuku je především v nové metodě řízení procesu pomocí programovatelného automatu. Do této chvíle se k řízení v předmětu prostředky automatického řízení používaly výhradně počítačové karty v kombinaci s vývojovým prostředím Matlab Simulink. Programovatelné automaty, které jsou používány na Fakultě mechatroniky v jiných předmětech, jsou prioritně značky Teco a Siemens. Použití nového typu programovatelných automatů Rockwell je proto přínosné.

Další možností rozšíření této úlohy může být softwarová část, ve které je možné využít jiné struktury regulace případně použít další *anti-windup* mechanismy.



## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HLAVA, Jaroslav. Prostředky automatického řízení II [online]. Praha : ČVUT, 2000 [cit. 2011-12-13]. Dostupné z WWW: <[http://www.fm.tul.cz/~jaroslav.hlava/par/Skripta\\_PAR.pdf](http://www.fm.tul.cz/~jaroslav.hlava/par/Skripta_PAR.pdf)>. [e-kniha]
- [2] BAYER, Jiří; HANZÁLEK, Zdeněk; ŠUSTA, Richard. Logické řízení. 2. Praha: ČVUT, 2008. 270 s. ISBN 978-80-01-04106-2. [kniha]
- [3] Allen-Bradley. [online]. 2010 [cit. 2011-12-13]. 1768 CompactLogix Controllers User Manual. Dostupné z WWW: <[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1768-um001\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1768-um001_-en-p.pdf)>.
- [4] ŠMEJKAL, Ladislav; MARTINÁSKOVÁ, Marie. PLC a automatizace : 1.Základní pojmy, úvod do programování. Praha : BEN, 2009. 224 s. [kniha]
- [5] ŠMEJKAL, Ladislav. PLC a automatizace 2 : Sekvenční logické systémy a základy fuzzy logiky. Praha : BEN, 2009. 208 s. [kniha]
- [6] CHLEBNÝ A KOL., Jan. Automatizace a automatizační technika 3 : Prostředky automatizační techniky. 4. Brno : Computer press a.s, 2009. 296 s. ISBN 978-80-251-2523-6. [kniha]
- [7] ĎAĎO, Stanislav; KREIDL, Marcel. Senzory a měřicí obvody. Praha : ČVUT, 1996. 315 s. [kniha]
- [8] Quanser Innovate Educate [online]. 2010 [cit. 2010-11-01]. Modeling and Process Control Heat Flow Student Manual. Dostupné z WWW: <[http://www.quanser.com/english/html/home/fs\\_homepage.html](http://www.quanser.com/english/html/home/fs_homepage.html)>. [webová stránka]
- [9] Quanser Innovate Educate [online]. 2010 [cit. 2010-11-01]. Modeling and Process Control Heat Flow Instructor Manual. Dostupné z WWW: <[http://www.quanser.com/english/html/home/fs\\_homepage.html](http://www.quanser.com/english/html/home/fs_homepage.html)>. [webová stránka]
- [10] Quanser Innovate Educate [online]. 2010 [cit. 2010-11-01]. Modeling and Process Control Heat Flow User Manual. Dostupné z WWW: <[http://www.quanser.com/english/html/home/fs\\_homepage.html](http://www.quanser.com/english/html/home/fs_homepage.html)>. [webová stránka]
- [11] Quanser innovate educate : First order modeling and control [online]. 2010 [cit. 2011-03-28]. Quanser. Dostupné z WWW: <<http://www.quanser.com/english/downloads/products/Heatflow.pdf>>. [webová stránka]
- [12] Umth.fme.vutbr [online]. 2011 [cit. 2011-03-28]. Umth.fme.vutbr. Dostupné z WWW: <<http://www.umth.fme.vutbr.cz/LabExpMech/teplo.pdf>>. [webová stránka]

- [13] Mti.tul [online]. 2009 [cit. 2011-03-28]. Mti.tul. Dostupné z WWW: <[www.mti.tul.cz/files/dms/05\\_teploata.ppt](http://www.mti.tul.cz/files/dms/05_teploata.ppt)>. [webová stránka]
- [14] JANEČEK, Josef. Mti.tul [online]. 2011 [cit. 2011-10-28]. Základní charakteristiky dynamických systémů. Dostupné z WWW: <[www.mti.tul.cz/files/zsr/Zakladni\\_charakteristiky\\_DS.ppt](http://www.mti.tul.cz/files/zsr/Zakladni_charakteristiky_DS.ppt)>. [webová stránka]
- [15] Allen-Bradley. [online]. 2001 [cit. 2011-11-21]. Compact™ 8-Bit Low Resolution Analog I/O Combination Module. Dostupné z WWW: <[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1769-um008\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1769-um008_-en-p.pdf)>. [webová stránka]
- [16] JANEČEK, Josef. Mti.tul [online]. 2009 [cit. 2011-11-02]. Numerická optimalizace parametrů regulátoru. Dostupné z WWW: <<http://www.mti.tul.cz/files/zsr/numericka-optimalizace-parametru-regulatoru.pdf>>.
- [17] KUPKA, Libor. Základy kybernetiky [online]. 2011 [cit. 2011-11-02]. Kritéria jakosti regulace a složitější regulační obvody. Dostupné z WWW: <[http://www.fm.tul.cz/~libor.kupka/10\\_-\\_Pokrocile\\_techiky.pdf](http://www.fm.tul.cz/~libor.kupka/10_-_Pokrocile_techiky.pdf)>. [webová stránka]
- [18] Allen-Bradley. [online]. 2005 [cit. 2011-12-13]. Using the PIDE Instruction. Dostupné z WWW: <[http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/logix-wp008\\_-en-p.pdf](http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/logix-wp008_-en-p.pdf)>. [webová stránka]
- [19] Interworld Electronics & Computer Industries Inc. [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. PCI-1711 Low-Cost Multi-Function Card. Dostupné z WWW: <<http://www.interworldna.com/advan/pci-1711.php>>.

## 9 PŘÍLOHY

### 9.1 Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1 – Blokové schéma měřicího řetězce .....	10
Obr. 1.2 – Možnosti umístění tepelného senzoru [13].....	13
Obr. 1.3 – Tok informací v řídicím systému s PAC .....	15
Obr. 1.4 – Ukázka programování v Ladder Diagram .....	16
Obr. 1.5 – Ukázka programování s Function Block Diagram .....	17
Obr. 1.6 – Spojitý PID regulátor s předřazenou proporcionální složkou .....	19
Obr. 2.1 – Experiment s tepelnou komorou [10] .....	22
Obr. 2.2 – Dynamika systému s tepelnou komorou.....	24
Obr. 2.3 – Systém se zpětnou vazbou .....	26
Obr. 2.4 – Blokové schéma On-Off regulace s relé.....	27
Obr. 2.5 – Hystereze reléového přepínače .....	27
Obr. 2.6 – Proporcionálně-integrační řízení .....	28
Obr. 3.1 – Blokové schéma zapojení řízení pomocí PAC .....	30
Obr. 3.2 – Schéma propojení vstupů a výstupů mezi PAC a tepelnou komorou.....	31
Obr. 3.3 – Realizace řízení pomocí PAC Rockwell Automation .....	32
Obr. 3.4 – Přepočet hodnoty PAC na stupně Celsia .....	36
Obr. 3.5 – Přepočet hodnoty PAC na otáčky za minutu a objemový tok .....	37
Obr. 3.6 – Přepočet požadovaného napětí na hodnotu PAC.....	38
Obr. 4.1 – Blokové schéma řízení pro metodu On-Off .....	43
Obr. 4.2 – Proporcionální regulační smyčka .....	45
Obr. 4.3 – Proporcionální regulace pomocí RSLogix .....	46
Obr. 4.4 – Návrh PI regulátoru a regulovaná soustava.....	48
Obr. 4.5 – Blokové schéma proporcionálně-integrační regulace.....	49
Obr. 4.6 – Regulační smyčka s exportem do Workspace .....	52
Obr. 4.7 – Funkce fminsearch() a její parametry .....	52
Obr. 4.8 – Regulační smyčka s opt. kvadratické plochy reg. odchylky.....	54
Obr. 4.9 – Regulační smyčka s vážením akční veličiny .....	55
Obr. 4.10 – Model s anti-windup a dopravním zpožděním .....	57
Obr. 4.11 – Metoda řízení pomocí PIDE bloku .....	61
Obr. 4.12 – Blokové schéma dynamického odpojení integrační složky.....	63
Obr. 5.1 – Řízení pomocí karty PCI-1711 .....	65
Obr. 5.2 – Schéma komunikace mezi tepelnou komorou a kartou PCI-1711 .....	66
Obr. 5.3 – Dynamické omezení integrační složky.....	67
Obr. 5.4 – Blokové schéma pro metodu vážení žádané veličiny .....	69
Obr. 9.1 – Programovatelný automat Allen-Bradley 1769 L32E.....	79
Obr. 9.2 – Skript hlavní funkce numerické optimalizace parametrů regulátoru.....	84
Obr. 9.3 – Optimalizovaná funkce s parametry regulátoru.....	84
Obr. 9.4 – Schéma pro porovnání reálné a simulované soustavy .....	85
Obr. 9.5 – Schéma pro porovnání reálné a simulované soustavy s anti-windup .....	86



## 9.2 Seznam použitých grafů

Graf 2.1 – Vstupní a výstupní signál pro skokovou odezvu [8] .....	25
Graf 2.2 – Efekt použití regulátoru s anti-windup [8] .....	29
Graf 3.1 – Odezva na skokovou změnu akční veličiny s plastovým krytem.....	34
Graf 3.2 – Odezva na skokovou změnu akční veličiny bez plastového krytu .....	35
Graf 3.3 – Lineární spojnice průběhu teploty s rovnicí regrese.....	36
Graf 3.4 – Graf měřených statických charakteristik systémů.....	39
Graf 3.5 – Statické charakteristiky systémů .....	40
Graf 3.6 – Měření odezvy při skokové změně vstupu .....	41
Graf 3.7 – Dopravní zpoždění na senzoru S1, S2 a S3 .....	42
Graf 4.1 – Průběh řízení metodou On-Off .....	44
Graf 4.2 – Průběh řídicí a výstupní veličiny v čase .....	45
Graf 4.3 – Průběh regulační odchylky v čase .....	46
Graf 4.4 – Průběh proporcionální regulace v čase.....	47
Graf 4.5 – Průběh řídicí a výstupní veličiny v čase .....	48
Graf 4.6 – Průběh proporcionálně-integrační regulace v čase.....	50
Graf 4.7 – Odezva po optimalizaci lineární plochy .....	53
Graf 4.8 – Odezva po optimalizaci kvadratické plochy reg. odchylky.....	54
Graf 4.9 – Odezva po optimalizaci s vážením akční veličiny .....	55
Graf 4.10 – Detail porovnání optimalizací regulačního pochodu.....	56
Graf 4.11 – Optimalizovaný regulační pochod.....	58
Graf 4.12 – Průběh optimalizované integrace v čase.....	59
Graf 4.13 – Odezva na poruchovou veličinu napětí ventilátoru .....	60
Graf 4.14 – Průběh integrační složky a akční veličiny při změně poruchové vel. ....	60
Graf 4.15 – Regulační pochod řízený pomocí PIDE bloku .....	62
Graf 4.16 – Regulační pochod při dynamickém odpojení integrační složky.....	64
Graf 4.17 – Průběh integrační složky a akční veličiny .....	64
Graf 5.1 – Porovnání reálné a simulované soustavy.....	67
Graf 5.2 – Porovnání reálné a simulované soustavy při dynamickém anti-windup .....	68
Graf 5.3 – Regulační pochod pro metodu vážení žádané veličiny .....	69

## 9.3 Seznam použitých tabulek

Tab. 2.1 – Přiřazení popisu a komponenty v tepelné komoře.....	23
Tab. 3.1 – Výsledky měřených hodnot pro rovnici regrese .....	35
Tab. 4.1 – Výsledky optimalizací regulačního pochodu .....	57
Tab. 4.2 – Výsledky optimalizací regulačního pochodu .....	57
Tab. 5.1 – Přiřazení vstupů a výstupů komory, karty PCI a svorkovnice PCLD .....	65
Tab. 9.1 – Parametry tepelné komory a použitých komponent [10].....	80
Tab. 9.2 – Měření statických charakteristik systémů.....	81



## 9.4 Seznam použitých zkratek

Symbol	Jednotka	Popis
A/Č		analog/číslicový převodník
$b_{sp}$		váha žádané veličiny
C		regulátor
CFM		Cubic feet per minute
CVEU, CV		akční veličina
ČSN		Česká soustava norem
D		derivační složka
e, E		regulační odchylka (error)
EPROM		Erasable Programmable Read-Only Memory
FBD		Function Block Diagram
G		přenos soustavy
I		integrační složka
I/O		Input/Output
IEC		International Electrotechnical Commission
IL		Instructions List
IP		Internet Protocol
J		integrál regulační plochy
$k_I$		integrační zesílení
LD		Ladder Diagram
LSB		Least Significant Bit
MAC		Media Access Control
P		proporcionální složka
Pa		Pascal
PAC		Programmable Automation Controller
PC		Personal Computer
PLC		Programmable Logic Controller
RAM		Random access memory
ROM		Read-Only Memory
RPM		Revolutions per minute
$r_0, k_p$		proporcionální zesílení
S,P		system, soustava, tepelná komora
SI		Le Système International d'Unités
ST		Structured Text
u		akční veličina
U		vstupní veličina
w, R, Sprog		řídící (žádaná) veličina
Y		výstupní veličina
y, PV		výstupní (regulovaná) veličina
$\kappa$		váha akčního zásahu (0-1)
p	bar	tlak
$R_0$	$\Omega$	Základné odpor při teplotě 0 °C
t	s	čas
$T_a$	°C	teplota okolí
$T_d$	°C	žádaná hodnota teploty



Symbol	Jednotka	Popis
$T_I$	s	integrační časová konstanta
$T_n$	°C	teplota na senzoru n
$x_n$	mm	vzdálenost od topné spirály
$\alpha$	$K^{-1}$	Teplotní součinitel odporu
$\Delta v$	°C	změna teploty
$\Delta R$	$\Omega$	změna odporu
$\Delta T_h$	°C	šířka hystreze
$\tau$	s	časová konstanta

## 9.5 Obsah přílohy na CD

Zadání diplomové práce  
 Elektronická verze diplomové práce  
 Úloha pro výuku (verze pro studenta)  
 Úloha pro výuku (verze pro vyučujícího)  
 Soubory pro RSLogix 5000  
 Soubory pro Matlab Simulink  
 Datasheety  
 Fotodokumentace

## 9.6 Programovatelný automat Allen-Bradley 1769 L32E

Možnosti komunikace s programovatelným automatem 1769-L32E jsou buď pomocí sériové linky RS-232 nebo pomocí Ethernetu. V druhém případě je nutnost připojit se k BOOT/DHCP. Nejprve je nutné připojit vodič s RJ-45 konektorem. Přiřazení IP adresy lze nastavit pomocí Rockwell BOOTP Utility (k dispozici s RSLinx a RSLogix 5000 software) či RSLinx software. Programovatelný automat Allen-Bradley 1769-L32E je na obrázku 9.1. [3]



Obr. 9.1 – Programovatelný automat Allen-Bradley 1769 L32E





## 9.7 Parametry tepelné komory

Tab. 9.1 – Parametry tepelné komory a použitých komponent [10]

Symbol	Popis	Hodnota	Jednotka
-	Rozměry komory	50×15×10	cm
-	Hmotnost komory	0,5	kg
$V_{b,nom}$	Jmenovité vstupní napětí dmyhadla	4	V
$B$	Průtok vzduchu dmyhadla	32,1	ft <sup>3</sup> /min
$B_{si}$	Průtok vzduchu dmyhadla (v jednotkách SI)	0,91	m <sup>3</sup> /min
$W_s$	Maximální rychlost průtoku vzduchu	142	m/min
$\omega_{b,max}$	Maximální rychlost ventilátoru	2580	RPM
$K_{tach,V2HZ}$	Kalibrované zesílení tachometru (ot/s)	17,73	Hz/V
$K_{tach}$	Kalibrované zesílení tachometru (ot/min)	1064	RPM/V
$P_h$	Maximální výkon ohřívače (při 5 V)	400	W
$K_{temp}$	Kalibrace teplotního čidla	20	°C/V
$t_s$	Doba ustálení teplotního čidla	4	s
$A$	Vnitřní průřez komory (0,08×0,08 m)	0,0064	m <sup>2</sup>
-	Aktuální požadavky na výkon (maximální proud)	5	A
-	Napěťové požadavky	100–240	VAC

## 9.8 Senzorová kalibrace

Tento návod popisuje, jak kalibrovat platinový teplotní snímač micro model S101503 PF12, který se vyznačuje rychlou změnou odporu. Napěťový výstup ze senzoru 0-5 V je analogový signál úměrný teplotě a jeho kalibrovaný přírůstek je 20 °C/V s přesností senzoru nejméně ± 0,1 °C.

Zapněte tepelnou komoru a nechte volně spuštěný výtláčový ventilátor po dobu dvou minut. Zkontrolujte, že teplotní senzory jsou správně připojeny a nedochází k úniku tepelného toku mimo výdechy. Změřte teploměrem okolní teplotu. S použitím voltmetru nebo digitálně přes software změřte hodnotu napětí na konektoru právě kalibrovaného senzoru. Hodnota napětí by měla odpovídat 1 V při okolní teplotě 20 °C. Pokud je pokojová teplota 23 °C, pak by napětí mělo být 1,15 V. V případě, že teploty ze snímačů neodpovídají okolním teplotám, pak nastavte vyrovnávacím potenciometrem OFFSET správnou hodnotu. [10]

## 9.9 Tabulka měření statických charakteristik systémů

**Tab. 9.2 – Měření statických charakteristik systémů**
**měření z 0 V na 5 V na S1**

napětí na spirále [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$u(\infty)$ výstup z PLC do spirály	0	1550	3100	4650	6200	7750	9300	10850	12400	13950	15500
$y(\infty)$ vstup do PLC z S1	1408	1408	1408	1408	2176	2560	3328	3968	4480	4992	5248
teplota_ve_stupnich_S1[°C]	22	22	22	22	34	40	52	62	70	78	82

**měření z 0 V na 5 V na S2**

napětí na spirále [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$u(\infty)$ výstup z PLC do spirály	0	1550	3100	4650	6200	7750	9300	10850	12400	13950	15500
$y(\infty)$ vstup do PLC z S2	1408	1408	1408	1408	1920	2176	2688	3072	3456	3712	4096
teplota_ve_stupnich_S2[°C]	22	22	22	22	30	34	42	48	54	58	64

**měření z 0 V na 5 V na S3**

napětí na spirále [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$u(\infty)$ výstup z PLC do spirály	0	1550	3100	4650	6200	7750	9300	10850	12400	13950	15500
$y(\infty)$ vstup do PLC z S3	1408	1408	1408	1408	1920	2176	2688	3200	3584	3840	4224
teplota_ve_stupnich_S3[°C]	22	22	22	22	30	34	42	50	56	60	66

**Měření statické charakteristiky při napětí 1 V na ventilátoru**
**měření z 0 V na 5 V na S1**

napětí na spirále [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$u(\infty)$ výstup z PLC do spirály	0	1550	3100	4650	6200	7750	9300	10850	12400	13950	15500
$y(\infty)$ vstup do PLC z S1	1536	1536	1536	1664	2304	2944	3712	4224	5248	5632	6144
teplota_ve_stupnich_S1[°C]	24	24	24	26	36	46	58	66	82	88	96

**měření z 0 V na 5 V na S2**

napětí na spirále [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$u(\infty)$ výstup z PLC do spirály	0	1550	3100	4650	6200	7750	9300	10850	12400	13950	15500
$y(\infty)$ vstup do PLC z S2	1536	1536	1536	1664	2048	2432	2944	3456	4224	4608	4992
teplota_ve_stupnich_S2[°C]	24	24	24	26	32	38	46	54	66	72	78

**měření z 0 V na 5 V na S3**

napětí na spirále [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$u(\infty)$ výstup z PLC do spirály	0	1550	3100	4650	6200	7750	9300	10850	12400	13950	15500
$y(\infty)$ vstup do PLC z S3	1536	1536	1536	1664	2048	2432	3072	3584	4096	4480	4864
teplota_ve_stupnich_S3[°C]	24	24	24	26	32	38	48	56	64	70	76



## 9.10 Výpočet přenosu soustavy pro S2 a S3

### Výpočet zesílení pro senzor S2:

$$y_0 = 1,01 \text{ [V]} \quad (9.10.1)$$

$$y_{ss} = 2,51 \text{ [V]} \quad (9.10.2)$$

$$\Delta y = 1,5 \text{ [V]} \quad (9.10.3)$$

$$\Delta u = 4,5 \text{ [V]} \quad (9.10.4)$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{1,5}{4,5} = 0,333 \text{ [-]} \quad (9.10.5)$$

### Výpočet časové konstanty pro senzor S2:

$$y(t_1) = (63\% \Delta y + y_0) = 0,63 \cdot 30,0 + 19,0 = 18,9 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.10.6)$$

$$t_0 = 18 \text{ [s]} \quad (9.10.7)$$

$$t_1 = 47 \text{ [s]} \quad (9.10.8)$$

$$\tau_{s2} = t_1 - t_0 = 29 \text{ [s]} \quad (9.10.9)$$

### Výsledný přenos soustavy pro senzor S2:

$$G_{s2}(s) = \frac{K}{\tau_{s2} \cdot s + 1} \cdot e^{-Ts} = \frac{0,333}{29 \cdot s + 1} \cdot e^{-s} \text{ [-]} \quad (9.10.10)$$

**Výpočet časové konstanty pro senzor S3:**

$$y_0 = 1,01 \text{ [V]} \quad (9.10.11)$$

$$y_{ss} = 2,45 \text{ [V]} \quad (9.10.12)$$

$$\Delta y = 1,44 \text{ [V]} \quad (9.10.13)$$

$$\Delta u = 4,5 \text{ [V]} \quad (9.10.14)$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{1,44}{4,5} = 0,32 \text{ [-]} \quad (9.10.15)$$

**Výpočet časové konstanty pro senzor S3:**

$$y(t_1) = (63\% \Delta y + y_0) = 0,63 \cdot 28,0 + 19,0 = 17,64 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.10.16)$$

$$t_0 = 18 \text{ [s]} \quad (9.10.17)$$

$$t_1 = 47 \text{ [s]} \quad (9.10.18)$$

$$\tau = t_1 - t_0 = 29 \text{ [s]} \quad (9.10.19)$$

**Výsledný přenos soustavy pro senzor S3:**

$$G_{S3}(s) = \frac{K}{\tau_{S3} \cdot s + 1} \cdot e^{-Ts} = \frac{0,32}{29 \cdot s + 1} \cdot e^{-s} \text{ [-]} \quad (9.10.20)$$



## 9.11 Skripty pro numerickou optimalizaci parametrů regulátoru

```

1 - clear all; close all; clc; echo off;
2
3 - global r0 Ti Tmax;
4
5 - r0_p = 25; %pocatecni proporcionalni zesileni
6 - Ti_p = 10; %pocatecniintegracni casova konstanta
7 - r0 = 25 ;%optimalizovane proporcionalni zesileni
8 - Ti = 10 ;%optimalizovana integracni casova konstanta
9 - x0 = [r0 Ti]; %vstup pred optimalizaci
10 - Tmax = 100; %doba ustaleni
11 - dt = 1; %vzorkovani
12 - kappa = 0.01;%vaha akcniho zasahu, rozsah 0-1,
13 -           %male pro rychle reg. pochody
14 - sim('obvod1');%propojeni s modelem
15 - figure;
16 - plot(t,y(:,2));
17 - grid on;
18 - hold on;
19
20 - options=optimset('MaxIter',7,'Display','iter');%nastaveni parametru
21 - %pro optimalizaci
22 - %max. povoleny pocet kroku iterace a vypis pri kazde iteraci
23 - x=fminsearch('fce',x0,options); % optimalizace simplexovou metodou
24
25 - %optimalizované konstanty:
26 - r0 = x(1);
27 - Ti = x(2);
28 - sim('obvod1')
29 - plot(t,y(:,3),'red');
30 - plot(t,y(:,4),'black');

```

Obr. 9.2 – Skript hlavní funkce numerické optimalizace parametrů regulátoru

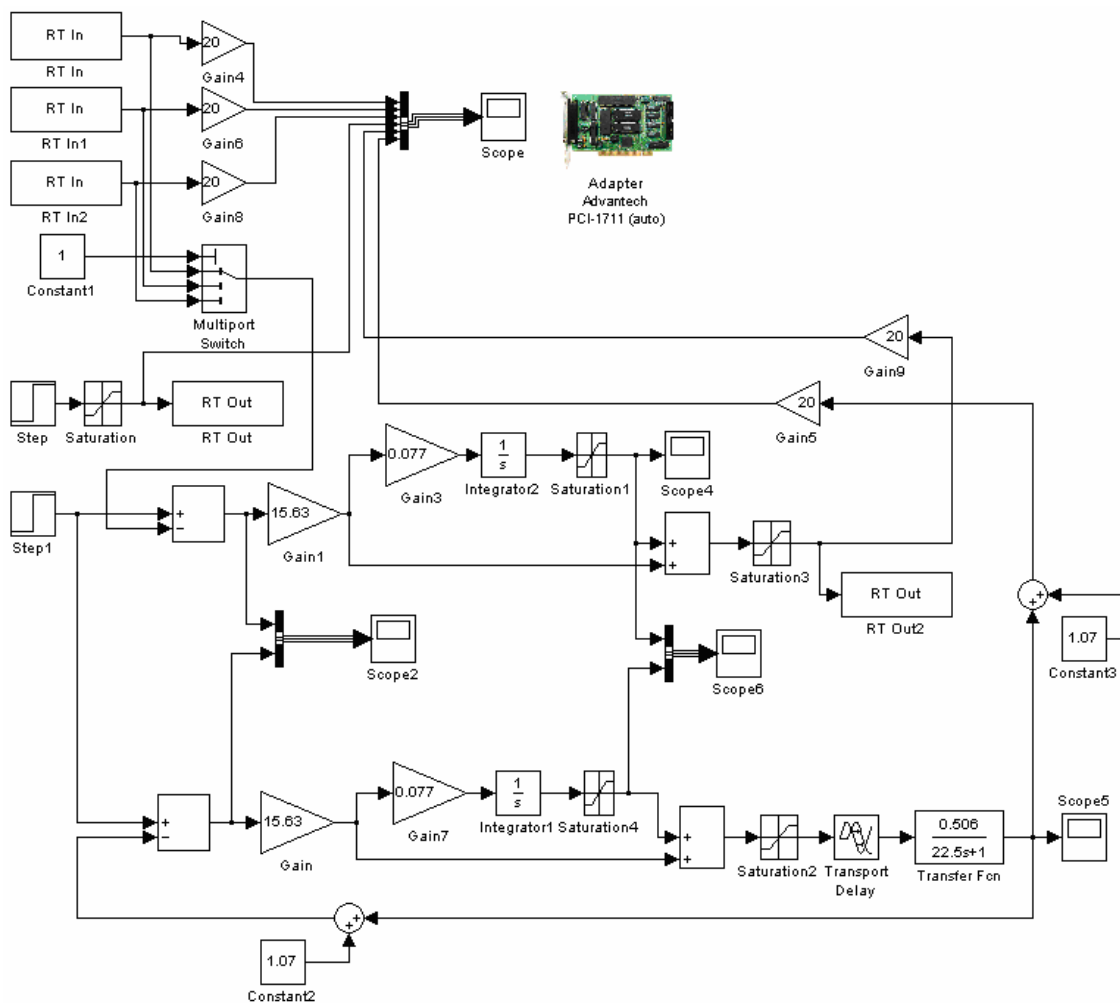
```

1 - function f = fce(x)
2
3 - global Tmax r0 Ti;
4 - r0 = x(1);
5 - Ti = x(2);
6 - sim('obvod1',Tmax);
7 - f=J;

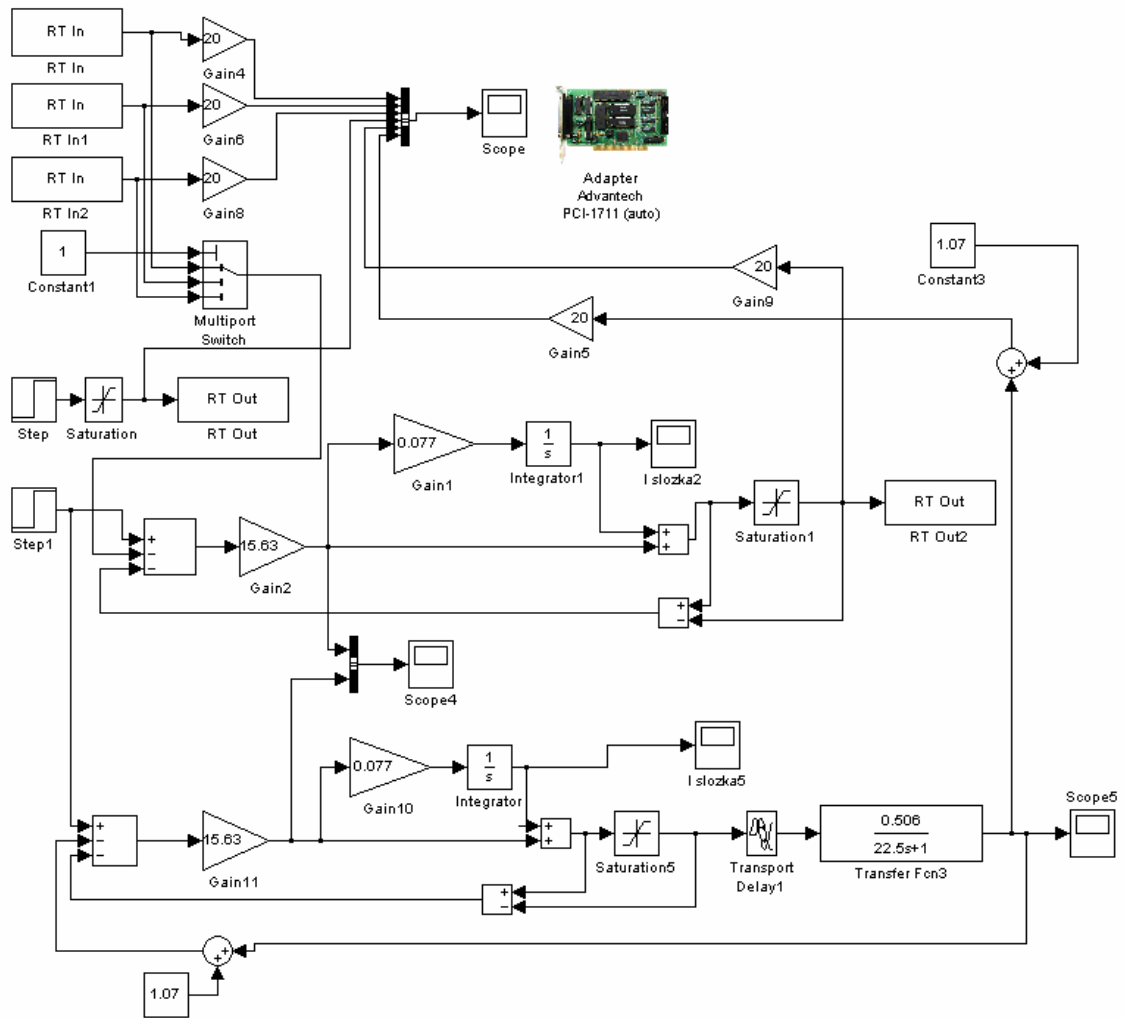
```

Obr. 9.3 – Optimalizovaná funkce s parametry regulátoru

### 9.12 Schéma pro porovnání reálné a simulované soustavy



Obr. 9.4 – Schéma pro porovnání reálné a simulované soustavy



Obr. 9.5 – Schéma pro porovnání reálné a simulované soustavy s anti-windup



## 9.13 Použité řídicí a měřicí prostředky

### **Tepelná komora Quanser**

Výrobce: Innovate Educata

Parametry: příloha 9.7

### **Programovatelný automat Allen-Bradley Compact logix 1769-ECR**

Výrobce: Rockwell Automation

Napájecí modul: 1769-PB2 (+24 V dc)

Řídicí procesor: Compact logix 1769-L32E

Analogový vstupně/výstupní modul: 1769-IF4X0F2

### **Regulovatelný zdroj R124R50E**

Výrobce: DIAMETRAL

Typ: S124R50E V.Č 0/55

Příkon: 50 W

Výstup: 1×24 V/2 A

### **Měřicí ústředna AGILENT**

Typ: 34970A

Vstupní karta: AGILENT 34901A

### **PCI-karta [19]**

Výrobce: Advantech

Typ: 1711

Parametry: 12-bit, 16-ch. S.E.

### **Svorkovnice pro PCI kartu**

Výrobce: Advantech

Typ: PCLD-8710

### **Digital multimeter RE3900**