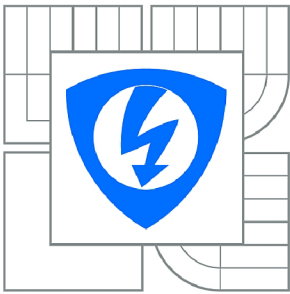




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# MODEL TEPELNÉHO TECHNOLOGICKÉHO PROCESU

HEAT TECHNOLOGICAL PROCESS MODEL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JAN KRÁSENSKÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. PETR MALOUNEK**

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Jan Krásenský

**ID:** 106558

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Model tepelného technologického procesu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a prakticky realizujte model tepelného technologického procesu. Model by měl představovat tepelný tunel se třemi topnými tělesy, umístěnými vedle sebe, každé v jedné komoře. Vytvořte model a řízení tohoto tunelu v programu Matlab/Simulink. Seznamte se s možnostmi měřicích karet X20AT2222 a X20AT2402 od firmy B&R. Snažte se tyto karty v modelu využít pro měření teploty v tunelu. Navrhněte řízení a vizualizaci tunelu na PowerPanelech fy. B&R.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

B&R [www.br-automation.com](http://www.br-automation.com)

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 31.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Malounek

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

### **Abstrakt**

Práce popisuje možnosti měřicích karet X20AT2222 a X20AT2402. Je popsán návrh fyzického modelu tepelného tunelu se třemi sekcemi a vlastními topnými tělesy. Detailně je rozebráno technické řešení i struktura modelu a následně navrhnuo vhodné řízení a vizualizace procesu prostřednictvím PLC. Na základě identifikovaného systému a struktury modelu je vytvořena simulace v programu Matlab Simulink.

### **Abstract**

This work presents possibilities of X20AT2222 and X20AT2402 measuring cards. It describes design of physical heat tunnel with three sections, where each one has own heating elements. In detail is described technical solution and structure of model. Subsequently is designed controller and process visualization for PLC. Based on identified system and model structure is created system simulation in Matlab Simulink.

### **Klíčová slova**

teplota, regulace, model, X20AT2222, X20AT2402, simulace, Simulink, pt100, termočlánek

### **Keywords**

temperature, control , model, X20AT2222, X20AT2402, simulation, Simulink, pt100, thermocouple

### **Bibliografická citace**

KRÁSENSKÝ, J. *Model tepelného technologického procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 53 s.  
Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Malounek.

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Model tepelného technologického procesu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **26. května 2010**

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Malounkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **26. května 2010**

.....  
podpis autora

## OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2. TEPLOTA .....</b>	<b>9</b>
2.1 Měření teploty .....	9
2.1.1 Senzory pro měřicí karty X20AT2222 a X20AT2402 .....	9
<b>3. NÁVRH MODELU TEPELNÉHO PROCESU .....</b>	<b>14</b>
3.1 Uspořádání a základní popis modelu .....	14
3.2 Technické prostředky fyzického modelu .....	16
3.2.1 Měřicí karty .....	16
3.2.2 Měřicí karta X20AT2222 .....	16
3.2.3 Měřicí karta X20AT2402 .....	17
3.2.4 Digitální výstupní karta X20DO9322.....	17
3.2.5 Elektrické zapojení modelu .....	18
3.2.6 Senzory teploty .....	19
3.2.7 Akční členy a jejich napájení.....	20
3.2.8 Ventilátory .....	20
3.2.9 Rozhraní pro připojení k PLC.....	21
3.3 Řízení a vizualizace.....	22
3.3.1 Řízení modelu.....	22
3.3.2 Vizualizace procesu .....	23
<b>4. IDENTIFIKACE A APROXIMACE SOUSTAVY.....</b>	<b>25</b>
4.1 Analytický popis soustavy .....	25
4.2 Identifikace na základě přechodové charakteristiky .....	28
<b>5. REGULACE TEPLoty V MODELU .....</b>	<b>31</b>
5.1 Návrh regulátoru .....	31
5.2 Schopnosti a omezení regulace.....	34
<b>6. SOFTWAREOVÁ SIMULACE SOUSTAVY.....</b>	<b>37</b>
6.1 Popis problému .....	37
6.2 Popis simulačního modelu .....	37
6.3 Nastavení modelu.....	40

6.4 Porovnání simulovaných a skutečných dat .....	40
6.5 Zhodnocení výsledků simulace .....	43
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>47</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>48</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Teplotní závislost odporu čidla Pt100 .....	10
Obr. 2.2: Uspořádání vývodů měřicích odporů [3] .....	11
Obr. 2.3: Vznik termoelektrického napětí [3] .....	12
Obr. 2.4: Měřicí řetězec termoelektrického článku [3] .....	12
Obr. 3.1: Struktura fyzického modelu .....	14
Obr. 3.2: Fyzický model tepelného tunelu .....	15
Obr. 3.3: Pohled dovnitř sekce modelu .....	16
Obr. 3.4: Vnitřní struktura jednoho kanálu ULN2802A [7] .....	18
Obr. 3.5: Elektrické zapojení tepelného tunelu .....	19
Obr. 3.6: Číslování pinů .....	21
Obr. 3.7: Visualizace procesu - hlavní okno .....	24
Obr. 3.8: Visualizace procesu – časové průběhy teplot .....	24
Obr. 4.1: Simulace průběhu teploty v sekci .....	26
Obr. 4.2: Simulace jedné sekce v prostředí MATLAB simulink .....	28
Obr. 4.3: Jednotkový skok teploty v uzavřené sekci .....	30
Obr. 5.1: Odezvy systému na jednotkový skok při použití PID a PSD regulátoru ....	32
Obr. 5.2: Změna žádané teploty uvnitř uzavřené sekce .....	33
Obr. 5.3: Stavový model PSD regulátoru s omezením akčního zásahu a sumační složky .....	34
Obr. 5.4: Regulační děj v reálném modelu č.1 .....	35
Obr. 5.5: Regulační děj v reálném modelu č.2 .....	36
Obr. 6.1: Schéma simulačního modelu v prostředí Matlab Simulink .....	39
Obr. 6.2: Skoková změna žádané teploty v sekci A (simulace) .....	41
Obr. 6.3: Skoková změna žádané teploty v sekci A (reálná data) .....	41
Obr. 6.4: Skoková změna žádané hodnoty v sekci B (simulace) .....	42
Obr. 6.5: Skoková změna žádané hodnoty v sekci B (simulace) .....	42

## 1. ÚVOD

Řízení tepelných procesů je jedna z nejtypičtějších úloh v automatizaci. Ať již jde o obyčejné dvoustavové řízení, spojitě řízení vytápěcích systémů, anebo ovládání složitých tepelných procesů. U speciálních pecí se často lze setkat s velice přísnými podmínkami na průběh teploty. Může to být například podmínka průběhu žádané veličiny bez překmitu, nulová ustálená odchylka nebo minimální teplotní drift. Ve struktuře těchto většinou robustních systémů musíme počítat s velkým množstvím tepelných kapacit s dlouhými časovými konstantami. Množství lidí se základní znalosti teorie řízení a regulace, kteří si prošli jen minimální nebo žádnou praktickou zkušeností, si z počátku nedokáže všechna omezení a zrádnosti praktických systémů uvědomit. Často mají zkušenosti s řízením pouze softwarově simulovaných soustav bez nelinearit, bez omezení akčních zásahů, bez dopravních zpoždění apod.. Řízení reálného systému jim pak nezřídka ukazuje další horizont a naznačuje, že je před nimi ještě složitá cesta.

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření modelu tepelného technologického procesu a jeho softwarová simulace. Tedy modelu reálného systému, na kterém si lze ověřit teoretické poznatky o řízení tepelných soustav. Řízením tohoto modelu by mělo být možné udělat si dobrou představu o způsobech a omezeních regulace tepelného procesu a ověřit si možnosti a způsob sběru dat pomocí analogové měřicí karty X20AT2222, využití pro sledování tohoto systému. Výsledkem práce je tedy fyzický model tepelného tunelu a zároveň model tohoto procesu navržený v prostředí MATLAB Simulink. To umožňuje dobré srovnání ilustrující, co všechno lze očekávat od softwarové simulace a jak moc se lze v praxi opírat o teoretické poznatky v případě návrhu reálného systému.



## 2. TEPLOTA

Přestože je pojem teplota v našem světě pro každého zcela běžný a srozumitelný, přesná a všeobecně platná definice teploty prakticky neexistuje. Jedna z definic popisuje teplotu jako stavovou veličinu určující stav termodynamické rovnováhy. To odpovídá stavu, kdy u těles v izolované soustavě nedochází k žádným makroskopickým změnám ani změnám fyzických vlastností obou těles. Kvůli potřebě zjišťování rovnosti teplot dvou těles a zjišťování teplotních rozdílů bylo nutné zavést číselnou stupnici teploty. Stupnice je určena nultým (základním) bodem a velikostí jednoho stupně. Fyzikové používají termodynamickou stupnici, která je značena v jednotkách zvaných kelvin. Nultým bodem této stupnice je tzv. absolutní nula, což je nejnižší fyzikálně definovatelná teplota. U nás, stejně tak jako ve většině zemí světa se pro všeobecné i technické měření používá stupnice Celsiova, která je odvozena od Kelvinovy termodynamické stupnice, posunutím o teplotu +273,15 K. Její jednotkou je stupeň Celsia (°C) a 0 °C odpovídá trojnému bodu vody. [1, 2]

### 2.1 MĚŘENÍ TEPLOTY

#### 2.1.1 Senzory pro měřicí karty X20AT2222 a X20AT2402

##### 2.1.1.1 Odporové platinové snímače teploty

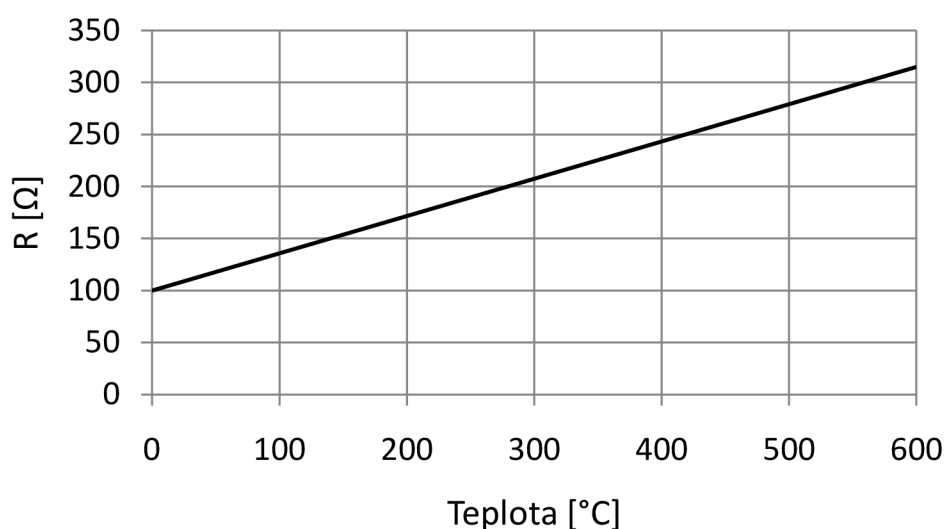
Kovové odporové senzory teploty využívají principu teplotní závislosti elektrického odporu kovu. Pro malý rozsah teplot 0°C až 100°C lze obecně pro tyto senzory s určitou nejistotou použít vztah

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.1)$$

kde  $R_0$  je odpor čidla při teplotě 0°C. Koefficient  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu, který je materiálovou konstantou. Dalším důležitým parametrem je poměr odporů čidla při teplotách 0 a 100 °C. Popisuje ho vztah

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (2.2)$$

Nejrozšířenějším typem materiálu pro výrobu odporových kovových senzorů teploty je platina. Mimo platinových snímačů se vyrábějí ještě snímače niklové a měděné. Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Poměr elektrického odporu platiny u provozních snímačů (Pt100) je předepsán normou IEC-751 na hodnotu  $W_{100}=1,385$ . Teplotní závislost platinového snímače je na Obr. 2.1. [3]



**Obr. 2.1: Teplotní závislost odporu čidla Pt100**

Průmyslové (provozní) platinové odpory se dělí do dvou tolerančních tříd. Třída A je stanovena pro rozsah teploty od  $-200\text{ °C}$  do  $650\text{ °C}$ , třída B od  $-200\text{ °C}$  do  $850\text{ °C}$ . Pro měření vyšších teplot se vyrábějí ještě vysokoteplotní platinové snímače až do teploty  $1100\text{ °C}$ . Teplotní závislost měřicího odporu v rozsahu  $0\text{ °C}$  až  $850\text{ °C}$  je dána vztahem

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (2.3)$$

kde

$$R_0=100\Omega$$

$$A=3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$B=-5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

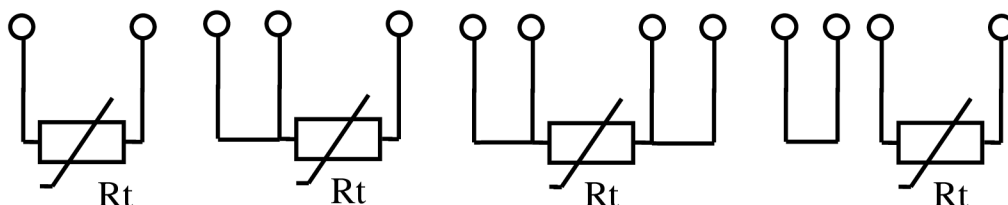
Hlavními požadavky na měřicí obvod pro platinový senzor teploty jsou minimální časová konstanta a co nejmenší vliv měřicího proudu a odporu vedení. Důležitá je i linearizace závislosti odporu snímače na teplotě.

Základní konstrukční část odporového snímače, je podle ČSN 25 8005 označována jako měřicí odpor a je vyráběna třemi druhy technologií – drátkovou, tenkovrstvou a tlustovrstvou.

Drátkový měřicí odpor je tvořen stočeným platinovým drátkem uloženým ve válcových kapilárách keramických tělísek, popř. může být bifilárně navinut na keramickém či skleněném tělísku a zataven do skla.

Měřicí odpory vyrobené tenkovrstvou technologií jsou vytvářeny technikou napařování a iontovým leptáním na podložce z korundové keramiky. Jmenovitý odpor je u těchto čidel nastavován pomocí nízkovýkonového laseru.

Vývody jsou vytvořeny ze speciálních Pt slitin, Ag nebo Cu. Podle obr. 2.2 se dělí na dvouvodičové, třívodičové, čtyřvodičové a s pomocnou smyčkou. [3]



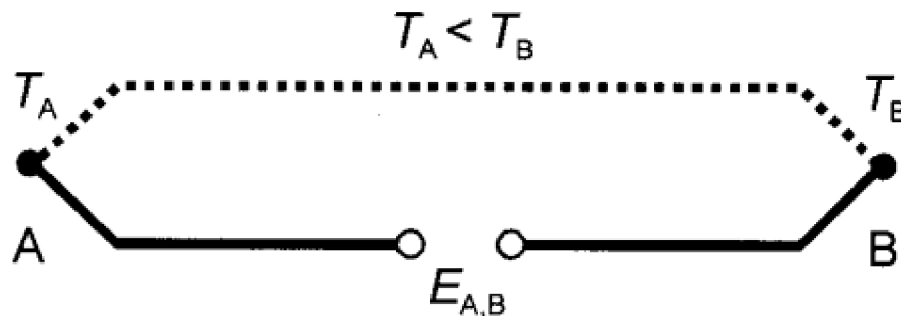
**Obr. 2.2: Uspořádání vývodů měřicích odporů [3]**

### 2.1.1.2 Termoelektrické články

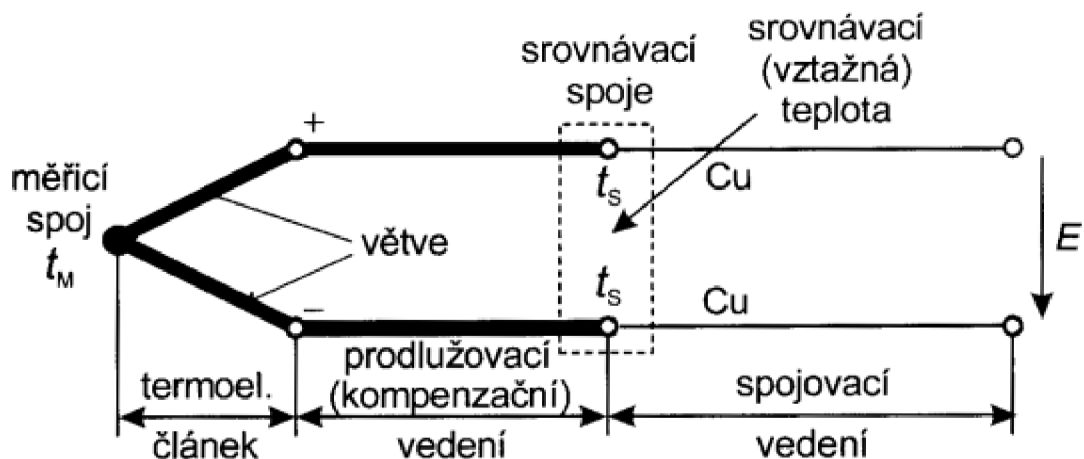
Princip termoelektrických článků je založen na Seebeckově jevu, při kterém dochází k převodu tepelné energie na elektrickou. Během tohoto jevu dochází k difundování částic z teplejší části nosiče do chladnější. To je způsobeno tím, že v teplejší části mají nositelé náboje větší energii. Tak vzniká na jedné straně převaha záporných, popř. kladných nábojů. Rozdíl potenciálů na obou koncích se označuje jako termoelektrické napětí.

Termoelektrický článek je realizován dvěma vodiči z navzájem různých materiálů. V případě, že dva spoje mají rozdílnou teplotu, protéká jím elektrický

proud. Rozpojením obvodu podle Obr. 2.3 se na vzniklých svorkách objeví termoelektrické napětí.



Obr. 2.3: Vznik termoelektrického napětí [3]



Obr. 2.4: Měřicí řetězec termoelektrického článku [3]

Měřicí řetězec termoelektrického článku je na Obr. 2.4. Pokud by teplota srovnávacích spojů neměla vztažnou teplotu, kterou určuje norma, docházelo by k systematické odchylce měření. V praxi se kolísání srovnávacích teplot vylučuje umístěním srovnávacích spojů do termostatu, použitím kompenzačního zapojení nebo číslicovou korekcí. U číslicových měřících systému se obvykle využívá izotermická svorkovnice. Teplota svorkovnice je měřena polovodičovým nebo odporovým senzorem teploty a při každém kroku měření se korekce na odchylku srovnávací a vztažné teploty vyhodnotí číslicově pomocí implementovaných vztahů.

Terminál teplotní kompenzace je integrován i v popisované analogové měřicí kartě X20AT2402 (viz. 3.2.3).

Hodnota termoelektrického napětí se pohybuje v řádech jednotek popř. desítek mV, a tak se nevyhneme nutnosti potlačovat rušivé vlivy, tedy elektrické, magnetické a elektromagnetické pole, popř. vliv parazitních kapacit a proudových smyček. Magnetické pole lze potlačit zkroucením vodičů, elektrostatické a elektromagnetické pole můžeme vhodným způsobem odstínit.

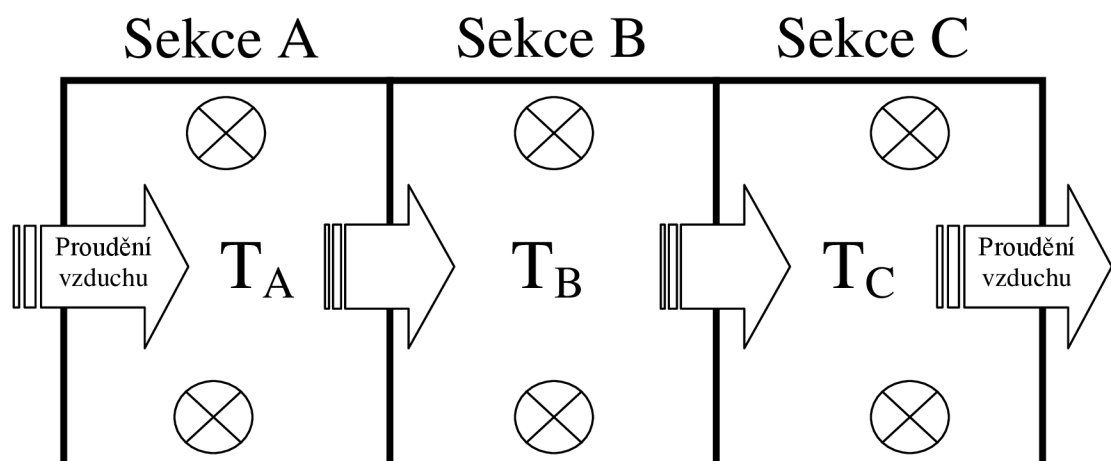
Jednotlivé páry termoelektrických materiálů jsou ve světě normalizovány a byly vybrány tak, aby dobře splňovaly kritéria potřebná pro měřicí účely. Zajišťují například přijatelnou nelinearitu, vhodnou závislost termoelektrického napětí na teplotě, odolnost proti korozi apod.. Tyto páry se dle doporučení IEC řadí do skupin označovaných velkými písmeny. Měřicí karta AT2402, která byla k dispozici pro účely této práce je navržena pro senzory typu J, K, N a S. [3]

### 3. NÁVRH MODELU TEPELNÉHO PROCESU

#### 3.1 USPOŘÁDÁNÍ A ZÁKLADNÍ POPIS MODELU

Strukturu fyzického modelu tepelného tunelu reprezentuje Obr. 3.1. Výsledná fyzická podoba je na Obr. 3.2 a Obr. 3.3. Tepelný tunel je představován třemi sekcemi, jejichž vzájemné tepelné ovlivňování určuje především průtok vzduchu, proudící z okolního prostředí postupně skrz všechny sekce. Velikost průtoku vzduchu (a nepřímo tedy tepelné ovlivňování sekcí) lze regulovat hodnotou programové proměnné v řídicím PLC.

Pro stavbu kostry modelu byla vybrána stavebnice Merkur, která se díky variabilitě, množství konstrukčních prvků a především bytelnosti velice osvědčila. Pro vytvoření stěn tepelně izolovaného prostředí se pochopitelně kovové ani plastové, navíc děrované části nehodí. Všechny stěny jsou tedy zejména kvůli dobrým tepelně-izolačním vlastnostem, vytvořeny z tepelně odolného molitanu o šířce 10 mm. Rozměry jedné sekce jsou 70x70x80 mm. Otvory pro proudění vzduchu mezi A - B a B - C jsou kruhové s průměrem 30 mm. S okolním prostředím jsou spojeny sekce A a C ventilátorem o průměru 50 mm. Pohled dovnitř sekce C fyzického modelu umožňuje Obr. 3.3.



Obr. 3.1: Struktura fyzického modelu

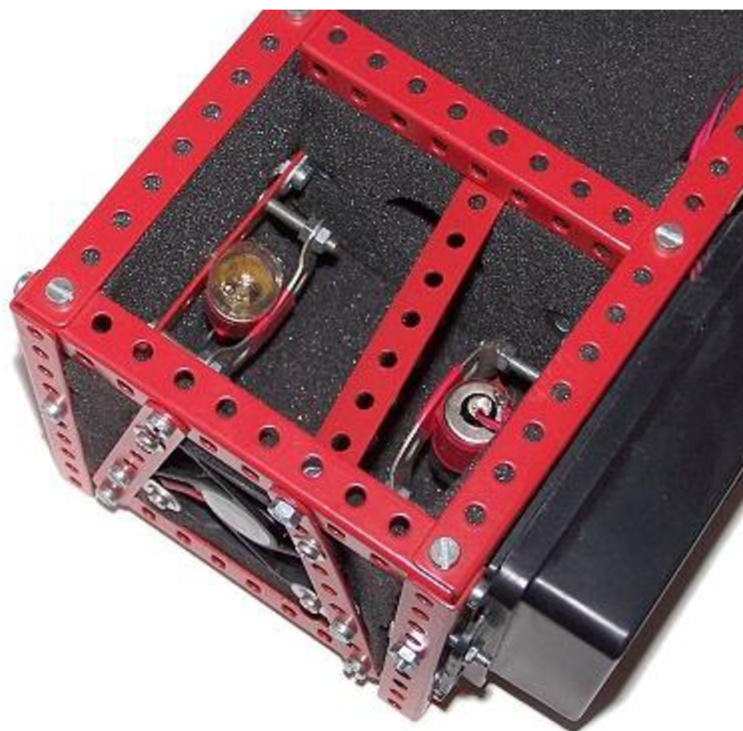
Uvnitř konstrukční krabičky připevněné na boku je vestavěn elektrický obvod, tvořící rozhraní modelu pro připojení ke vstupním a výstupním kartám řídicího PLC.

Každá sekce procesu má vlastní prostředky pro nezávislé snímání i řízení teploty. Měření teploty je realizováno platinovým odporovým snímačem teploty Pt100 připojenému k řídicímu PLC, prostřednictvím měřicí karty X20AT2222. Akční členy jako zdroje tepla, představují dvě paralelně zapojené žárovky v každé sekci, s dílčím výkonem 10W. Proudění vzduchu skrz sekce zajišťují dva 12V ventilátory, řízené pulsně-šířkovou modulací stejně jako akční členy. Vzhledem k tomu, že napájecí napětí zdroje v laboratoři E541 je 24V, je napětí pro ventilátory upraveno stabilizátorem. Podrobný popis elektronického řešení a schéma zapojení je v kapitole 3.2.5.

Celý model je řízen prostřednictvím PLC firmy B&R. Pro sledování teplot a řízení celého procesu byla navržena vizualizace s ovládáním prostřednictvím Power Panelu.



**Obr. 3.2: Fyzický model tepelného tunelu**



**Obr. 3.3: Pohled dovnitř sekce modelu**

## **3.2 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY FYZICKÉHO MODELU**

### **3.2.1 Měřicí karty**

Pro měření teploty byly pro tuto práci k dispozici 2 typy měřicích karet firmy B&R. Protože byl pro snímání teploty vybrán platinový odporový snímač Pt100, byla použita první z následujících dvou.

### **3.2.2 Měřicí karta X20AT2222**

X20AT2222 je měřicí karta se vstupy pro připojení kovových odporových platinových senzorů Pt100 nebo Pt1000. Vzhledem k tomu, že má pouze dva vstupy a teplota modelu se měří ve třech sekcích, jsou v aplikaci využívány karty dvě. Sensory lze připojit buď 2 nebo 3 vodičově. Typ senzoru, stejně jako způsob připojení, je nutné specifikovat v hardwarové konfiguraci AS. Na vstupu karty je umístěn 16-ti bitový převodník, rozlišení kanálu je 0,1 K. Jeden nejnižší bit tedy



odpovídá hodnotě 0,1 °C. Výstupem je přímo údaj o teplotě typu Integer popř. Unsigned Integer. Pro zjištění teploty stačí tedy výstupní údaj vynásobit hodnotou 0,1. Samotné senzory lze použít pro měření teplot od -200 do 850 °C, provozní teplota modulu je 0 - 50 °C.

X20AT2222 vyhodnocuje teplotu měřením elektrického odporu senzoru s konstantním měřicím proudem 250  $\mu$ A. Pokud je použito delší vedení k senzoru, projeví se zde zpravidla aditivní chyba, kterou je třeba od změřené hodnoty odečíst. Na horní části karty jsou 4 stavové diody, pomocí nichž dokáže obsluha rychle rozpoznat, zda karta pracuje správně nebo zda došlo k chybě a popř. jaké. [4]

### 3.2.3 Měřicí karta X20AT2402

AT2420 je měřicí karta pro termoelektrické články typu J, K, N a S, s integrovaným terminálem teplotní kompenzace. Stejně jako AT2222 lze k jedné kartě připojit maximálně 2 teplotní senzory. Vstup karty je opatřen 16-ti bitovým AD převodníkem s rozlišením 0,1 K na jeden kanál. Výstupní hodnoty jsou typu Unsigned Integer. Přesnosti pro jednotlivé typy termočlánků J, K, N, S jsou  $\pm 0,1\%$ ,  $\pm 0,11\%$ ,  $\pm 0,11\%$ ,  $\pm 0,17\%$ . Pracovní teplota modulu je 0-50 °C. [5]

### 3.2.4 Digitální výstupní karta X20DO9322

Digitální výstupní karta X20DO9322 je osazena celkem 12-ti digitálními výstupy. Připojení je realizováno jednovodičově a každý výstup je možné zatížit proudem až do velikosti 0,5 A - celkový výstupní proud karty je tedy až 6A. Hodnota výstupu ve stavu log 1 odpovídá napájecímu napětí 24V. Úroveň logické 0 odpovídá napětí 0V. Maximální doba pro změnu logického stavu je 300  $\mu$ s.

V případě této práce je digitální výstupní karta použita pro řízení výkonu akčních členů. V první fázi návrhu se v modelu počítalo se spojitým řízením výkonu. Místo digitální výstupní karty by tedy bylo nutné použít kartu analogovou a signál vhodně zesilovat, nebo ho pomocí mikrokontroléru modulovat do diskrétní formy a vhodně budit. Protože ale prostředí AS již obsahuje implementovanou knihovnu s funkcí pro modulaci hodnoty programové proměnné do diskrétního signálu (pulsně

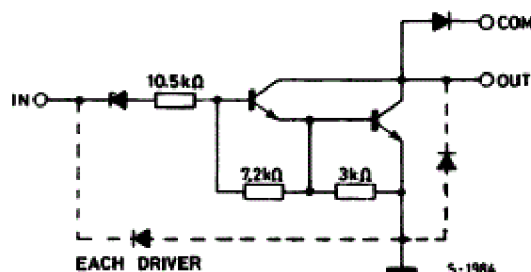
šířkové modulace), stačí využít digitální výstupy. Podrobněji je knihovna popsána v kapitole 3.3.1. [6]

### 3.2.5 Elektrické zapojení modelu

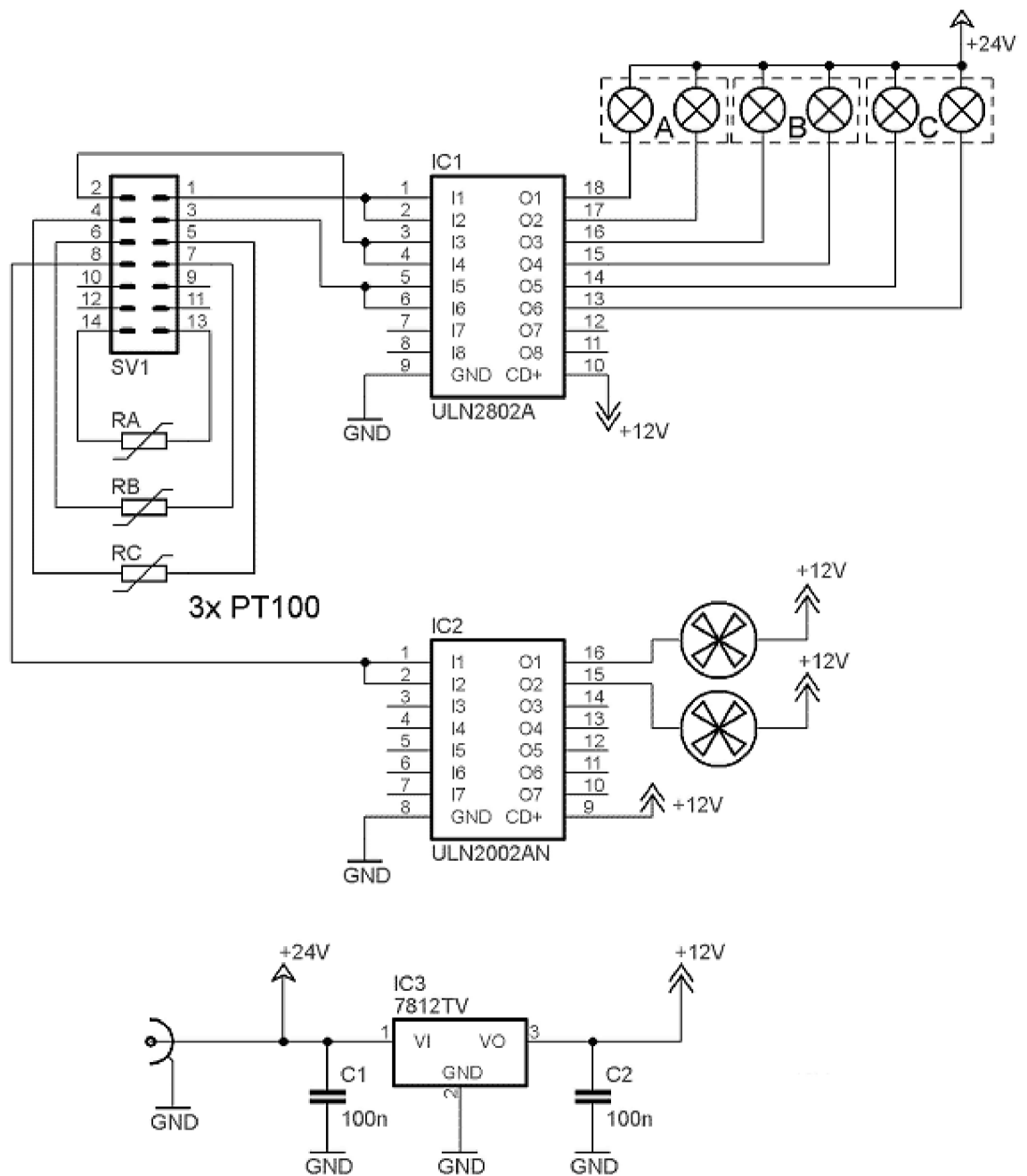
Obr. 3.5 představuje schéma elektronického zapojení tepelného tunelu. Pro připojení k PLC je na modelu vyveden konektor, ve schématu označený jako SV1. Podrobný popis rozhraní je v kapitole 3.2.9. Proměnné rezistory  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  představují teplotní senzory PT100.

V obvodu jsou použity dva integrované obvody ULN2802A a ULN2002A pro výkonové buzení ventilátorů a žárovek. ULN2802A se skládá z celkem osmi spínacích obvodů s Darlingtonovými tranzistory s otevřeným kolektorem. Vnitřní struktura jednoho kanálu je na Obr. 3.4. Jeho vstupy lze vzájemně propojovat a sčítat tak maximální výstupní proud na kanál 0,5 A. Podle použitého zapojení je tedy maximální výstupní proud pro jednu sekci 1A. Vnitřní struktura kanálů ULN2002A, je identická jako u ULN2802A. Liší se pouze počtem kanálů, kterých je v tomto případě 7 místo 8. Využity jsou pouze dva. [7]

Integrovaný stabilizátor L7812CV slouží pro úpravu napájecího napětí 24V na 12V pro ventilátory. Podrobný popis dalších obvodových prvků je popsán v následujících kapitolách.



Obr. 3.4: Vnitřní struktura jednoho kanálu ULN2802A [7]



Obr. 3.5: Elektrické zapojení tepelného tunelu

### 3.2.6 Senzory teploty

S ohledem na potřebný rozsah teplot a podmínky měření teploty v popisované aplikaci, nemá ani jeden z dvou typů senzorů teploty pro popsání měřicí karty, tedy

platinový odporový snímač a termočlánek, výraznější výhody. Nakonec byl vybrán platinový snímač Pt100 hlavně kvůli jeho nízké ceně. Charakter měření teploty v případě tepelného tunelu nevyžaduje nijak zvýšené požadavky na přesnost měření, takže jsou senzory připojeny 2 vodičově. Podrobně je princip měření teploty pomocí platinového snímače teploty popsán v 2.1.1.1.

### 3.2.7 Akční členy a jejich napájení

Při výběru akčního členu bylo bráno v potaz několik variant zdroje tepla. Odporové topné těleso s výkonem a rozměry vhodnými pro použití v modelu na trhu patrně neexistuje. Podobně by se dal k danému principu využít i výkonový rezistor, jehož nevýhodou je ale poměrně velká časová konstanta. Jako dobré řešení se hned z několika důvodů jeví použití žárovky. Zvlášť autožárovek na trhu existuje celkem rozsáhlé spektrum s variantami výkonů vhodnými pro použití v modelu. Díky tomu, že produkují světlo, si lze už pouhým okem udělat představu o jejich aktuálním výkonu. Oproti většině rezistorů mají navíc podstatně kratší přechodový děj. Vybrána byla varianta s napájecím napětím 24V (pro nákladní automobily) a jmenovitým výkonem 10W. Každá sekce je tedy ve výsledku ohřívána prostřednictvím dvojice paralelně zapojených žárovek a je řízena jedním z výstupů digitální karty X20DO9322.

Řízení aktuálního výkonu je realizováno digitální výstupní kartou na principu pulsně-šířkové modulace. Aktuální výkon tak určuje střída dvoustavového signálu s periodou 10 ms. Perioda byla zvolena co možná nejnižší s ohledem na možnosti PLC a na to, aby žárovky při nižších výkonech neblikaly.

Příkon jedné sekce je celkem 20W, proto je mezi žárovky a výstupní kartu připojen výkonový budič ULN2802A. Ten zamezí přetížení karty a zároveň slouží jako ochrana proti přepětí způsobené indukční zátěží.

### 3.2.8 Ventilátory

Aby vzduch proudil jen jedním směrem a aby bylo možné objem proudění plynule regulovat, je model osazen dvojicí plastových ventilátorů s typovým

označením KD1205PFS2. Dle [8] je průtok vzduchu modelem při maximálním výkonu 11 CFM, což odpovídá hodnotě 18,6 m<sup>3</sup>/hod. .

Stejně jako žárovky, jsou ventilátory připojeny k digitálním výstupům karty X20DO9322. Výkon je řízen pulsně-šířkovou modulací a díky tomu se ventilátory začnou plně otáčet o 360 stupňů zhruba již při 35% maximální vstupní hodnoty. Při spojitém napájení se ventilátor začíná otáčet zhruba při 6V, což odpovídá 50% maximální vstupní hodnoty. Celkový maximální výkon obou ventilátorů je podle výrobce 2,4W. V tomto případě by tedy nebylo nezbytně nutné výstup z digitální výstupní karty výkonově budit. Přesto je ale z důvodu ochrany digitální karty (ventilátor je indukční zátěž) vstup pro řízení ventilátorů stejně jako akční členy, posílen budícím obvodem ULN2002A. [8]

### 3.2.9 Rozhraní pro připojení k PLC

Model vyžaduje ke své činnosti zdroj stejnosměrného napětí 24V. Maximální příkon je zhruba 70W. Napájení je možné připojit prostřednictvím konektoru HEBG21 pro napájecí vidlici o průměru 2,1 mm. Připojení k PLC je realizováno 14-tilovým kabelem a konektorem MLW14. Význam jednotlivých pinů číslovaných dle Obr. 3.6 je uveden v Tab. 3.1 . Neuvedené piny nejsou využity.

Číslo pinu	Význam pinu
1	Akční člen sekce A
2	Akční člen sekce B
3	Akční člen sekce C
4	Senzor sekce A -výstup 1
5	Senzor sekce A -výstup 2
6	Senzor sekce B -výstup 1
7	Senzor sekce B -výstup 2
8	Ventilátory
13	Senzor sekce C -výstup 1
14	Senzor sekce C -výstup 2



**Obr. 3.6: Číslován pinů**

**Tab. 3.1: Význam pinů na konektoru**

### 3.3 ŘÍZENÍ A VIZUALIZACE

#### 3.3.1 Řízení modelu

K řízení fyzického modelu a vizualizaci procesu byl použit Power Panel 400 od firmy B&R, osazený procesorem Geode LX800 s taktovací frekvencí 500 MHz. Řízení procesu obstarávají 3 cyklicky vykonávané programy (*Zakladni*, *Zarovky*, *Ventilator*) napsané v jazyce ANSI C. Zdrojový kód programů je v příloze A.

Program *Zakladni* je umístěn v 200 ms cyklu, během něhož je počítána odchylka žádaných teplot od skutečných a na základě implementovaného algoritmu PSD regulátoru, je nastavována hodnota akčních zásahů v intervalu  $\langle 0,10 \rangle$ . Podrobný popis použitého regulátoru je v kapitole 5. Mimo to je zde prováděn i přepočítání hodnoty teploty, z tvaru který poskytuje měřicí karta X20AT2222, na stupně Celsia a kompenzace aditivní chyby způsobené odporem vedení.

Program *Zarovky* s dobou cyklu 1 ms, slouží k převodu akčního zásahu vypočítaného programem *Zakladni*, do tvaru použitelného pro akční člen. Pomocí funkce LCRPWM z knihovny LoopConR, je v závislosti na hodnotě AZ generován diskrétní signál ve formě pulsně-šířkové modulace pro řízení žárovek. Konfigurace parametru této funkce probíhá při inicializaci (*ZarovkyInit.c*), zapsáním číselných hodnot proměnných do speciální proměnné datového typu LCRPWM. Kromě periody signálu a minimální délky pulsu je třeba nadefinovat maximální a minimální hodnoty vstupní hodnoty, tedy interval ve kterém se pohybují hodnoty akčního zásahu. Nastavením bitu *LCRPWM.enable* se funkce aktivuje. V souboru *ZakladniCyclic.c* se zapisuje aktuální hodnota AZ opět do používané datové struktury a na základě její hodnoty je v bitu LCRPWM.pulse generován řídicí signál pro akční člen. Tato hodnota je potom ukládána do proměnné typu BOOL, která je softwarově připojena na fyzický výstup digitální výstupní katy. Doba cyklu tohoto programu je zvolena co nejnižší, protože cyklus ve kterém je umístěna funkce LCRPWM, určuje nejkratší realizovatelnou délku pulsu. Vyšší hodnoty by způsobovali blikání žárovek, což může snižovat jejich životnost. [9]

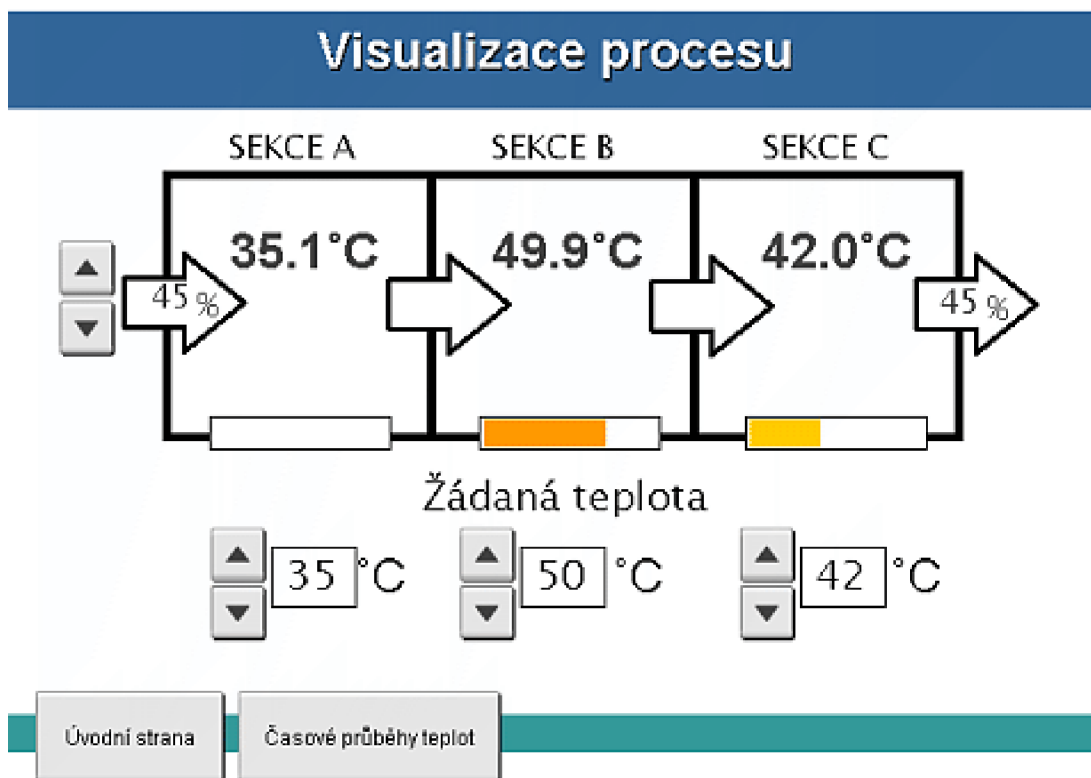
Program *Ventilator* slouží ke generování řídicího signálu pro ventilátory a je tedy analogickou obdobou programu *Zarovky* popsaného v předchozí kapitole.

Protože se ventilátory otáčejí se setrvačností, stačí aby nejkratší řídicí puls a tedy i délka programového cyklu byla 20 ms. Pomocí dvou podmínek *if* je v programu vytvořena tzv. „mrtvá zóna“, která brání uživateli nastavit výkon ventilátoru v intervalu (0,30>, protože při nízkém výkonu se ventilátor nedokáže roztočit.

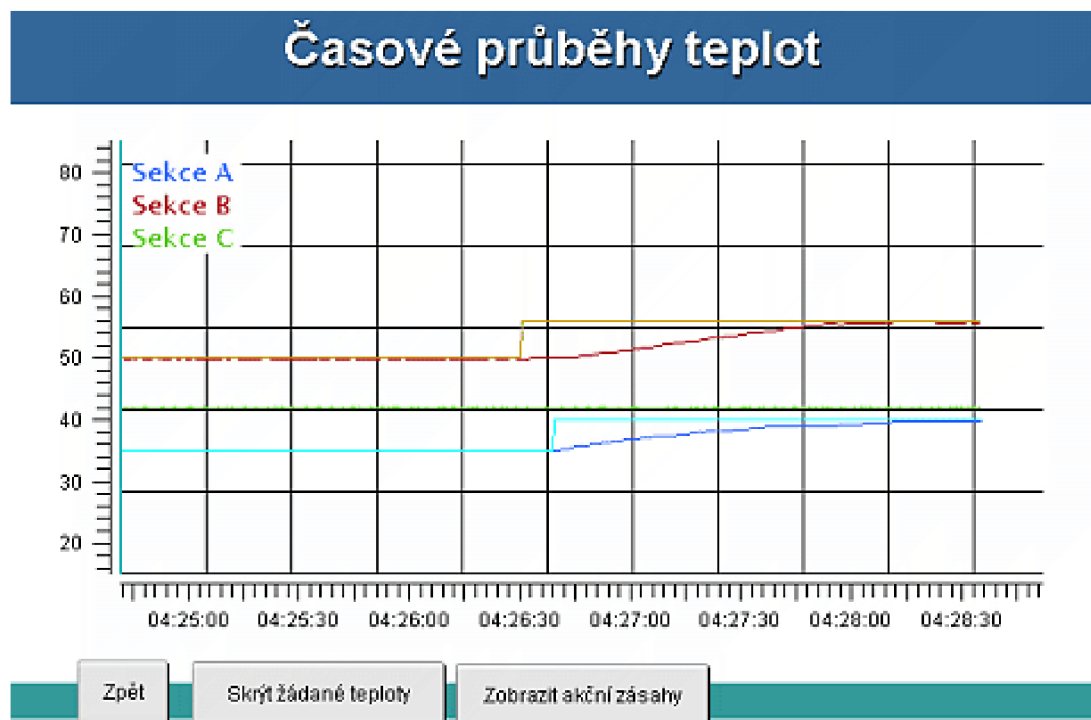
### 3.3.2 Vizualizace procesu

Vizualizace procesu je vytvořena na Power Panelu 400 s dotykovou obrazovkou a VGA rozlišením. Hlavní strana vizualizace modelu, uvedená na Obr. 3.7, slouží k zobrazování aktuálních hodnot veličin v modelu i řízení procesu. Názorně zobrazuje teploty v jednotlivých sekcích s rozlišením na desetinu stupně Celsia. Aktuální výkon akčních členů je indikován pomocí sloupcových grafů s proměnnou barvou. Výkon ventilátorů je zobrazován jako procentuální hodnota maximálních otáček v šipkách naznačujících směr proudění vzduchu.

Ovládání procesu je realizováno na stejné obrazovce prostřednictvím dotekového rozhraní. Nastavit tak lze nezávisle žádanou teplotu v jednotlivých sekcích a výkon ventilátorů. Z hlavní obrazovky je možné vstoupit na další (Obr. 3.8), která zobrazuje časové průběhy. Kromě aktuální teploty lze do stejného grafu promítnout i žádané hodnoty. Časová závislost akčních zásahů lze zobrazit v dalším současně otevřeném grafu.



Obr. 3.7: Visualizace procesu - hlavní okno



Obr. 3.8: Visualizace procesu – časové průběhy teplot



## 4. IDENTIFIKACE A APROXIMACE SOUSTAVY

### 4.1 ANALYTICKÝ POPIS SOUSTAVY

Analytický popis soustavy pro účely této práce, je vhodný zejména pro simulaci a návrh regulátoru. Obecně bývá bohužel matematický popis tepelných soustav značně složitý. Následující vztahy vycházejí z Newtonova zákona ochlazování popsaného v [1]. Pro účely simulace bylo třeba modifikovat rovnici do tvaru vyjadřující časovou závislost. Použitý postup je popsán níže.

Přenos tepla ze zdroje tepla do prostředí, lze podle [1] popsat Newtonovým vztahem

$$Q = \alpha S t (T_{\text{env}} - T) \quad (4.1)$$

kde  $Q$  je množství tepla v Joulech, které za čas  $t$  projde plochou  $S$  ze zdroje tepla do prostředí.  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla,  $T_{\text{env}}$  je teplota prostředí a  $T$  je teplota zdroje tepla. Derivací rovnice podle času dostaneme vztah

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha S (T_{\text{env}} - T) \quad (4.2)$$

Teplotní kapacita je dle [2] definována jako

$$Q = C(T_{\text{kon.}} - T_{\text{poč.}}) = CT \quad (4.3)$$

kde  $C$  odpovídá tepelné kapacitě v  $\text{J.K}^{-1}$ . Úpravou dostáváme rovnici

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (4.4)$$

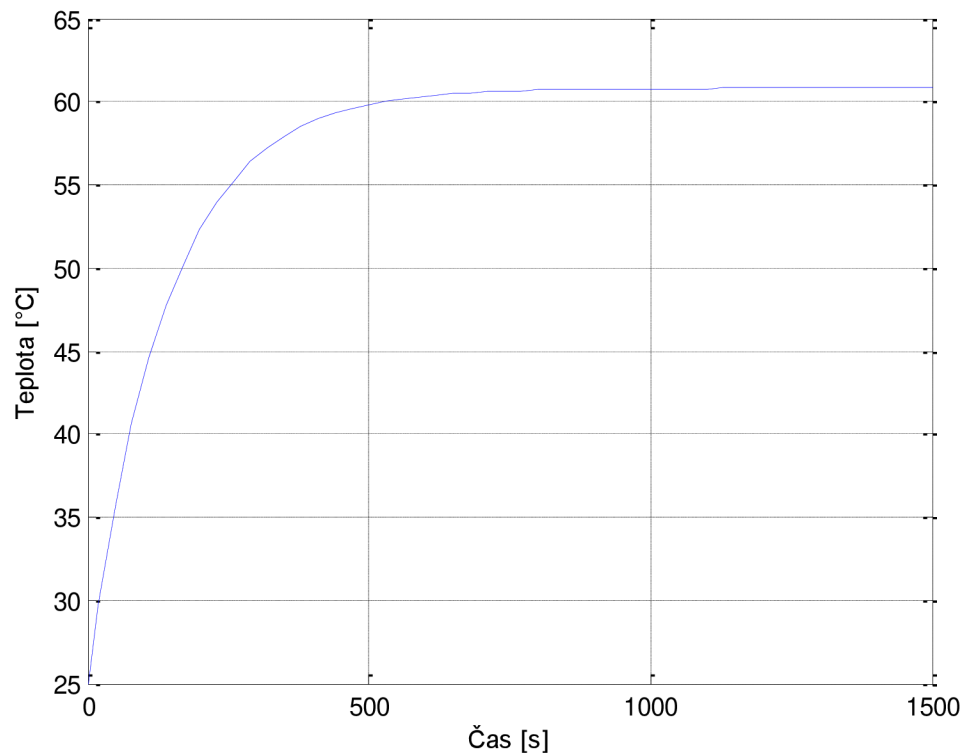
která derivací podle času přejde ve vztah

$$\frac{dQ}{dt} = C \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad (4.5)$$

Dosazením tohoto vztahu do 4.1 získáváme časovou závislost teploty

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha S}{C} (T_{\text{env}} - T) \quad (4.6)$$

Pro představu o chování modelu podle vztahu (4.6), jsou v následujícím kroku za proměnné dosazeny hodnoty odpovídající uzavřené střední sekci a průběh je nasimulován v prostředí Matlab Simulink. Uvažována je uzavřená sekce o rozměrech 80x70x70 mm, vyplněná suchým vzduchem a zdrojem tepla (dvě žárovky) s přestupní plochou 11,3 cm<sup>2</sup>. Koeficient  $\alpha$  je dle [1] volen 3 kcal.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>. Tepelná kapacita vzduchu uvnitř sekce byla na základě vnitřního objemu a měrné tepelné kapacity vzduchu při 20 °C stanovena na hodnotu 0,4 J. K<sup>-1</sup>. Struktura simulačního modelu je na Obr. 4.2, průběh teploty získaný z tohoto modelu zobrazuje Obr. 4.1.



**Obr. 4.1: Simulace průběhu teploty v sekci**

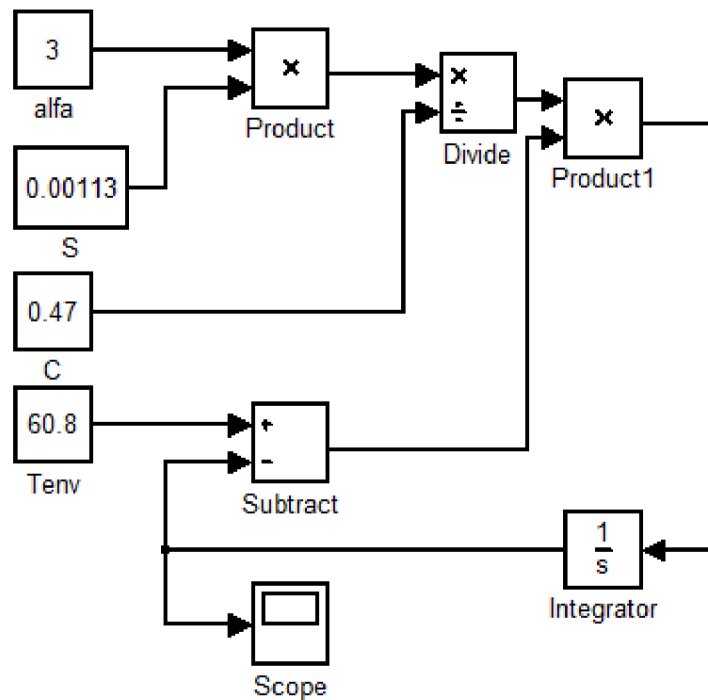
Z Obr. 4.1 je patrné, že vzduch uvnitř sekce s počáteční teplotou 25 °C se až do ustálení ohřívá na teplotu 63.8°C, kterou má zdroj tepla. Celý děj za těchto podmínek trvá asi 25 minut. Tento průběh navíc odpovídá počáteční i konečnou teplotou jednotkovému skoku z Obr 4.3 a je tak možné udělat si představu o

možnostech této metody. Nasimulovaný průběh, stejně jako změřený, sice už na první pohled patří průběhu soustavy prvního řádu, bohužel se ale ustálí na koncové teplotě v podstatně kratším čase. Důvodů se nabízí několik.

Asi největší nevýhodou tohoto popisu je přítomnost součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Jedná o velice složitou funkci řady veličin, závislých na vyšetřovaném prostředí.  $\alpha$  tedy není materiálová konstanta, ale veličina která může nabývat dosti vzdálených hodnot. Pokud se hodnota součinitele během simulace mění, výrazně se mění i rychlost přechodného děje. Další nelineární proměnná závislá na teplotě, která se v simulaci vyskytuje, je hustota vzduchu. Při výpočtu tepelné kapacity byla uvažována konstantní hustota vzduchu uvnitř sekce při 20 °C. Rozptyl jejích hodnot ale zdaleka není takový jako tomu je u součinitele přestupu tepla a rozdíl by se tak měl projevit minimálně.[1]

Dalším faktorem, který ve skutečném modelu pravděpodobně prodlužuje dobu ustálení teploty, jsou nedokonalé tepelně-izolační vlastnosti modelu. Protože teplota v laboratoři, kde probíhalo měření byla výrazně nižší (25 °C), než teplota ustálení dá se předpokládat, že zde docházelo k tepelným ztrátám vlivem okolního prostředí. Za zmínku stojí ještě přechodný děj zdroje tepla a nelinearity v modelu.

Pokud bychom chtěli při simulaci celého fyzického modelu vycházet z Newtonova zákona ochlazování a tedy z výše uvedeného postupu, bylo by nutné ještě doplnit vazby mezi jednotlivými sekcemi, protože jejich teploty se dle struktury modelu popsané na Obr. 3.1 budou značně ovlivňovat nejen v závislosti na průtoku vzduchu. Dosazení vhodných hodnot proměnných do rovnice (4.6), ať již na základě fyzikálních tabulek nebo měření, včetně součinitele přestupu tepla  $\alpha$  už za těchto podmínek, především kvůli proudění vzduchu, ani nepřichází v úvahu. Z uvedených skutečností vyplývá, že vzhledem ke složitosti analytického popisu soustavy se jako vhodnější jeví identifikace na základě přechodové charakteristiky.



Obr. 4.2: Simulace jedné sekce v prostředí MATLAB simulink

## 4.2 IDENTIFIKACE NA ZÁKLADĚ PŘECHODOVÉ CHARAKTERISTIKY

U navržené soustavy lze s určitostí předpokládat poměrně velké časové konstanty, proto se jako vhodná jeví identifikace na základě přechodové charakteristiky. Navíc všechny tři sekce jsou konstrukčně identické, a tak stačí identifikovat pouze jednu z nich. Protože prostorové průchody mezi sekcemi jsou vytvořeny kvůli vstupu chybových veličin do modelu, byly během identifikace vyplněny stejným materiálem, z jakého jsou vytvořeny stěny sekcí. Poté byla 3-krát změřena přechodová charakteristika, s velikostí skoku odpovídající 60% maximálního akčního zásahu. Protože všechny tři průběhy byli prakticky identické, byl pro identifikaci vybrán pouze jeden z nich. Změřené charakteristice odpovídá modrý průběh na Obr 4.3.

Identifikace fyzického modelu byla provedena numericky v programu Matlab s využitím funkce *fminsearch*. Princip funkce je založen na hledání přenosu systému,

jehož přechodová charakteristika se nejvíce podobá charakteristice změřené. Nejmenší odchylky od originálního průběhu bylo dosaženo v případě, že aproximovaná soustava byla prvního řádu. Metoda tedy hledala parametr  $T$ , přenosu systému ve tvaru

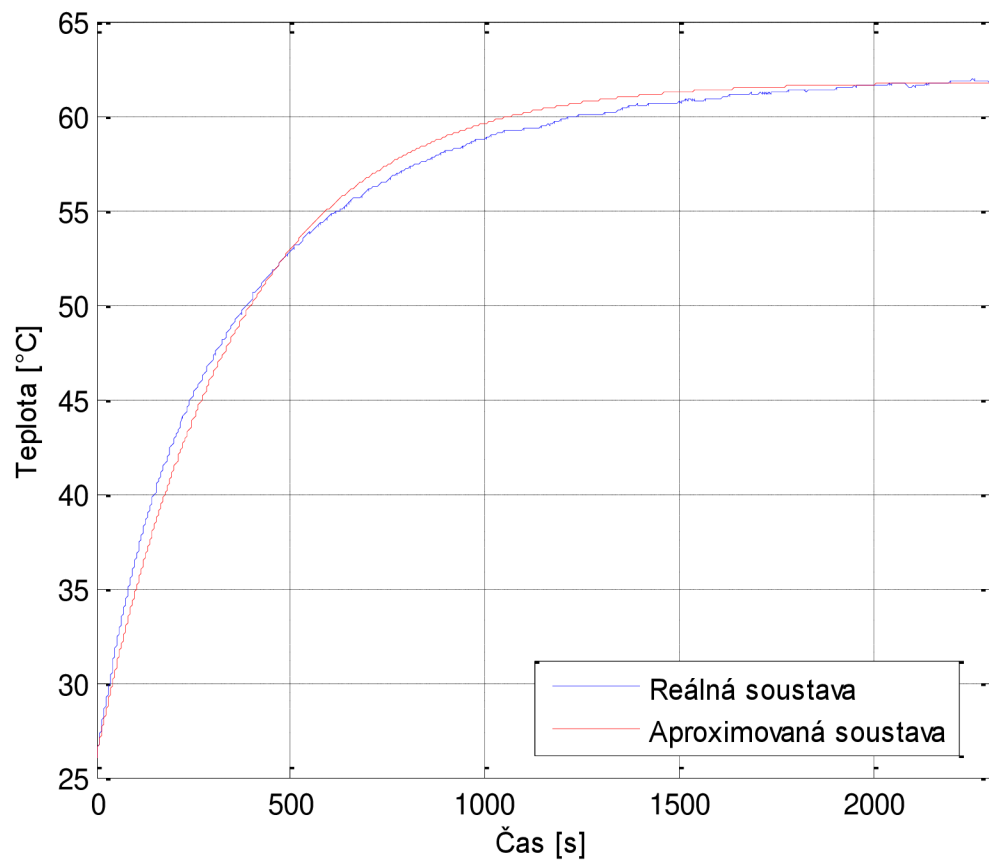
$$F(p) = \frac{K}{(Tp + 1)} \quad (4.7)$$

Algoritmus založený na metodě nejmenších čtverců, pracoval na principu hledání minimálního obsahu čtverců se stranou odpovídající velikosti odchylek jednotlivých průběhů [10]. Celková odchylka  $e$  je potom tedy

$$e = \sum_0^n [h(t) - h_{\text{orig}}(t)]^2 \quad (4.8)$$

kde  $h(t)$  je hodnota přechodové charakteristiky aproximované soustavy v čase  $t$  a  $h_{\text{orig}}$  odpovídá hodnotám charakteristiky změřené. Zdrojový kód funkce pro Matlab je v příloze B. Časová konstanta vypočítaná na základě uvedeného postupu, zaokrouhlená na celé číslo, odpovídá hodnotě  $T=359$  a zesílení je  $K=5,97$ . Porovnání obou přechodových charakteristik je na Obr 4.3. Výsledný operátorový přenos jedné sekce modelu vypočítaný na základě popsané metody má tedy tvar

$$F(p) = \frac{5.97}{(359p + 1)} \quad (4.9)$$



Obr 4.3: Jednotkový skok teploty v uzavřené sekci

## 5. REGULACE TEPLOTY V MODELU

### 5.1 NÁVRH REGULÁTORU

Na základě přenosu systému (4.9), identifikovaném v předchozí kapitole, byl pro samostatnou sekci navrhnout regulátor. Kvůli požadavku na co nejrychlejšímu regulační děj a nulovou ustálenou odchylku je vhodné použít regulátor typu PID. Vhodný je i proto, že vzhledem k jednoduchosti soustavy není třeba obávat se nestability způsobené integrační složkou. Regulátor byl navržen nástrojem Sisotool v programu Matlab. Při návrhu byla zohledňována především co největší rychlost a minimální překmit. Překmit je nežádoucí zejména kvůli nemožnosti realizace záporného akčního zásahu. Výsledný přenos navrženého ideálního PID regulátoru je následující

$$F_R(p) = 0.096 \frac{(365p + 1)(0.17p + 1)}{p} \quad (5.1)$$

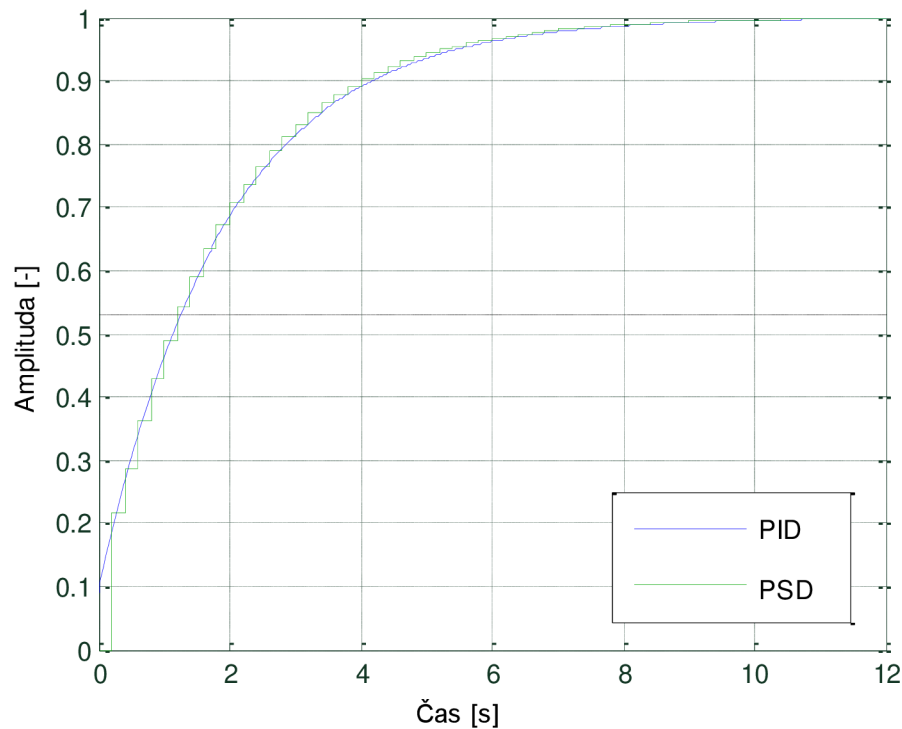
Upravením tohoto přenosu do obvykle používaného tvaru PID regulátoru dostáváme rovnici

$$F_R(p) = K_R \left( 1 + T_D p + \frac{1}{T_I p} \right) = 35 \left( 1 + 0.17p + \frac{1}{365p} \right) \quad (5.2)$$

Skutečný regulátor bude realizován prostřednictvím programu v PLC, je tedy nutné jeho přenos zdiskretizovat. Přestože derivační složka v (5.2) je nerealizovatelná, není dle [11] v případě přepočtu do PSD nutné uvažovat realizační konstantu. Použijeme-li při diskretizaci integrační složky lichoběžníkovou metodu [11], má výsledná diskrétní přenosová funkce regulátoru tvar

$$F_R(z^{-1}) = K_R \left( 1 + \frac{T_D}{T_{VZ}} (1 - z^{-1}) + \frac{T_{VZ}}{T_I} \frac{1}{1 - z^{-1}} \right) \quad (5.3)$$

kde  $K_R=35$ ,  $T_D=0.17$ ,  $T_I=365$ . Vzorkovacím čas  $T_{VZ}=200\text{ms}$  odpovídá době programového cyklu PLC. Odezvy na jednotkový skok aproximovaného systému s přenosem dle (4.9), při použití PID a ekvivalentního PSD regulátoru zobrazuje Obr. 5.1.



**Obr. 5.1: Odezvy systému na jednotkový skok při použití PID a PSD regulátoru**

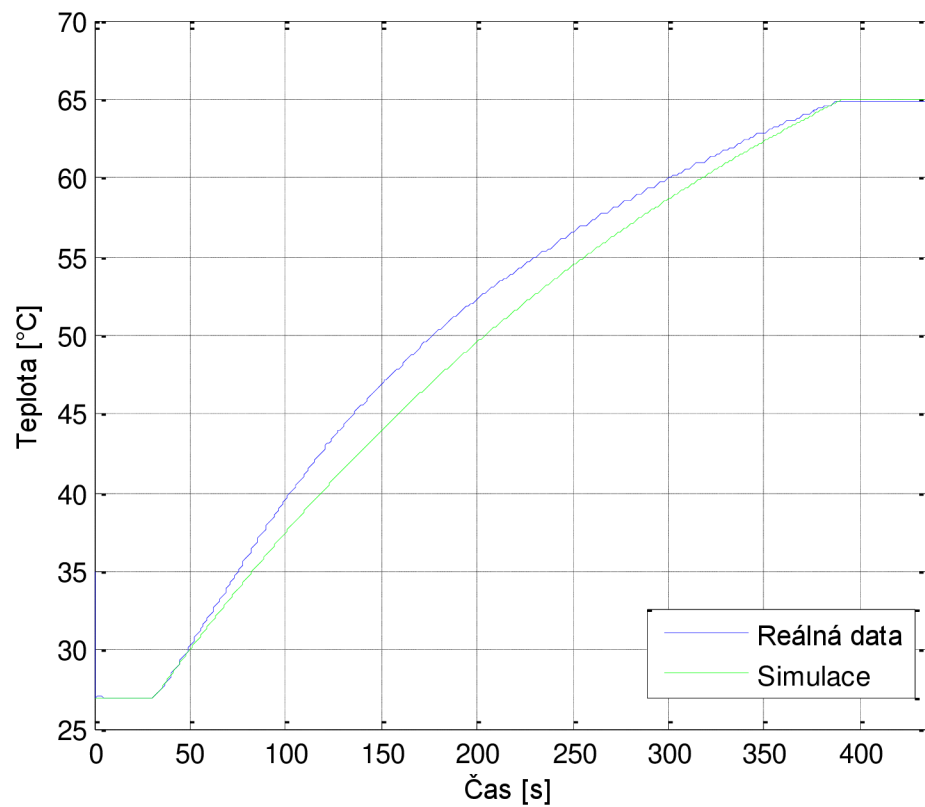
Protože akčním členem v modelu je zdroj tepla, má regulátor v reálné soustavě na rozdíl od ideálního omezený akční zásah a je ho ještě třeba modifikovat. V tomto případě je vhodné upravit PSD regulátor ve formě blokového schématu. Obr. 5.3 vyobrazuje regulátor dle rovnice (5.3), doplněný o omezení akčního zásahu a omezení sumační složky. Blok saturace omezuje výstupní hodnotu na interval  $\langle 0,10 \rangle$ . Tím je potlačena možnost přebuzení sumační složky při změně žádané hodnoty. Tato podoba je již finální a na základě tohoto schématu je regulátor realizován programovým kódem v jazyku ANSI C v řídicím PLC. Zápis tohoto kódu je v příloze A.

Obr. 5.2 znázorňuje změnu žádané teploty v uzavřené sekci (s ucpanými otvory). V čase 30 sekund je žádaná teplota z původní hodnoty  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  změněna na hodnotu  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Modrý průběh odpovídá reálné teplotě v sekci při použití výše uvedeného PSD regulátoru, implementovaného do programového cyklu řídicího

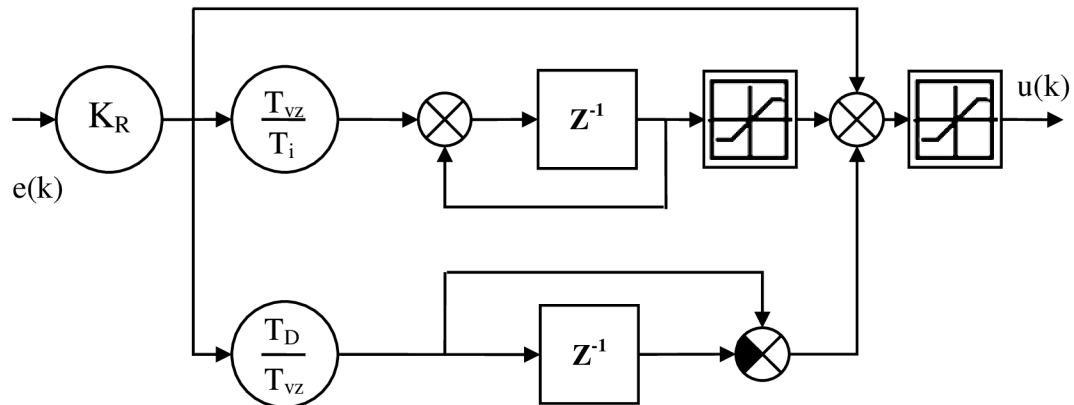


PLC. Zelený průběh je výstup z prostředí Matlab Simulink, kde regulovanou soustavu představuje blok transfer function, s přenosovou funkcí aproximované soustavy. Regulátor je i v případě simulace napsán v jazyku ANSI C použitím bloku S-function.

Při pohledu na Obr. 5.2 je patrné, že doba regulace u simulovaného průběhu je identická jako u průběhu skutečného, pouze tvarem se regulačního děje mírně liší. To je pravděpodobně způsobenou nelinearitou reálného modelu.



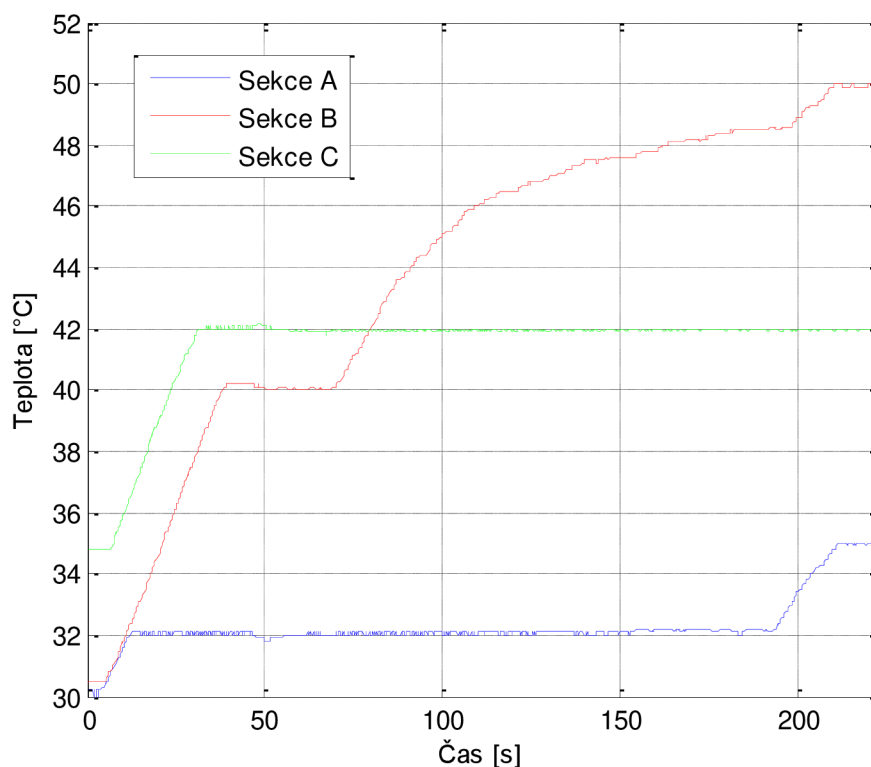
**Obr. 5.2: Změna žádané teploty uvnitř uzavřené sekce**



**Obr. 5.3: Stavový model PSD regulátoru s omezením akčního zásahu a sumační složky**

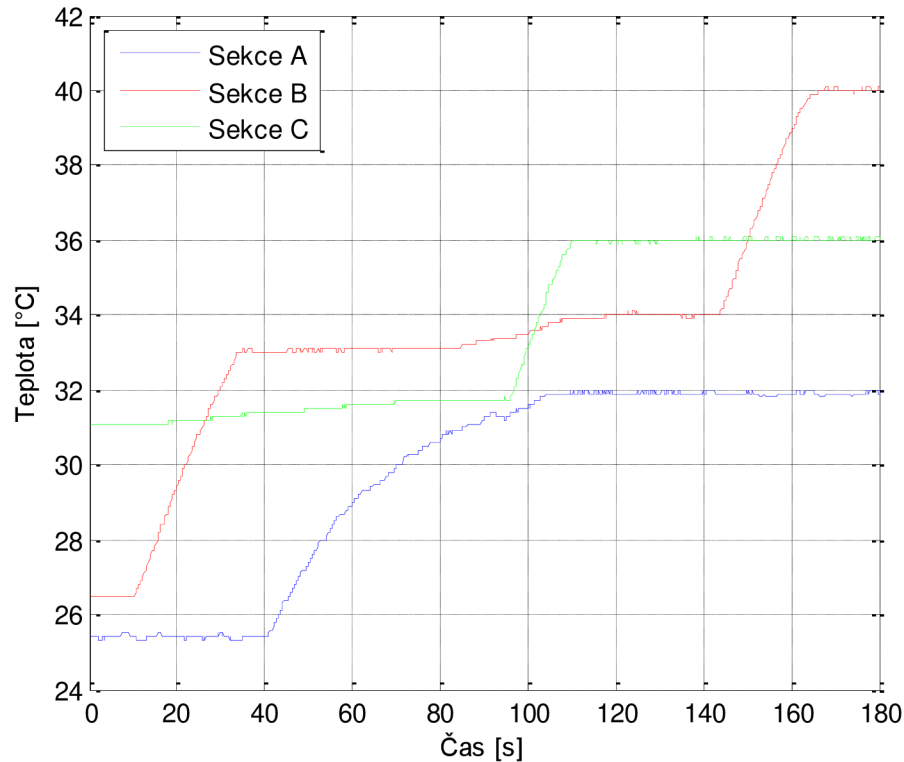
## 5.2 SCHOPNOSTI A OMEZENÍ REGULACE

Oproti regulačnímu ději na (5.2), kdy je sekce izolována a chyba působící na děj je tedy minimální, se budou sekce při běžném použití navzájem značně ovlivňovat. Kromě tepelných ztrát a vzájemného ovlivňování může kolísání teploty způsobovat i nehomogenní proudění vzduchu. Reálné schopnosti regulace a její omezení jsou proto demonstrovány na následujících dvou příkladech. Z důvodu lepší přehlednosti je odstavec s popisovaným dějem umístěn na stejné straně jako grafy.



**Obr. 5.4: Regulační děj v reálném modelu č.1**

Na Obr. 5.4 je počáteční teplota v sekci A 30,2 °C, v B 30,4 °C a v C 34,8 °C. V čase 5 sekund jsou žádané teploty sekcí v popsaném pořadí změněny na 32 °C, 40 °C a 42 °C, při vypnuté ventilaci vzduchu. Teplota v A a C se ustálí bez překmitu, u průběhu C se vyskytl překmit pouze minimální (2%). V čase 47 s, je spuštěna ventilace na úrovni 40% maximálního výkonu ventilátoru (dále jen MV). Na změnu podmínek regulátor okamžitě zareaguje a chyba se tak projeví jen v poklesu teploty v A o 0,3 °C. Tato chyba je během zhruba 5 sekund vyregulována. V čase 70 s je žádaná hodnota střední sekce B zvýšena na hodnotu 50 °C. Protože je teplota ve vedlejší sekci A výrazně nižší a protože z této sekce proudí s poměrně výraznou intenzitou chladnější vzduch, výkon akčního členu v B nestačí a teplota se začíná ustalovat na hodnotě 48,5 °C. Teprve v momentě kdy je v žádaná hodnota v sekci A zvýšena (o 3 °C), dosáhne se požadované teploty i v sekci B.



**Obr. 5.5: Regulační děj v reálném modelu č.2**

Na druhém příkladu (Obr. 5.5) jsou demonstrovány především omezení regulace. Počáteční teplota sekce A je 25.7 °C, B 26.5 °C a C 31.1 °C. V čase 10 s je žádaná teplota v sekci B změněna na 33 °C. V čase 40 s změněna požadovaná teplota v A na 32 °C. Současně s nárůstem teploty v sekcích začne vlivem proudění vzduchu, které je v tomto případě po celou konstantně na úrovni 55% MV, mírně stoupat teplota v sekci C přesto, že se její žádaná hodnota se nezměnila. V čase 95 s je žádaná teplota C zvýšena na 36 °C. Tato teplota, společně především s výkonem akčního členu v A, se opět projeví mírným růstem teploty ve vedlejší sekci B. V čase 145 s je žádaná teplota v B skokově změněna na 40 °C. V této chvíli si sekce udržují správnou teplotu, což dokazuje, že vzájemné tepelné ovlivňování se projevuje výrazněji především při nižších teplotách.

## 6. SOFTWAREVÁ SIMULACE SOUSTAVY

### 6.1 POPIS PROBLÉMU

Softwarová simulace tepelného procesu byla vytvořena v prostředí Matlab Simulink. Jak již bylo řečeno v kapitole 4.1, analytický popis na základě matematického modelu by byl vzhledem k nehomogennímu proudění vzduchu skrz sekce nadmíru složitý. Pro rozdílné úrovně ventilace vzduchu se vzájemné ovlivňování značně liší. Při nízkém výkonu ventilátorů (kolem 30% MV), odpovídají teploty uvnitř sekcí výkonu přidružených akčních členů a vnitřní teploty jsou ovlivňovány ve směru proudění vzduchu sousedními bloky.

Při zvýšení výkonu ventilace zhruba nad 40% MV dochází k tomu, že akční členy sekce A vlivem proudícího vzduchu, ohřívají především následující sekci B, zatímco A je ochlazována chladnějším vzduchem z okolního prostředí (Obr. 6.3). Tento jev se samozřejmě projevuje i při vyšších výkonech ventilátoru, avšak značně nelineárně v závislosti na jeho výkonu. Vytvoření simulačního modelu je tak značně složitou úlohou.

Model byl nakonec vytvořen ve 3 verzích s rozdílnými konstantami přestupu, pro proudění vzduchu na úrovni 30%, 45% a 60% maximálního výkonu ventilátorů. Konstanty modelu byly stanoveny experimentálně na základě průběhů získaných z reálného systému. Struktura zapojení bloků je ve všech verzích stejná a je vytvořena tak, aby v případě potřeby bylo možné namodelovat i jinou úroveň ventilace. Kapitola 6.3 podrobně popisuje tento poměrně jednoduchý postup.

### 6.2 POPIS SIMULAČNÍHO MODELU

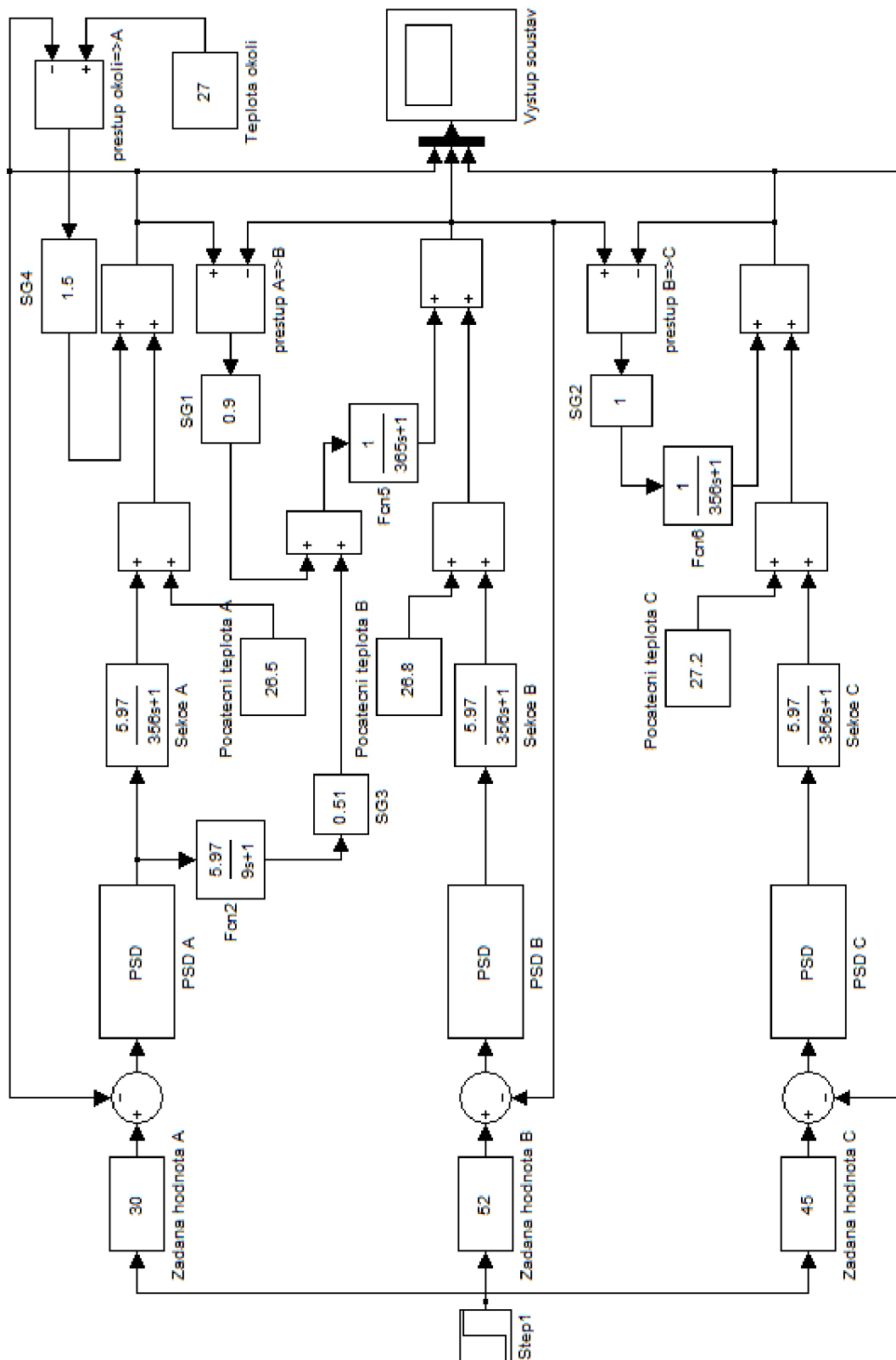
Výsledná podoba simulačního modelu tepelného procesu je na Obr. 6.1. K nastavení počátečních stavů slouží bloky *Pocatecni teplota* a *Teplota okoli*. *PSD A*, *PSD B* a *PSD C* jsou číslicové regulátory, vytvořené bloky typu S-function. Jejich funkce je realizována programovým algoritmem v jazyku ANSI C a vnitřní struktura je tak identická se strukturou regulátorů implementovaných v PLC, použitých pro reálný proces. Jejich parametry lze měnit modifikací hodnot proměnných ve

Workspace, popř. v inicializačním souboru *inicializace\_modelu.m*, který je třeba spustit před použitím simulace.

Model jednotlivých sekcí představují bloky *Sekce A*, *Sekce B*, *Sekce C* s přenosovou funkcí aproximované soustavy dle (4.9). Ovlivňování vnitřních teplot, v závislosti na teplotě okolí a teplotě sousední sekce, závisí na rozdílu ovlivňované a ovlivňující teploty. Tento proces představují bloky s názvem *Prestup*. V každém kroku simulace je vyhodnocen rozdíl těchto teplot, který je následně k ovlivňované teplotě přičten. Váhu těchto změn určují bloky zesílení *SG1* až *SG4*. Aby se i u vstupující chyby projevoval přechodový děj, bylo nutné vazby doplnit přenosem systému prvního řádu s časovou konstantou odpovídající konstantě sekce.

Při vyšším výkonu ventilátorů se začíná projevovat přenos tepla z akčního členu do sousední sekce ve směru proudění vzduchu. Míru ovlivňování akčním členem, ve smyslu z A do B, určuje hodnota zesílení *SG3*. Tato chyba je v modelu přičítána k chybě popsané v předchozím odstavci. Stejný jev se ve smyslu z B do C v praxi prakticky neprojevil ani při vyšších výkonech ventilátoru a proto je zanedbán. Protože se v případě jejího výskytu projevuje přechodovým dějem odpovídajícím systému druhého řádu, byla přechodová charakteristika identifikována metodou popsanou v kapitole 4.2. Na základě toho je vazba doplněna přenosem systému prvního řádu s časovou konstantou 9 (blok *Fcn2*), což výrazně přispělo k reálnějšímu tvaru průběhu vzhledem k experimentálním datům.

Bloky *Zadana hodnota A*, *Zadana hodnota B*, *Zadana hodnota C* slouží k nastavení žádaných teplot. Nasimulované teploty a jejich časové průběhy lze sledovat blokem *Vystup soustav*.



Obr. 6.1: Schéma simulačního modelu v prostředí Matlab Simulink

### 6.3 NASTAVENÍ MODELU

Simulační model je ve výchozí formě vytvořen ve 3 verzích. Pro proudění vzduchu na úrovni 30%, 45% a 60% maximálního výkonu ventilátorů (dále jen MV). V případě, že je třeba modelovat děje při jiné úrovni výkonu, je nutné nejprve poměrně jednoduchým způsobem nastavit hodnoty zesílení v blocích SG4, SG3, popř. SG1 a SG2.

Před začátkem je třeba mít k dispozici průběh změřený na reálném modelu. Při jedné úrovni průtoku vzduchu, se provede skoková změna teploty v první sekci A a všechny měřené teploty se uloží do jednoho průběhu. Na základě tohoto průběhu, měníme hodnotu zesílení SG4 v modelu tak, aby doba ustálení teploty v A odpovídala naměřeným hodnotám. Tím je nastaven vliv okolí na první sekci. V následujícím kroku je třeba pomocí SG3 nastavit ustálenou hodnotu v sekci B. Toto zesílení reprezentuje míru ohřívání B přímo od akčního členu z A. Nastavení ustálené teploty v C se potom provede blokem SG2.

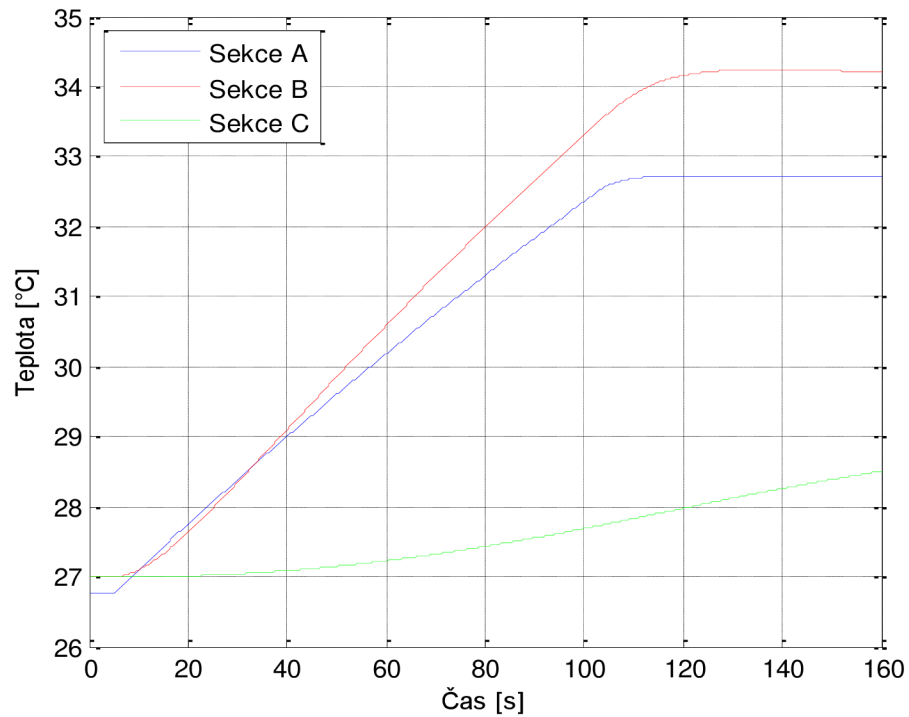
### 6.4 POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH A SKUTEČNÝCH DAT

Výsledky simulace a porovnání s reálnými daty jsou reprezentovány na následujících průbězích.

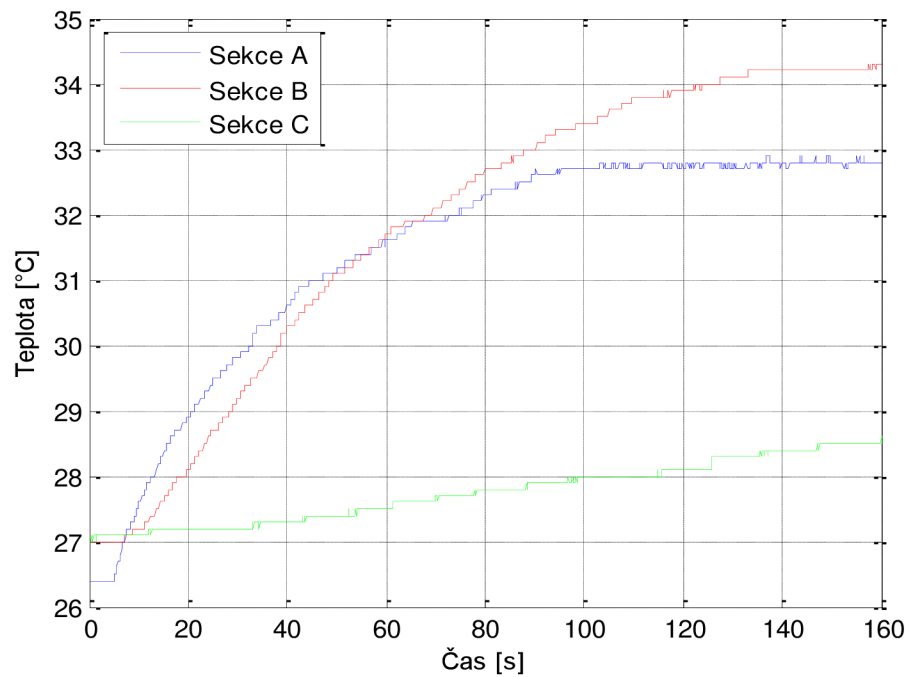
Průběhy na Obr. 6.2 a Obr. 6.3 představují simulaci a reálná data z procesu, při skokové změně žádané hodnoty v sekci A na 32,8 °C a ventilaci na úrovni 45% MV. Projevuje se zde jev popsáný v kapitole 6.1, kdy akční člen sekce A ohřívá výrazněji sousední sekci než vlastní. Při porovnání obou průběhů je patrné, že doba přechodového děje i ustálená teplota u simulace přibližně odpovídá skutečnosti. Tvarem regulačního děje se ale liší.

Obr. 6.4 a Obr. 6.5 zobrazují skokovou změnu žádané hodnoty v B, na 32,8 °C při ventilaci na úrovni 45% MV. Tvary regulačního děje se výrazně neliší, reálná soustava je ale rychlejší než simulovaná. V tomto případě je to způsobeno nelinearitou soustavy a akčního členu. Aby byl přechodový děj rychlejší, bylo by třeba v simulaci zvýšit zesílení aproximované soustavy. V tu chvíli by ale byl přechodný děj příliš rychlý při vyšších žádaných hodnotách teploty.

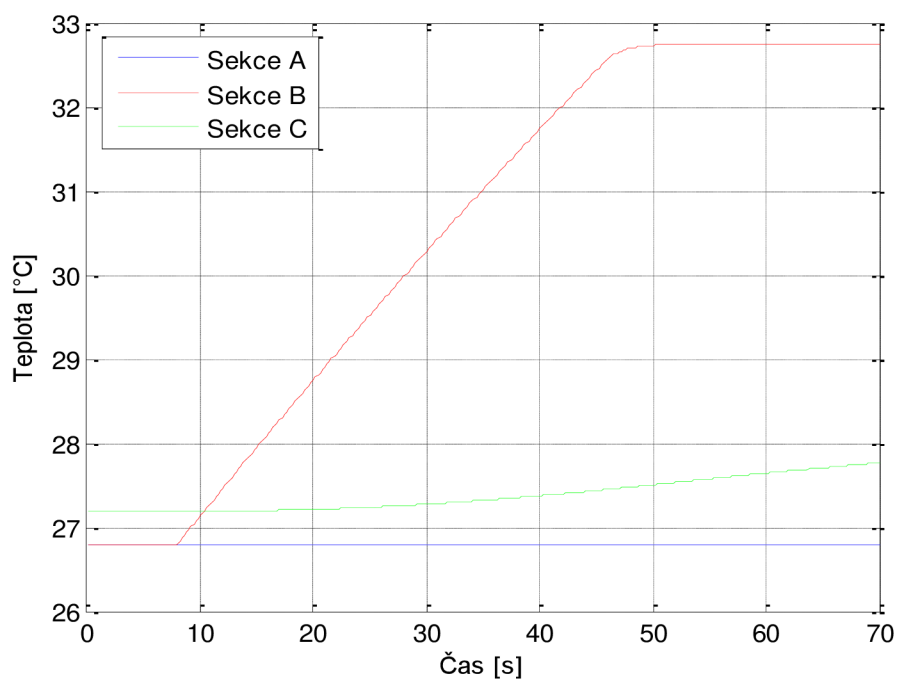




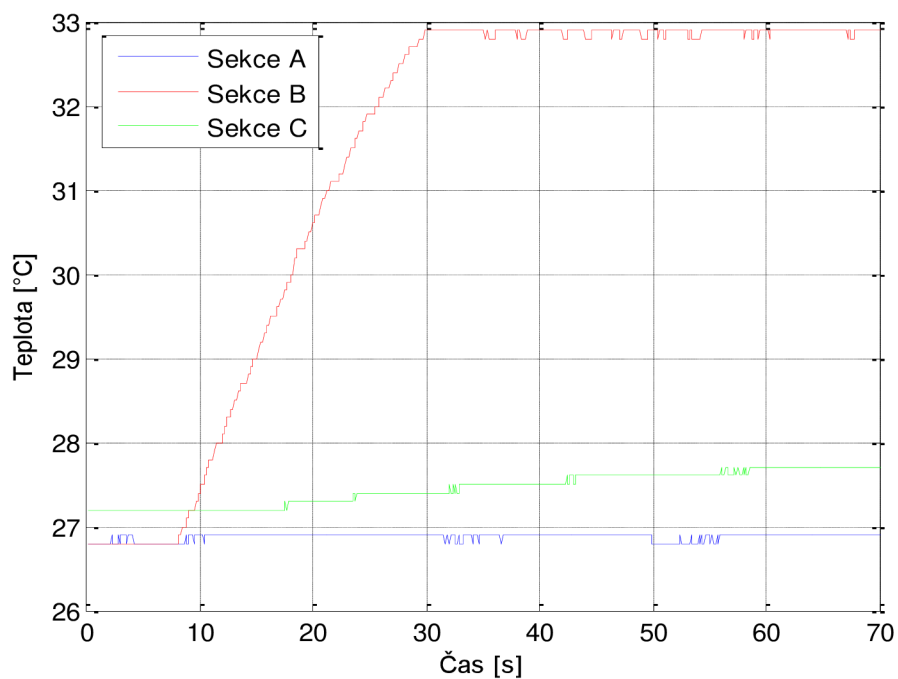
**Obr. 6.2: Skoková změna žádané teploty v sekci A (simulace)**



**Obr. 6.3: Skoková změna žádané teploty v sekci A (reálná data)**



**Obr. 6.4: Skoková změna žádané hodnoty v sekci B (simulace)**



**Obr. 6.5: Skoková změna žádané hodnoty v sekci B (simulace)**

## 6.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE

Při porovnání dosažených výsledků simulace s reálným procesem je patrné, že vzhledem ke složitosti soustavy se univerzální simulaci, pro všechny možné stavy a parametry modelu, vytvořit nepodařilo. Během návrhu byl sice model doplňován o bloky a vazby, které měli zohledňovat i další faktory, jejich vliv na zpřesnění výsledků byl však minimální. Navíc se s rostoucí složitostí logicky projevovali nové komplikace. Další zesložitování použitého konceptu by se tedy nevyplatilo.

Jak je uvedeno v kapitole 4.1, za hlavní problém lze považovat to, že modelem proudí vzduch s proměnnou intenzitou. Velkým problémem je také nelinearita, která způsobuje, že pro různé intervaly teplot bychom museli uvažovat jiné zesílení aproximované soustavy.

Ve výsledku lze konstatovat, že se simulace nehodí pro komplexnější modelování velkého množství regulačních dějů v delším čase. Jeho primární účel je však jiný. Protože má fyzický model sloužit jako školní model pro studenty, hlavní funkce simulace by měla spočívat v testování navržených regulátorů před použitím na fyzické soustavě. V tomto ohledu by jeho schopnosti měli být zcela dostačující.

## 7. ZÁVĚR

První část práce prezentuje zejména přehled způsobů a prostředků pro měření teploty pomocí analogových měřicích karet X20AT2402 a X20AT2222. Následně je popsán koncept, tvorba a zprovoznění modelu reálného systému. Detailně je popsáno technické řešení i struktura modelu a je navrženo vhodné řízení a vizualizace prostřednictvím průmyslového PLC.

Sestavený fyzický model je ve výsledku plně provozuschopný. Ve spojení s řídicím PLC je možné řídit vnitřní teploty procesu v poměrně velkém rozsahu teplot. Jak vyplývá z průběhů teplot prezentovaných v práci, běžně využitelný rozsah pro řízení teploty se pohybuje od pokojové teploty do zhruba 70 °C. Navržená regulace dokáže s ohledem na možnosti akčních členů, pracovat bez trvalé regulační odchylky s přesností danou rozlišovací schopností měřicí karty, tzn. desetiny stupně Celsia.

Protože se koncept analytického popisu soustavy na základě Newtonova zákona ochlazování vzhledem ke složitosti soustavy a proudění vzduchu neosvědčil, byl systém (pro účely simulace a návrh regulátoru) identifikován na základě přechodové charakteristiky metodou nejmenších čtverců.

V poslední části je na základě struktury fyzického modelu a aproximované soustavy, vytvořen simulační model pro prostředí Matlab Simulink. Ten je ve výsledku vhodný zejména pro ověření funkčnosti navržených regulátorů pro soustavu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORÁK, Zdeněk – KRUPKA, František – ŠINDELÁŘ, Václav. *Technická fyzika*. 2.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. 1436 s.
- [2] HALLIDAY, David – RESNICK, Robert – WALKER, Jearl. *Fyzika: Mechanika – Termodynamika*. 1.vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 576 s. ISBN 80-214-1868-0
- [3] KREJDL, Marcel. *Měření teploty: Senzory a měřicí obvody*. 1.vyd. Praha : BEN, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4
- [4] B&R. *Datasheet X20AT2222* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.br-automation.com/>>.
- [5] B&R. *Datasheet X20AT2402* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.br-automation.com/>>.
- [6] B&R. *Datasheet X20DO9322* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.br-automation.com/>>.
- [7] TOSHIBA. *Datasheet ULN2802* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.alldatasheet.com/>>.
- [8] SUNON. *Datasheet KD1205PFS2* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.datasheetz.com/>>.
- [9] *Automation Studio* [program na DVD-ROM]. Verze V 3.0.71.10 (2008.04.28.4). B&R, 2008.

- [10] RŮŽIČKOVÁ, Irena – FAJMON, Břetislav. *Matematika 3*. Elektronický text FEKT VUT, Brno, 2005
- [11] BLAHA, Petr – VAVŘÍN, Petr. *Řízení a regulace 1*. Elektronický text FEKT VUT, Brno, 2009

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AS	Automation studio
AZ	Akční zásah
IEC	International Electrotechnical Commission
MV	Maximální výkon ventilátoru
PID	Proporcionálně derivačně integrační
PLC	Programmable Logic Controller
PSD	Proporcionálně sumačně diferenční
VGA	Video Graphics Array (640x480)

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>PŘÍLOHA A: ZDROJOVÝ KÓD ŘÍDÍCÍHO PROGRAMU PRO PLC .....</b>	<b>49</b>
A.1 Hlavní část programu Zakladni .....	49
A.2 Hlavní část programu Ventilator .....	50
A.3 Hlavní část programu Zarovky .....	51
<b>PŘÍLOHA B: ZDROJOVÝ KÓD PRO IDENTIFIKACI SOUSTAVY.....</b>	<b>52</b>
B.1 Soubor Identifikace.m .....	52
B.2 Funkce nej_ctverce.m .....	52
<b>PŘÍLOHA C: OBSAH PŘILOŽENÉHO CD .....</b>	<b>53</b>



## Příloha A: Zdrojový kód řídicího programu pro PLC

### A.1 Hlavní část programu Zakladni

```
void _INIT ZakladniInit( void )
{
    Zadana_teplota_A=20;
    Zadana_teplota_B=20;
    Zadana_teplota_C=20;
}

void _CYCLIC ZakladniCyclic( void )
{
    teplota_A=(T16_A*0.1);
    teplota_B=(T16_B*0.1)-0.3;
    teplota_C=(T16_C*0.1)-0.2;

    /*PSD regulator sekce A*/
    DS_A=E_A*K*(Td/Ts);
    U_A=(E_A*K)+sum_A+(E_A*K*(Td/Ts)-DS_A);
    sum_A=sum_A+K*E_A*(Ts/Ti);
    if (sum_A>MaxAZ)sum_A=MaxAZ;
    if (sum_A<MinAZ)sum_A=MinAZ;
    if (U_A>MaxAZ)U_A=MaxAZ;
    if (U_A<MinAZ)U_A=MinAZ;
    Akcni_zasah_A =U_A;

    /*PSD regulator sekce B*/
    DS_B=E_B*K*(Td/Ts);
    U_B=(E_B*K)+sum_B+(E_B*K*(Td/Ts)-DS_B);
    sum_B=sum_B+K*E_B*(Ts/Ti);
    if (sum_B>MaxAZ)sum_B=MaxAZ;
    if (sum_B<MinAZ)sum_B=MinAZ;
    if (U_B>MaxAZ)U_B=MaxAZ;
    if (U_B<MinAZ)U_B=MinAZ;
    Akcni_zasah_B =U_B;

    /*PSD regulator sekce C*/
    DS_C=E_C*K*(Td/Ts);
    U_C=(E_C*K)+sum_C+(E_C*K*(Td/Ts)-DS_C);
    sum_C=sum_C+K*E_C*(Ts/Ti);
    if (sum_C>MaxAZ)sum_C=MaxAZ;
    if (sum_C<MinAZ)sum_C=MinAZ;
    if (U_C>MaxAZ)U_C=MaxAZ;
    if (U_C<MinAZ)U_C=MinAZ;
    Akcni_zasah_C =U_C;
}
```

## A.2 Hlavní část programu Ventilator

```
void _INIT ZarovkyInit( void )
{

    /*Parametry PWM pro rizeni sekce A*/
    LCRPWM_A.enable = 1;
    LCRPWM_A.max_value = 10.0;
    LCRPWM_A.min_value = 0.0;
    LCRPWM_A.t_min_pulse = 0.001;
    LCRPWM_A.t_period = 0.01;
    /*Parametry PWM pro rizeni sekce B*/
    LCRPWM_B.enable = 1;
    LCRPWM_B.max_value = 10.0;
    LCRPWM_B.min_value = 0.0;
    LCRPWM_B.t_min_pulse = 0.001;
    LCRPWM_B.t_period = 0.01;
    /*Parametry PWM pro rizeni sekce A*/
    LCRPWM_C.enable = 1;
    LCRPWM_C.max_value = 10.0;
    LCRPWM_C.min_value = 0.0;
    LCRPWM_C.t_min_pulse = 0.001;
    LCRPWM_C.t_period = 0.01;
}

void _CYCLIC ZarovkyCyclic( void )
{

    /*Generovani PWM pulsu pro rizeni sekce A*/
    LCRPWM_A.x = Akcni_zasah_A;
    LCRPWM(&LCRPWM_A);
    Pulse_A = LCRPWM_A.pulse;
    /*Generovani PWM pulsu pro rizeni sekce B*/
    LCRPWM_B.x = Akcni_zasah_B;
    LCRPWM(&LCRPWM_B);
    Pulse_B = LCRPWM_B.pulse;
    /*Generovani PWM pulsu pro rizeni sekce C*/
    LCRPWM_C.x = Akcni_zasah_C;
    LCRPWM(&LCRPWM_C);
    Pulse_C = LCRPWM_C.pulse;
}
```

### A.3 Hlavní část programu Zarovky

```
void _INIT ZarovkyInit( void )
{
    /*Parametry PWM pro rizeni sekce A*/
    LCRPWM_A.enable = 1;
    LCRPWM_A.max_value = 10.0;
    LCRPWM_A.min_value = 0.0;
    LCRPWM_A.t_min_pulse = 0.001;
    LCRPWM_A.t_period = 0.01;
    /*Parametry PWM pro rizeni sekce B*/
    LCRPWM_B.enable = 1;
    LCRPWM_B.max_value = 10.0;
    LCRPWM_B.min_value = 0.0;
    LCRPWM_B.t_min_pulse = 0.001;
    LCRPWM_B.t_period = 0.01;
    /*Parametry PWM pro rizeni sekce A*/
    LCRPWM_C.enable = 1;
    LCRPWM_C.max_value = 10.0;
    LCRPWM_C.min_value = 0.0;
    LCRPWM_C.t_min_pulse = 0.001;
    LCRPWM_C.t_period = 0.01;
}

void _CYCLIC ZarovkyCyclic( void )
{
    /*Generovani PWM pulsu pro rizeni sekce A*/
    LCRPWM_A.x = Akcni_zasah_A;
    LCRPWM(&LCRPWM_A);
    Pulse_A = LCRPWM_A.pulse;
    /*Generovani PWM pulsu pro rizeni sekce B*/
    LCRPWM_B.x = Akcni_zasah_B;
    LCRPWM(&LCRPWM_B);
    Pulse_B = LCRPWM_B.pulse;
    /*Generovani PWM pulsu pro rizeni sekce C*/
    LCRPWM_C.x = Akcni_zasah_C;
    LCRPWM(&LCRPWM_C);
    Pulse_C = LCRPWM_C.pulse;
}
```

## Příloha B: Zdrojový kód pro identifikaci soustavy

### B.1 Soubor Identifikace.m

```
clc;
close all;

h_orig=norm_h1.signals.values;
n = numel(h_orig);
time=norm_h1.time;
p=tf('p');

% hledani casove konstanty soustavy
T = fminsearch(@nej_ctverce, [365],[], h_orig, time);
K=35.8;
% Tvar aproximované soustavy
Fs = K / ((T*p + 1));

aprox=step(Fs,time)
h_orig=h_orig+26;
aprox=aprox+26;
%Porovnání původního a aproximovaného průběhu
plot(time,h_orig);
hold on
plot(time,aprox,'r');
grid on
legend('Reálná soustava','Aproximovaná soustava');

xlabel('Čas [s]');
ylabel('Teplota [C]');
```

### B.2 Funkce nej\_ctverce.m

```
function f=sqr_area(param, h_orig, t)

p=tf('p')
h = step(35.8 / ((param(1)*p + 1)), t);
% Nejmensi ctverce
f = (h - h_orig)' * (h - h_orig);
```

## Příloha C: Obsah přiloženého CD

Součástí této práce je i přiložené CD s následujícími adresáři:

- **Text** - Elektronická verze dokumentu BP ve formátu PDF
- **PLC** - Projekt pro AS pro ovládání a vizualizaci procesu
- **Simulace** – Simulační model procesu pro Matlab Simulink