

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

**RIADENIE VYBRANÉHO TECHNOLOGICKÉHO PROCESU
V RIADIACOM SYSTÉME FOXBORO**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-28062

2010

Bc. Zuzana Jakubcová

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

**RIADENIE VYBRANÉHO TECHNOLOGICKÉHO PROCESU
V RIADIACOM SYSTÉME FOXBORO**

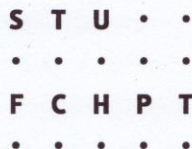
DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-28062

Študijný program:	automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Číslo a názov študijného odboru:	5.2.14 automatizácia
Školiace pracovisko:	Bratislava
Vedúci záverečnej práce/školiteľ:	Ing. Katarína Matejičková

Bratislava 2010

Bc. Zuzana Jakubcová



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študentka: **Bc. Zuzana Jakubcová**
ID študenta: 28062
Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Študijný odbor: 5.2.14 automatizácia
Vedúca práce: Ing. Katarína Vaneková
Miesto vypracovania: Bratislava

Názov práce: **Riadenie vybraného technologického procesu v riadiacom systéme
FOXBORO**

Špecifikácia zadania:

Vytvorenie modelu technologického procesu v ICC v riadiacom systéme FOXBORO. Vytvorenie užívateľských obrazoviek pre vytvorený proces. Využitie nástrojov priemyselného riadiaceho systému FOXBORO na riadenie modelu technologického procesu, programovanie bezpečnostných a riadiacich prvkov systému FOXBORO.

Rozsah práce: 65

Riešenie zadania práce od: 15. 02. 2010

Dátum odovzdania práce: 22. 05. 2010

Bc. Zuzana Jakubcová
Študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska



prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Garant študijného programu

Ďakujem vedúcej diplomovej práce
Ing. Kataríne Matejičkovej za pomoc pri
získavaní znalostí o priemyselnom riadiacom
systéme FOXBORO, ako aj za vedenie, cenné
rady a pripomienky, ktoré mi poskytla pri
vypracovaní diplomovej práce.

Súhrn

Diplomová práca sa zaoberá riadením sústavy dvoch výmenníkov tepla a to súprúdového rúrkového výmenníka tepla a výmenníka tepla s ohrevom za pomoci priemyselného riadiaceho systému FOXBORO. Riadenie je uskutočnené pomocou kaskádového riadenia s adaptívnym a bez adaptívneho regulátora.

V diplomovej práci je zahrnutý súčasný stav riešenia kaskádového a adaptívneho riadenia doma i v zahraničí a ciele práce. Časť metodika práce a metódy skúmania pozostáva z vytvorenia modelu sústavy výmenníkov tepla, návrhom regulátorov a zapojením príslušných regulátorov do kaskády ako aj pridanie adaptívneho regulátora. Taktiež sa zaoberá samotným riadiacim systémom FOXBORO, popisom použitých blokov a vizualizácie daného systému.

Kľúčové slová: riadiaci systém FOXBORO, súprúdový rúrkový výmenník tepla, výmenník tepla s ohrevom, kaskádové riadenie

Abstrakt

This thesis is focused on controlling system of two heat exchangers, tube heat exchanger and flow-heater by industrial control system FOXBORO. Control is accomplished by a cascade control with adaptive and without adaptive controller.

In this thesis is implied actual state of solving cascade and adaptive control and main goals of the work. The part methods of work and methods of investigations consists of creation model of system of two heat exchangers, projection of controllers and connection these controllers to cascade and connection of adaptive controller. In this thesis is also concerned with industrial control system FOXBORO, characterization of used compounds and visualization of given system.

Key words: control system FOXBORO, tube heat exchanger, flow-heater, cascade control

Obsah

Zoznam príloh.....	9
Zoznam symbolov, skratiek, značiek	10
Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek	11
Úvod.....	13
Súčasný stav riešenia kaskádového a adaptívneho riadenia doma i v zahraničí	14
Ciele práce	15
Metodika práce a metódy skúmania	16
1 Riadený systém	16
1.1 Tvorba modelu rúrkového výmenníka tepla – trojkapacitného, súprudového	18
1.1.1 Dynamický matematický model (DMM)	18
1.1.2 Matematický model rovnovážneho stavu (MMRS).....	20
1.2 Tvorba modelu výmenníka tepla s ohrevom – prietokový ohrievač.....	22
1.2.1 Dynamický matematický model	22
1.2.2 Matematický model rovnovážneho stavu	24
1.3 Identifikácia prenosu	24
1.3.1 Identifikácia súprudového výmenníka tepla	25
1.3.2 Identifikácia výmenníka tepla s ohrevom.....	25
1.4 Návrh regulátorov	26
1.4.1 Návrh PI regulátora	26
1.4.2 Návrh P regulátora	27
1.5 Kaskádové riadenie	28
1.6 Adaptívne riadenie	29
2 Riadiaci systém FOXBORO	31
2.1 Opis riadeného systému.....	31

2.1.1	Blok CALCA	31
2.1.2	Blok AIN	32
2.1.3	Blok PIDA	33
2.1.4	Blok FBTUNE	37
2.1.5	Prepojenie jednotlivých blokov	40
2.2	Vizualizácia	44
	Výsledky práce	51
	Záver	53
	Zoznam použitej literatúry	54
	Prílohy	55

Zoznam príloh

Príloha A	55
Príloha B.....	65
Príloha C.....	73
Príloha D	74

Zoznam symbolov, skratiek, značiek

ϑ	teplota média SVT, °C
\dot{m}	hmotnostný prietok média SVT, kg/h
ρ	hustota média výmenníkov, kg/m^3
C_p	tepelná vodivosť média výmenníkov, $J/kg/K$
D	priemer rúrky SVT, mm
λ	tepelná vodivosť rúrky SVT, $W/m/K$
l	dĺžka SVT, m
α	koeficient prestupu tepla prúdením SVT, $W/m^2/K$
ω	ohrev špirály VTSO, J
V	objem výmenníka VTSO, m^3
q	rýchlosť prúdenia výmenníkov, m^3/s
<i>index 1</i>	horúce médium SVT
<i>index 2</i>	stena (rúrka) SVT
<i>index 3</i>	studené médium SVT
<i>index v</i>	médium vstupujúce do VTSO
SVT	súprudový výmenník tepla
VTSO	výmenník tepla s ohrevom
DMM	dynamický matematický model
MMRS	matematický model rovnovážneho stavu
AIN	Analog Input Blok
CALCA	Advanced Calculator
PIDA	Advanced PID Blok
FBTUNE	Feedback Tuner
URO	Uzavretý regulačný obvod

Zoznam ilustrácií

Obr. 1	Riadený systém sústavy dvoch výmenníkov tepla.....	17
Obr. 2	Simulačná schéma spolu.mld.....	24
Obr. 3	Zapojenie do kaskády všeobecne	28
Obr. 4	Prepojenie regulátorov pri kaskádovom riadení pre riadený proces	29
Obr. 5	Zapojenie adaptívneho riadenia všeobecne	30
Obr. 6	Prepojenie pri adaptívnom riadení pre riadený proces	30
Obr. 7	Upravené rovnice pre AIN bloky pre 1. úsek	33
Obr. 8	Konfigurácia kaskádového riadenia vo FOXBORE	36
Obr. 9	Predladenie - prepnutie do manuálneho módu	38
Obr. 10	Zapnutie predladenia	39
Obr. 11	Adaptívne riadenie - prepočet konštánt.....	39
Obr. 12	Zapojenie adaptívneho riadenia všeobecne	40
Obr. 13	Prepojenie blokov vo FOXBORE	41
Obr. 14	Priebehy teplôt po skokovej zmene ohrevu	42
Obr. 15	Priebeh kaskádového riadenia.....	43
Obr. 16	Priebeh adaptívneho riadenia	43
Obr. 17	Porovnanie adaptívneho a štandardného riadenia	44
Obr. 18	Obrazovka na zadávanie parametrov SVT	46
Obr. 19	Vysvetlivky k obrazovke na zadávanie parametrov SVT	46
Obr. 20	Obrazovka na zadávanie parametrov VTSO	47
Obr. 21	Vysvetlivky k obrazovke na zadávanie parametrov VTSO.....	47
Obr. 22	Obrazovka riadenia systému dvoch výmenníkov tepla	48
Obr. 23	Vysvetlivky k obrazovke riadenia systém dvoch výmenníkov tepla	48
Obr. 24	Obrazovka pre pozorovanie riadenia.....	49
Obr. 25	Obrazovka sledovania teplôt.....	49
Obr. 26	Pozorovanie priebehu pre 1. Úsek	50
Obr. 27	Vysvetlivky k obrazovke na sledovanie teplôt	50

Zoznam tabuliek

Tab. 1	Parametre výmenníka tepla s ohrevom	16
Tab. 2	Parametre súprudového výmenníka tepla.....	17
Tab. 3	Ustálené stavy pre jednotlivé média a stenu.....	21

Úvod

FOXBORO je decentralizovaný riadiaci systém, ktorý spĺňa potreby automatizácie integrovaných systémov. Jeho úlohou je efektívne riadiť technologické procesy. FOXBORO I/A Series system je kombináciou flexibility, bezpečnosti a vysokej úrovne zosieťovania. Určiť najlepšiu stratégiu siete vzhľadom na informačné, riadiace požiadavky a ciele užívateľov umožňuje systém otvorenej architektúry a zabudovaných štandardov [1].

Diplomová práca sa zaoberá riadením sústavy dvoch výmenníkov tepla a to súprúdového rúrkového výmenníka tepla – trojkapacitného a výmenníka tepla s ohrevom pomocou priemyselného riadiaceho systému FOXBORO. Pričom riadenie sa uskutoční pomocou kaskádového a adaptívneho riadenia.

Výmenníky tepla majú za úlohu chladieť, alebo ohrievať materiálové prúdy na žiadanú teplotu. Ohrevným médiom bývajú najmä spaliny, vodná para, teplonosné kvapaliny, roztavené soli alebo kovy a technologické prúdy s vyššou entalpiou, ktoré sa ochladzujú. Chladiacim médiom býva najmä voda, vzduch, soľanka a technologické prúdy s nízkou entalpiou, ktoré sa ohrievajú. Medzi najrozšírenejšie výmenníky tepla patrí výmenník tepla typu rúrka v rúrke [2].

Prenos tepla je jednou z najzákladnejších a najlepšie pochopiteľných operácií v procesnom priemysle. Teplo môže byť prenášané medzi tými istými fázami (prenos kvapalina - kvapalina, plyn - plyn) alebo cez stenu (v prípade prúdového ohrievača) výmenníka tepla. Celkové teplo prenesené medzi horúcim a studeným médiom je závislé od celkového koeficientu prestupu tepla, plochy prestupu tepla a teplotného rozdielu[3].

Diplomová práca sa venuje samotnej tvorbe modelu sústavy dvoch výmenníkov tepla, ich identifikáciou a následným návrhom regulátorov pomocou klasických metód syntézy regulátora. Taktiež sa zaoberá samotným riadiacim systémom FOXBORO, opisom použitých blokov, ako aj vizualizáciou v prostredí FOXBORO.

Súčasný stav riešenia kaskádového a adaptívneho riadenia doma i v zahraničí

Na riadenie ohrievača alebo chladiča používame ventily, ktoré sú pripevnené k prítoku a k odtoku. Pričom pri riadení je rozdiel, či riadime ventil pred alebo za ohrievačom. Taktiež sa používajú trojcestné ventily. Tieto ventily limitujú, ktorá teplota procesu môže byť riadená. Pri týchto ventiloch je možné obchádzať dynamickú charakteristiku výmenníka tým, že ho čiastočne obídeme (spravíme bypass) a spojíme horúce médium so studeným médium. Pri tomto spôsobe sa zvýši odozva a ušetrí sa náklady [3].

Pri kaskádovom riadení kaskádové obvody pozostávajú z dvoch regulátorov v sérii. Pri výmenníkoch tepla hlavný regulátor (Master) zisťuje teplotu procesu a vedľajší regulátor (Slave) zisťuje premennú, ktorá môže zmeniť teplotu procesu. Kaskádové riadenie riadi len jednu teplotu a hlavný regulátor upravuje žiadanú hodnotu vedľajšieho regulátora tak aby dosiahol požadovanú hodnotu. Na to, aby bolo kaskádové riadenie úspešné musí byť vedľajší regulátor oveľa rýchlejší ako hlavný regulátor. Kaskádové obvody sú implementované na zabránenie vonkajších porúch [3].

Riadenie, ktoré sa prispôsobuje meniacim sa vlastnostiam riadeného procesu nazývame adaptívne spätnoväzbové riadenie. Realizujeme ho rôznymi spôsobmi, napríklad pomocou samonastavujúcich sa regulátorov. Takéto riadenie je založené na priebežnej identifikácii riadeného procesu. Toto riadenie používame kôli zmenám pracovných režimov, zmenám fyzikálnych vlastností procesov, eliminácii nemerateľných porúch, šumov a nemodelovaných dynamických vlastností procesov. Riadiaci systém sa skladá z dvoch uzavretých obvodov, v prvom sa skladá z riadeného systému a spätnoväzbového regulátora a v druhom sa uskutočňuje nastavovanie parametrov regulátora pomocou priebežného odhadu parametrov modelu [4].

Ciele práce

Hlavným cieľom diplomovej práce je:

- riadiť vybraný technologický proces pomocou riadiaceho systému FOXBORO, technologický proces predstavuje sústava dvoch výmenníkov tepla

Vedľajším cieľom diplomovej práce je:

- navrhnuť dva regulátory, každý pre jeden proces
- zapojiť navrhnuté regulátory do kaskády
- zmeniť jeden regulátor v kaskáde na adaptívny
- porovnať kaskádové riadenie s adaptívnym a bez adaptívneho regulátora
- implementovať vyššie uvedené body do riadiaceho systému FOXBORO
- navrhnuť vizualizáciu daného systému

Metodika práce a metody skúmania

1 Riadený systém

Riadený systém predstavuje sústavu dvoch výmenníkov tepla. Ide o trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla typu rúrka v rúrke, ku ktorému je pripojený výmenník tepla s ohrevom (prietokový ohrievač) (obr. 1).

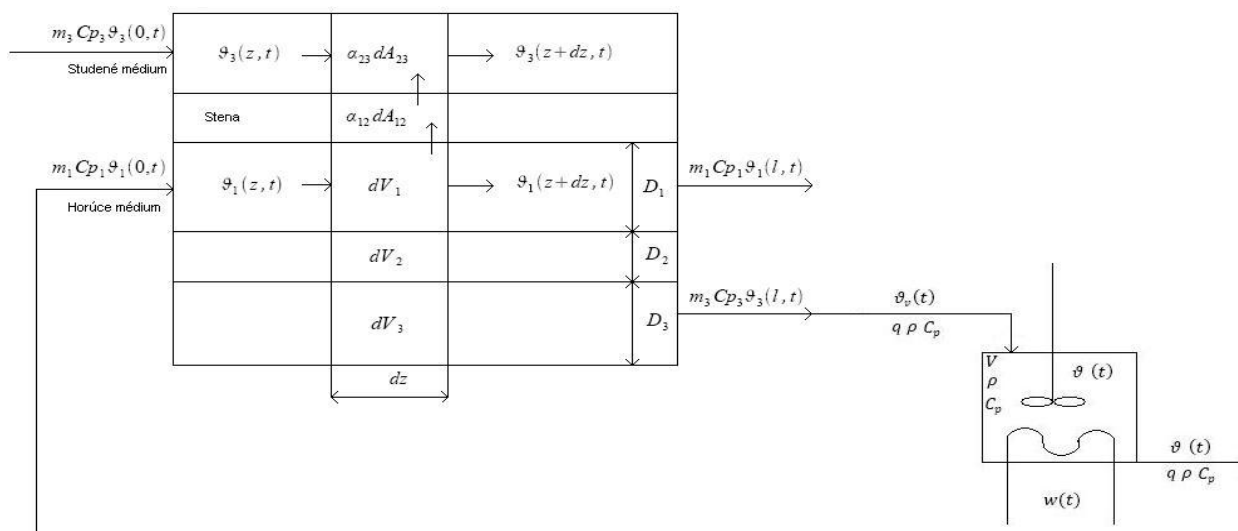
V prípade súprudového rúrkového výmenníka tepla (SVT) ide o výmenu tepla medzi vodou a petrolejom. Pričom petrolej (studené médium) je ohrievaný vodou (horúce médium). Vstupné veličiny sú teplota studeného ϑ_3 a horúceho ϑ_1 média. Konštantnými veličinami sú hmotnostný prietok horúceho \dot{m}_1 a studeného \dot{m}_3 média, špecifická tepelná kapacita horúceho C_{p1} a studeného C_{p3} média, hustota studeného ρ_3 a horúceho ρ_1 média, priemery rúrky D_1 , D_2 , D_3 , tepelná vodivosť rúrky λ , hustota rúrky ρ_2 a špecifická tepelná kapacita rúrky C_{p2} , koeficient prestupu tepla prúdením zo steny výmenníka do petroleja α_{23} a z vody do steny výmenníka α_{12} . Výmenník je dokonale izolovaný.

V prípade výmenníka tepla s ohrevom (VTSO) sa špirálou ohrieva ochladená voda (horúce médium), ktorá prúdi zo súprudového rúrkového výmenníka tepla. Vstupné veličiny sú teplota vody ϑ_v a ohrev špirály ω . Konštantnými veličinami sú objem výmenníka V , rýchlosť prúdenia vody q , hustota vody ρ a tepelná vodivosť vody C_p . Výstupnou veličinou je ohriate horúce médium, ktoré sa spätne napája ako vstupujúce horúce médium do SVT.

Parametre jednotlivých výmenníkov tepla sú uvedené v tab.1 a tab.2.

Tab. 1 Parametre výmenníka tepla s ohrevom

Názov	Hodnota
ϑ_v [°C]	51.33
ω [J]	11012
V [m ³]	0.0049
q [m ³ /s]	0.0001138
ρ [kg/m ³]	974.8
C_p [J/kg/K]	4190



Obr. 1 Riadený systém sústavy dvoch výmenníkov tepla

Tab. 2 Parametre súprudového výmenníka tepla

Názov	Hodnota
Horúce médium – VODA	
ϑ_1 [°C]	75
\dot{m}_1 [kg/h]	400
ρ_1 [kg/m ³]	974.8
C_{p1} [J/kg/K]	4190
D_1 [mm]	25
Studené médium - PETROLEJ	
ϑ_3 [°C]	20
\dot{m}_3 [kg/h]	1100
ρ_3 [kg/m ³]	810
C_{p3} [J/kg/K]	2100
D_3 [mm]	50
Stena	
λ [W/m/K]	395
ρ_2 [kg/m ³]	8930
C_{p2} [J/kg/K]	385
D_2 [mm]	28
l [m]	10
α_{12} [W/m ² /K]	1480
α_{23} [W/m ² /K]	750

1.1 Tvorba modelu rúrkového výmenníka tepla – trojkapacitného, súprudového

Trojkapacitný súprudový výmenník tepla som opísala pomocou dynamického matematického modelu.

1.1.1 Dynamický matematický model (DMM)

Dynamický matematický model som odvodila z entalpických bilancií za týchto zjednodušujúcich predpokladov [5]:

- systém nekoná prácu → energetická bilancia sa mení na entalpickú
- konštantný tlak v systéme → zmena entalpie sa rovná zmene tepla → entalpická bilancia sa mení na tepelnú
- dokonale izolovaný výmenník tepla → straty tepla do okolia sú zanedbateľné
- prestup tepla (prúdením) sa uskutočňuje len v smere kolmom na smer prúdenia kvapaliny → zanedbáva sa vedenie a žiarenie tepla v kvapaline
- vlastnosti prietokového toku kvapalín sa menia v dynamickom stave len v smere toku kvapalín (z) a v čase (t), DMM sa získava bilanciou elementu systému
- tepelnú kapacitu steny vonkajšej rúrky je zanedbaná

Znenie entalpickej bilancie elementu systému s prestupom tepla:

„Tepelné toky do elementu systému vstupujúce sa rovnajú tepelným tokom z elementu systému vystupujúce plus rýchlosť akumulácie tepla v elemente systému.“ [5]

DMM systému je opísaný lineárnymi parciálnymi diferenciálnymi rovnicami [6]:

- horúce médium (voda)

$$q_1 \rho_1 C_{p1} \vartheta_1(z, t) = q_1 \rho_1 C_{p1} \left[\vartheta_1(z, t) + \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial z} dz \right] \alpha_{12} dA_{12} [\vartheta_1(z, t) - \vartheta_2(z, t)] + \frac{\partial [dV_1 \rho_1 C_{p1} \vartheta_1(z, t)]}{\partial t} \quad (1)$$

začiatočná podmienka: $\vartheta_1(z, t_0 = 0) = \vartheta_1(z, 0) = \vartheta_1^s(z)$

okrajová podmienka: $\vartheta_1(z = 0, t) = \vartheta_1(0, t) = \vartheta_{10}(t)$

- stena vnútornej rúrky

$$\alpha_{12} dA_{12} [\vartheta_1(z, t) - \vartheta_2(z, t)] = \alpha_{23} dA_{23} [\vartheta_2(z, t) - \vartheta_3(z, t)] + \frac{\partial [dV_2 \rho_2 c_{p2} \vartheta_2(z, t)]}{\partial t} \quad (2)$$

začiatková podmienka: $\vartheta_2(z, t_0 = 0) = \vartheta_2(z, 0) = \vartheta_2^s(z)$

- studené médium

$$q_3 \rho_3 c_{p3} \vartheta_3(z, t) + \alpha_{23} dA_{23} [\vartheta_2(z, t) - \vartheta_3(z, t)] = q_3 \rho_3 c_{p3} \left[\vartheta_3(z, t) + \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial z} dz \right] + \frac{\partial [dV_3 \rho_3 c_{p3} \vartheta_3(z, t)]}{\partial t} \quad (3)$$

začiatková podmienka: $\vartheta_3(z, t_0 = 0) = \vartheta_3(z, 0) = \vartheta_3^s(z)$

okrajová podmienka: $\vartheta_3(z = 0, t) = \vartheta_3(0, t) = \vartheta_{30}(t)$

DMM má tvar lineárneho stavového opisu so spojito rozloženými parametrami a nemulovými začiatkovými podmienkami, pričom [6]:

- stavové veličiny: $\vartheta_1(z, t), \vartheta_2(z, t), \vartheta_3(z, t)$
- vstupné veličiny: $\vartheta_{10}(t), \vartheta_{30}(t)$
- výstupné veličiny: $\vartheta_1(z, t), \vartheta_3(z, t)$

Rovnice DMM (1) až (3) som upravila a zadefinovala časové konštanty, rýchlosti prúdenia a zosilnenia. DMM má po úprave tvar [6]:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial t} + T_1 w_1 \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial z} &= -\vartheta_1(z, t) + \vartheta_2(z, t) \\ T_2 \frac{\partial \vartheta_2(z, t)}{\partial t} &= Z_{21} \vartheta_1(z, t) - \vartheta_2(z, t) + Z_{23} \vartheta_3(z, t) \\ T_3 \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial t} + T_3 w_3 \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial z} &= -\vartheta_3(z, t) + \vartheta_2(z, t) \end{aligned} \quad (4)$$

podmienky pre horúce médium: $\vartheta_1(z, 0) = \vartheta_1^s(z) \quad \vartheta_1(0, t) = \vartheta_{10}(t)$

podmienka pre stenu: $\vartheta_2(z, 0) = \vartheta_2^s(z)$

podmienky pre studené médium: $\vartheta_3(z, 0) = \vartheta_3^s(z)$ $\vartheta_3(0, t) = \vartheta_{30}(t)$

pričom časové konštanty sú definované ako [6]:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{dV_1 \rho_1 C_{p1}}{\alpha_{12} dA_{12}} = \frac{\rho_1 C_{p1} D_1}{4\alpha_{12}} = 0.28 \text{ min} \\ T_2 &= \frac{dV_2 \rho_2 C_{p2}}{\alpha_{12} dA_{12} + \alpha_{23} dA_{23}} = \frac{\rho_2 C_{p2} [D_2^2 - D_1^2]}{4\alpha_{12} D_1 + 4\alpha_{23} D_2} = 0.039 \text{ min} \\ T_3 &= \frac{dV_3 \rho_3 C_{p3}}{\alpha_{23} dA_{23}} = \frac{\rho_3 C_{p3} [D_3^2 - D_2^2]}{4\alpha_{23} D_2} = 0.57 \text{ min} \end{aligned} \quad (5)$$

rýchlosti prúdenia sú definované ako [6]:

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{q_1}{S_1} = \frac{4m_1}{\rho_1 D_1^2 \pi} = 13.93 \text{ m/min} \\ w_3 &= \frac{q_3}{S_3} = \frac{4m_3}{\rho_3 [D_3^2 - D_2^2] \pi} = 16.79 \text{ m/min} \end{aligned} \quad (6)$$

a zosilnenia sú definované ako [6]:

$$\begin{aligned} Z_{21} &= \frac{\alpha_{12} dA_{12}}{\alpha_{12} dA_{12} + \alpha_{23} dA_{23}} = \frac{\alpha_{12} D_1}{\alpha_{12} D_1 + \alpha_{23} D_2} = 0.63 \\ Z_{23} &= \frac{\alpha_{23} dA_{23}}{\alpha_{12} dA_{12} + \alpha_{23} dA_{23}} = \frac{\alpha_{23} D_2}{\alpha_{12} D_1 + \alpha_{23} D_2} = 0.36 \end{aligned} \quad (7)$$

1.1.2 Matematický model rovnovážneho stavu (MMRS)

Model rovnovážneho stavu systému je opísaný dvoma lineárnymi diferenciálnymi rovnicami a jednou algebrickou.

$$\begin{aligned} T_1 w_1 \frac{d\vartheta_1^s(z)}{dz} &= -\vartheta_1^s(z) + \vartheta_2^s(z) \quad \vartheta_1(z, 0) = \vartheta_1^s(z) \\ 0 &= Z_{21} \vartheta_1^s(z) - \vartheta_2^s(z) + Z_{23} \vartheta_3^s(z) \\ T_3 w_3 \frac{d\vartheta_3^s(z)}{dz} &= -\vartheta_3^s(z) + \vartheta_2^s(z) \quad \vartheta_3(z, 0) = \vartheta_3^s(z) \end{aligned} \quad (8)$$

Rovnovážny stav som riešila diskretizáciou. Diskretizácia je rozdelenie výmenníka na n -úsekov a náhrada derivácie v MMRS spätnou diferenciou. Výmenník som rozdelila na 5 úsekov.

$$\begin{aligned}\frac{d\vartheta_1^s(z)}{dz} &\approx \frac{\vartheta_1^s(z_i) - \vartheta_1^s(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} = \frac{\vartheta_{1,i}^s - \vartheta_{1,i-1}^s}{\Delta z} \\ \frac{d\vartheta_3^s(z)}{dz} &\approx \frac{\vartheta_3^s(z_i) - \vartheta_3^s(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} = \frac{\vartheta_{3,i}^s - \vartheta_{3,i-1}^s}{\Delta z}\end{aligned}\quad (9)$$

Po dosadení rovníc (9) do MMRS (8) a po úprave a definovaní konštánt dostaneme MMRS pre i -tý úsek:

$$\begin{aligned}\vartheta_{1,i}^s &= \frac{b_1}{a_1} \vartheta_{1,i-1}^s + \frac{1}{a_1} \vartheta_{2,i}^s \\ 0 &= Z_{21} \vartheta_{1,i}^s - \vartheta_{2,i}^s + Z_{23} \vartheta_{3,i}^s \quad i = 1, \dots, n \\ \vartheta_{3,i}^s &= \frac{b_3}{a_3} \vartheta_{3,i-1}^s + \frac{1}{a_3} \vartheta_{2,i}^s\end{aligned}\quad (10)$$

kde

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{T_1 w_1}{\Delta z} + 1, \quad a_3 = \frac{T_3 w_3}{\Delta z} + 1 \\ b_1 &= \frac{T_1 w_1}{\Delta z}, \quad b_3 = \frac{T_3 w_3}{\Delta z}\end{aligned}\quad (11)$$

V MATLABe som vytvorila m-file na výpočet ustálených stavov pre jednotlivé teploty a úseky. Ich hodnoty sú uvedené v (tab.3).

Tab. 3 Ustálené stavy pre jednotlivé média a stenu

dĺžka (m)	0	2	4	6	8	10
ϑ_1 (°C)	75	67.42	61.64	57.24	53.88	51.32
ϑ_2 (°C)		52.24	50.07	48.42	47.16	46.20
ϑ_3 (°C)	20	25.49	29.69	32.88	35.32	37.17

Aby sme mohli sledovať dynamiku výmenníka je potrebné diskretizovať DMM. Treba nahradiť derivácie spätnou diferenciou.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \vartheta_1(z,t)}{\partial z} &\approx \frac{\vartheta_1(z_i,t) - \vartheta_1(z_{i-1},t)}{z_i - z_{i-1}} = \frac{\vartheta_{1,i} - \vartheta_{1,i-1}}{\Delta z} \\ \frac{\partial \vartheta_3(z,t)}{\partial z} &\approx \frac{\vartheta_3(z_i,t) - \vartheta_3(z_{i-1},t)}{z_i - z_{i-1}} = \frac{\vartheta_{3,i} - \vartheta_{3,i-1}}{\Delta z}\end{aligned}\quad (12)$$

Po dosadení rovníc (12) do DMM (4) a použítí zadefinovaných konštánt a_1, b_1, a_3, b_3 (11) dostaneme pre i-tý úsek:

$$\begin{aligned}\frac{d \vartheta_{1,i}(t)}{dt} &= \frac{-a_1}{T_1} \vartheta_{1,i}(t) + \frac{b_1}{T_1} \vartheta_{1,i-1}(t) + \frac{1}{T_1} \vartheta_{2,i}(t) \quad \vartheta_{1,i}(t=0) = \vartheta_{1,i}(0) = \vartheta_{1,i}^s \\ \frac{d \vartheta_{2,i}(t)}{dt} &= \frac{Z_{21}}{T_2} \vartheta_{1,i}(t) + \frac{1}{T_2} \vartheta_{2,i}(t) + \frac{Z_{23}}{T_2} \vartheta_{3,i}(t) \quad i = 1, \dots, n \\ \frac{d \vartheta_{3,i}(t)}{dt} &= \frac{-a_3}{T_3} \vartheta_{3,i}(t) + \frac{b_3}{T_3} \vartheta_{3,i-1}(t) + \frac{1}{T_3} \vartheta_{2,i}(t) \quad \vartheta_{3,i}(t=0) = \vartheta_{3,i}(0) = \vartheta_{3,i}^s\end{aligned}\quad (13)$$

veličiny pre i-tý úsek:

- vstupné: $\vartheta_{1,i-1}(t), \vartheta_{3,i-1}(t)$
- stavové: $\vartheta_{1,i}(t), \vartheta_{2,i}(t), \vartheta_{3,i}(t)$
- výstupné: $\vartheta_{1,i}(t), \vartheta_{3,i}(t)$

Podrobné vypracovanie tvorby modelu SVT, ako aj overenie modelu som opísala v svojej predchádzajúcej práci: Tvorba modelu trojkapacitného výmenníka tepla riadiacim systémom FOXBORO [7].

1.2 Tvorba modelu výmenníka tepla s ohrevom – prietokový ohrievač

1.2.1 Dynamický matematický model

Dynamický matematický model výmenníka tepla s ohrevom som odvodila z entalpickej bilancie za týchto zjednodušujúcich predpokladov [8]:

- tepelné kapacity stien výmenníka tepla sú zanedbané
- straty tepla do okolia sú zanedbané (výmenník je dokonale izolovaný)

- kvapalina vo výmenníku je dokonale premiešavaná
- konštantný prietok ohrievanej kvapaliny
- konštantné parametre

Znenie entalpickej bilancie dynamického systému [8]:

„Súčet vstupujúcich tepelných tokov sa rovná súčtu vystupujúcich tepelných tokov plus rýchlosť akumulácie tepla v systéme.“

DMM výmenníka tepla s ohrevom je opísaný jednou lineárnou diferenciálnou rovnicou [9]:

$$q\rho C_p \vartheta_v(t) + \omega(t) = q\rho C_p \vartheta(t) + V\rho C_p \frac{d\vartheta(t)}{dt} \quad (14)$$

začiatočná podmienka: $\vartheta(0) = \vartheta_0 = \vartheta^s$

DMM výmenníka tepla z ohrevom má tvar lineárneho stavového opisu s nenulovými začiatočnými podmienkami, kde:

- stavová veličina: $\vartheta(t)$
- vstupná poruchová veličina: $\vartheta_v(t)$
- vstupná riadiaca veličina: $\omega(t)$
- výstupná veličina: $\vartheta(t)$

DMM (14) som upravila a zadefinovala časovú konštantu a zosilnenie. DMM má po úprave tvar:

$$\vartheta_v(t) + Z\omega(t) = \vartheta(t) + T \frac{d\vartheta(t)}{dt} \quad \vartheta(0) = \vartheta^s \quad (15)$$

kde časová konštanta má tvar:

$$T = \frac{V}{q} = 0.72 \text{ min} \quad (16)$$

a zosilnenie má tvar:

$$Z = \frac{1}{q\rho C_p} = 0.0021 \quad (17)$$

1.2.2 Matematický model rovnovážneho stavu

Matematický model rovnovážneho stavu výmenníka tepla s ohrevom má tvar

$$\vartheta_v^s + Z\omega^s = \vartheta^s + T \frac{d\vartheta^s}{dt} \quad (18)$$

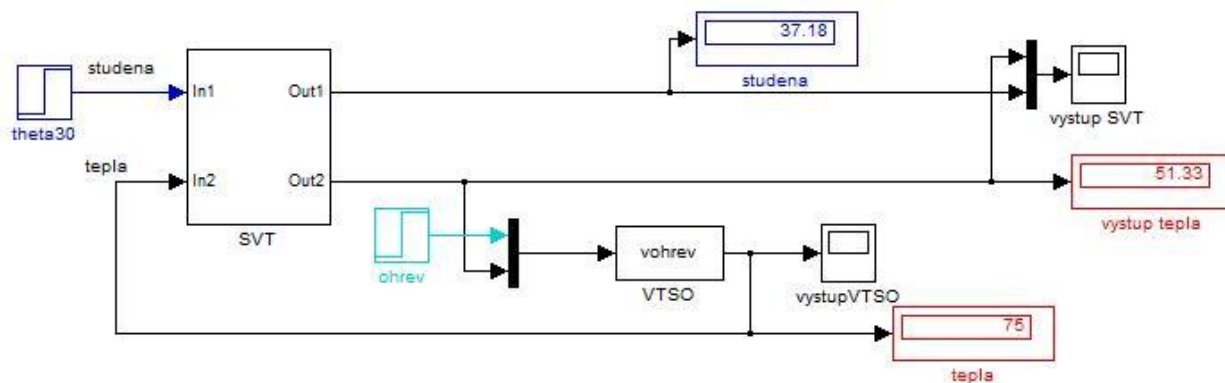
Po úprave viem vypočítať hodnotu teploty na výstupe

$$\vartheta_v^s + Z\omega^s = \vartheta^s \quad (19)$$

Potom ustálená vystupujúca teplota má hodnotu:

$$\vartheta^s = 75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20)$$

Dynamiccké vlastnosti sústavy dvoch výmenníkov tepla som sledovala pomocou vytvorenej simulinkovej schémy *spolu.mdl* (obr. 2). Schému som vytvorila pomocou s-funkcií.



Obr. 2 Simulačná schéma spolu.mdl

1.3 Identifikácia prenosu

Pri návrhu regulátora je potrebné poznať prenos systému. Získame ho identifikáciou namodelovaného systému alebo odvodením lineárneho odchylkového modelu.

1.3.1 Identifikácia súprudového výmenníka tepla

Pomocou vytvorenej schémy v MATLAbe *schema1.mdl* som získala prechodovú charakteristiku studeného média po skokovej zmene horúceho média. Táto schéma je vytvorená pomocou s-funkcie pre celý systém ako celok. Zvolila som identifikáciu 1. rádom, pretože vykreslený priebeh zodpovedal priebehu 1. rádu.

Podrobné vypracovanie identifikácie SVT, ako aj porovnanie modelov som opísala vo svojej predchádzajúcej práci: Riadenie trojkapacitného výmenníka tepla riadiacim systémom FOXBORO [10].

Výsledný prenos má tvar:

$$G_s = \frac{Z}{T_s + 1} = \frac{1.568}{9.547s + 1} \quad (21)$$

1.3.2 Identifikácia výmenníka tepla s ohrevom

Na identifikáciu prenosu som použila lineárny odchýlkový model, ktorý som odvodila z rovníc (15), (18). A to tak, že neodchýlkové veličiny sa priamo nahradia odchýlkovými.

Definovanie odchýlkových veličín:

- vstupná riadiaca: $u_1 = \omega(t) - \omega^s$
- vstupná poruchová: $u_2 = \vartheta_v(t) - \vartheta_v^s$
- výstupné: $x(t) = \vartheta(t) - \vartheta^s$
- stavové: $x(t) = \vartheta(t) - \vartheta^s$

potom lineárny odchýlkový model bude mať tvar:

$$u_1(t) + Zu_2(t) = x(t) + T \frac{dx(t)}{dt} \quad x(0) = 0 \quad (22)$$

Prenosy pre VTSO som získala Laplaceovou transformáciou rovnice (22), pričom zanedbávam raz $u_1(t)$ a raz $u_2(t)$. Prenosy budú mať tvar:

$$G_{V1} = \frac{X}{U_1} = \frac{Z}{Ts+1} = \frac{0.002151}{0.7244 s+1} \quad (23)$$

$$G_{V2} = \frac{X}{U_2} = \frac{1}{Ts+1} = \frac{1}{0.7244 s+1} \quad (24)$$

1.4 Návrh regulátorov

Regulátor navrhujeme na základe správania sa uzavretého regulačného obvodu, ktorý vznikne pripojením navrhnutého regulátora k riadenému systému [11].

Keďže mám sústavu dvoch výmenníkov tepla navrhla som dva regulátory, ktoré som následne zapojila do kaskády.

1.4.1 Návrh PI regulátora

Pri riadení SVT som použila PI regulátor. Tento regulátor predstavuje hlavný regulátor pri kaskádovom riadení.

Pri SVT riadim výstupné studené médium na základe vstupujúceho horúceho média.

PI regulátor som navrhla Strejcovou metódou syntézy regulátora. Pri tejto metóde vyhodnocujeme odmeranú odozvu riadeného systému vzhľadom na skokovú zmenu vstupnej veličiny s následnou identifikáciou prenosu Strejcovou metódou [12].

Proporcionálnu a integračnú zložku PI regulátora som vypočítala podľa vzorca, pričom som zadala zosilnenie a časovú konštantu z prenosu (21) a pre $n=2$.

$$Z_R = \frac{(n+2)}{Z^4 (n-1)} = 0.63$$

$$T_i = \frac{T(n+2)}{3} = 12.73 \text{ min} \quad (25)$$

1.4.2 Návrh P regulátora

Pri riadení VTSO som použila P regulátor. Tento regulátor predstavuje vedľajší regulátor pri kaskádovom riadení.

Pri VTSO riadim výstupné horúce médium na základe ohrevu špirály.

P regulátor som navrhla metódou umiestnenia pólov, ktorá nanúti charakteristickej rovnici URO určité póly, čím sa predurčí dynamické správanie URO. Póly charakteristickej rovnice musia byť záporné čísla, ktoré vhodne zvolíme. Spravidla sa určujú naľavo od koreňov menovateľa prenosu [12].

Prenos P regulátora má tvar:

$$G_R = Z_R \quad (26)$$

Pri návrhu P regulátora metódou umiestnenia pólov je nutné použiť charakteristickú rovnicu (28) a charakteristickú rovnicu URO (29). Menovateľ prenosu (23) má koreň rovný -1.3804 preto som zvolila pól -4 . Následne som rovnice (28), (29) porovnala a získala som proporcionálnu zložku regulátora (30).

$$1 + G_R(s)G_S(s) = 0 \quad (27)$$

$$s + \frac{1+0.002151 Z_R}{0.7244} = 0 \quad (28)$$

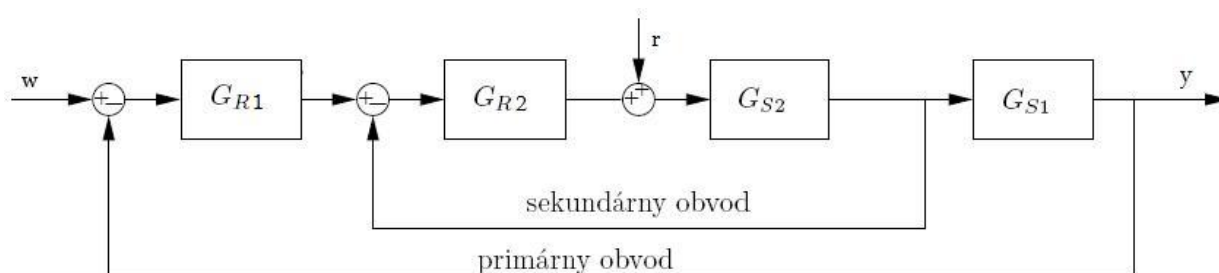
$$(s - s_1) = s + 4 \quad (29)$$

$$Z_R = 882.70 \quad (30)$$

1.5 Kaskádové riadenie

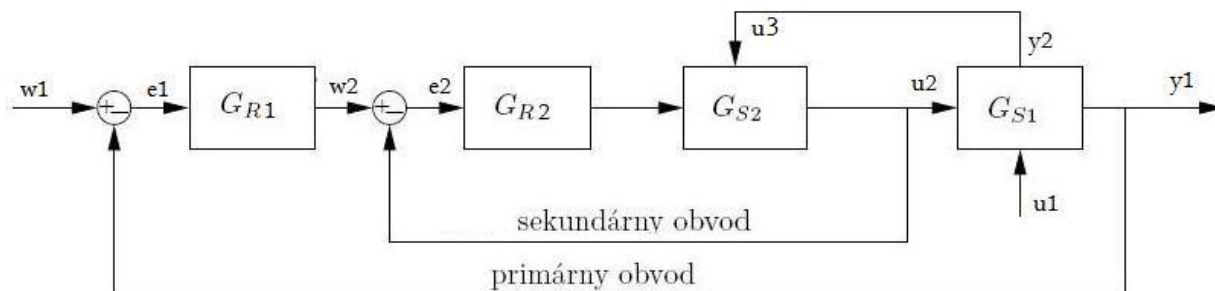
Pri kaskádovom riadení máme k dispozícii viac ako jeden meraný vstup a len jednu akčnú veličinu [13]. Bloková schéma zapojenia do kaskády je znázornená na obr. 3.

Pri kaskádovom riadení máme zapojené dva regulátory za sebou, pričom výstup z prvého regulátora je vstupom do druhého regulátora. URO má dva obvody primárny a sekundárny obvod. Primárny obvod predstavuje hlavný (master) regulátor G_{R1} a systém G_{S1} . sekundárny obvod predstavuje vedľajší (slave) regulátor G_{R2} a systém G_{S2} . Pričom výstup zo systému G_{S2} je vstupom do systému G_{S1} . w predstavuje žiadanú hodnotu, y predstavuje riadený výstup a r predstavuje poruchu vstupujúcu do merania.



Obr. 3 Zapojenie do kaskády všeobecne

V mojom prípade w_1 predstavuje žiadanú hodnotu studeného média, systém G_{S2} predstavuje výmenník tepla s ohrevom a systém G_{S1} súprudový výmenník tepla. y_1 predstavuje riadený výstup studeného média a u_3 vstupnú poruchovú veličinu VTSO, ktorá je napojená na výstup horúceho média z SVT. e_1 predstavuje regulačnú odchýlku pre primárny obvod, e_2 regulačnú odchýlku pre sekundárny obvod, w_2 pomocnú žiadanú veličinu, u_1 vstupujúce studené médium a y_2 vystupujúce horúce médium. Hlavný regulátor G_{R1} som zvolila ako PI regulátor a pomocný G_{R2} regulátor som zvolila ako P regulátor. Bloková schéma prepojenia regulátorov pri kaskádovom riadení je na obr. 4.



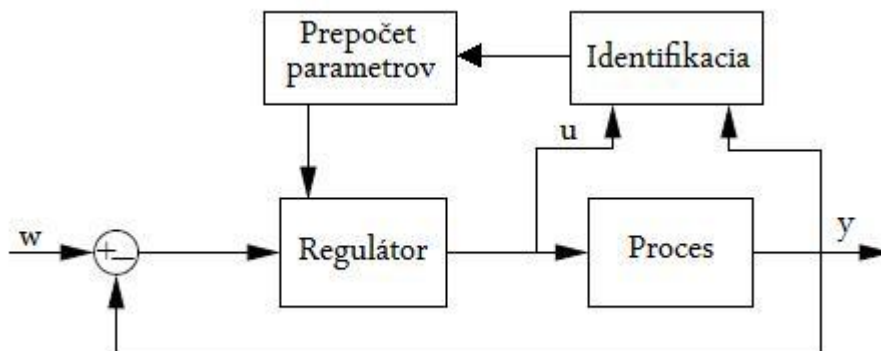
Obr. 4 Prepojenie regulátorov pri kaskádovom riadení pre riadený proces

1.6 Adaptívne riadenie

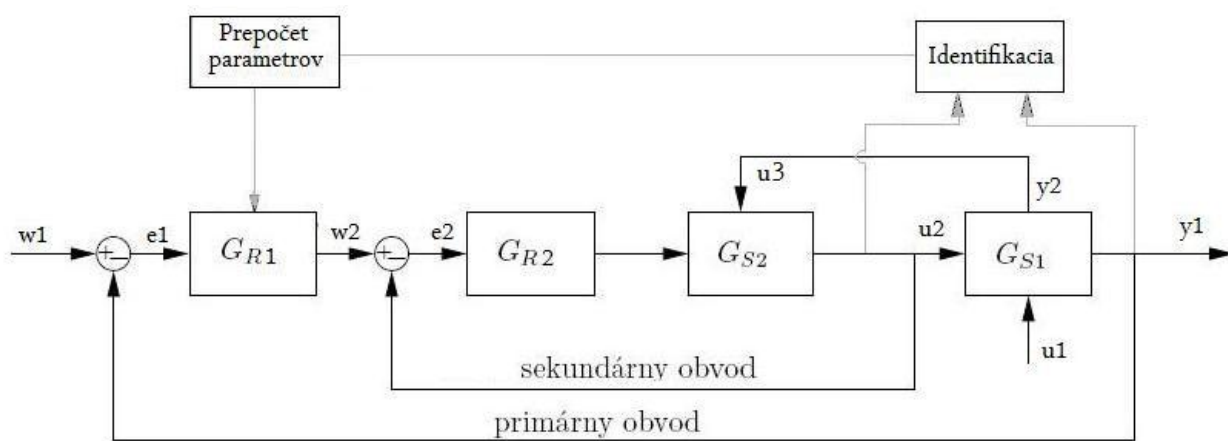
Adaptívne spätnoväzbové riadenie procesov sa prispôsobuje meniacim sa vlastnostiam riadeného procesu. Adaptívny riadiaci systém mení parametre alebo štruktúru regulátora na základe zmien v parametroch alebo štruktúre riadeného systému, tak, aby sa systém optimálne správal na základe kritéria nezávisle od zmien, ktoré môžu nastať [14]. Môžeme ho realizovať rôznymi spôsobmi. Ja som použila self-tuning riadenie (riadenie pomocou samonastavujúcich sa parametrov).

Self-tuning adaptívne riadenie má spravidla dve slučky vnútornú a vonkajšiu. Vnútnú predstavuje lineárny spätnoväzbový regulátor s parametrami meniacimi sa v čase a vnútornú predstavuje identifikácia a následný odhad parametrov [14]. Na obr. 5 je znázornené všeobecné pripojenie adaptívneho regulátora.

V mojom prípade sa uskutočňuje identifikácia systému G_{S1} , následne sa vypočítavajú nové parametre a tie sa posielajú do hlavného PI regulátora. Blokova schéma prepojenia pri adaptívnom riadení je na obr. 6.



Obr. 5 Zapojenie adaptívneho riadenia všeobecne



Obr. 6 Prepojenie pri adaptívnom riadení pre riadený proces

2 Riadiaci systém FOXBORO

FOXBORO je decentralizovaný riadiaci systém. Zabezpečuje riadenie procesov, ktoré vyžadujú nepretržitú prevádzku a dokonalú bezpečnosť. FOXBORO sa skladá z viacerých častí [15]. Pracovala som s týmito časťami:

- ICC - je integrovaný riadiaci konfigurátor. V tomto prostredí sa uskutočňuje programovanie riadiaceho systému
- FoxDraw - je grafický editor, ktorý slúži na tvorbu vizualizácie riadených procesov
- FoxView - je rozhraním medzi procesom a užívateľom
- FoxSelect - slúži na zobrazenie compoundov a blokov spolu so zobrazením ich stavov. Umožňuje zapnutie a vypnutie compoundov a ich blokov
- AIM AT -umožňuje archiváciu sledovaných údajov v čase. Údaje sa môžu exportovať vo formáte .txt a tak ich môžeme ďalej spracovať

2.1 Opis riadeného systému

Pre vytvorenie riadeného procesu v prostredí ICC som použila bloky AIN a CALCA, PIDA pre regulátory a blok FFTUNE pre adaptívne riadenie.

2.1.1 Blok CALCA

Prostredníctvom bloku CALCA (Advanced Calculator) sa uskutočňujú logické funkcie a aritmetické výpočty. Pracuje ako väčšina programovateľných kalkulačiek. Výpočet programu je definovaný ako jednoduchý postupný výpočet v každom kroku programu. Každý krok programu obsahuje operačný kód, ktorý identifikuje, aká operácia má byť použitá [15].

Bloky CALCA som použila na prepočet vstupných parametrov na minúty, na výpočet časových konštánt, rýchlosti prúdenia, zosilnení a na spočítavanie vystupujúcich teplôt z blokov AIN.

Názvy blokov pre jednotlivé výpočty:

- KONT1T2 - výpočet T_1 a T_2 podľa vzťahu (5)
- KONZ21Z23T3 - výpočet Z_{21} , Z_{23} a T_3 podľa vzťahov (5), (7)
- KONW1W3 - výpočet w_1 a w_2 podľa vzťahu (6)
- KONSTANTY1 - výpočet $\frac{b_1}{a_1}$, $\frac{1}{a_1}$ a $\frac{T_1}{a_1}$ podľa vzťahu (11)
- KONSTANTY2 - výpočet $\frac{b_3}{a_3}$, $\frac{1}{a_3}$ a $\frac{T_3}{a_3}$ podľa vzťahu (11)
- SCITANIE1 Až SCITANIE5 - pre sčítanie vystupujúcich teplôt z blokov AIN
- PREPOCET1 - pre prepočet C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} a α_{12} na minúty
- PREPOCET2 - pre prepočet m_1 , m_2 a α_{23} na minúty
- KONOHEV - pre výpočet časovej konštanty a zosilnenia podľa vzorcov (16), (17)

Presné nastavenia jednotlivých parametrov som uviedla v Prílohe A.

2.1.2 Blok AIN

Blok AIN (Analog Input Block) slúži na prijímanie vstupnej hodnoty a na jej konvertovanie do vhodnej formy, ktorá sa následne použije v riadiacej stratégii I/A Series. Vstup do bloku predstavuje digitalizovaný údaj a výstup predstavuje hodnota vyjadrená v inžinierskych jednotkách [15].

Blok AIN spracováva hodnoty z prenosov, preto bolo potrebné rovnice SVT (13) upraviť do tvaru prenosovej funkcie pre jednotlivé úseky (obr. 7). Úprava rovníc pre 2. až 5. úsek je totožná. Menia sa len teploty jednotlivých vstupov a výstupov.

Pre VTSO som použila rovnice (23), (24), ktoré sú taktiež vyjadrené pomocou prenosov.

Názvy blokov pre jednotlivé prenosy:

- USEK1HORUCA1 až USEK5HORUCA1 podľa prenosu G_{H1}
- USEK1HORUCA2 až USEK5HORUCA2 podľa prenosu G_{H2}
- USEK1STENA1 až USEK5STENA1 podľa prenosu G_{STE1}

- USEK1STENA2 až USEK5STENA2 podľa prenosu G_{STE2}
- USEK1STUDENA1 až USEK5STUDENA1 podľa prenosu G_{STU1}
- USEK1STUDENA2 až USEK5STUDENA2 podľa prenosu G_{STU2}
- OHREV1 – pre rovnicu (24)
- OHREV2 – pre rovnicu (23)

Presné nastavenia jednotlivých parametrov som uviedla v Prílohe B.

$$\vartheta_{1,1}(t) = \underbrace{\frac{\frac{b_1}{a_1}}{\frac{T_1}{a_1}s + 1}}_{G_{H1}} \vartheta_{1,0}(t) + \underbrace{\frac{\frac{1}{a_1}}{\frac{T_1}{a_1}s + 1}}_{G_{H2}} \vartheta_{2,1}(t)$$

$$\vartheta_{2,1}(t) = \underbrace{\frac{Z_{21}}{T_2 s + 1}}_{G_{STE1}} \vartheta_{1,1}(t) + \underbrace{\frac{Z_{23}}{T_2 s + 1}}_{G_{STE2}} \vartheta_{3,1}(t)$$

$$\vartheta_{3,1}(t) = \underbrace{\frac{\frac{b_3}{a_3}}{\frac{T_3}{a_3}s + 1}}_{G_{STU1}} \vartheta_{3,0}(t) + \underbrace{\frac{\frac{1}{a_3}}{\frac{T_3}{a_3}s + 1}}_{G_{STU2}} \vartheta_{2,1}(t)$$

Obr. 7 Upravené rovnice pre AIN bloky pre 1. úsek

2.1.3 Blok PIDA

Regulátor predstavuje blok PIDA, vykonáva priebežnú spätnú väzbu PID, násobiace a taktiež súčtové riadenie doprednej analógovej slučky. Na výpočet výstupu sú použité jeho hlavné vstupy, setpointy a merania. Spracovanie premenných je závislé na nastavených

parametroch – pásmo proporcionality, integračný čas, relatívne zosilnenie, derivačný čas a doba oneskorenia. Blok PIDA poskytuje voľbu pre anti-windup efekt [15].

Názov blokov:

- MASTER – PI regulátor SVT
- SLAVE1 – P regulátor VTSO

Presné nastavenie jednotlivých parametrov som uviedla v Prílohe C.

Odvedenie PI regulátora

Regulátor v riadiacom systéme FOXBORO sa používa v priemyselných podmienkach. Daný regulátor bude pracovať podľa toho, aký mód nastavíme. Navrhla som PI regulátor, ktorý vie odstrániť trvalú regulačnú odchýlku a zabezpečí dosiahnutie žiadanej veličiny. PI regulátoru zodpovedá mód 4.

Rovnica PI regulátora má tvar [16]:

$$m_b = \frac{100}{P} \left(\left(\frac{1}{I_s} + A \right) r - \left(\frac{1}{I_s} + 1 \right) c_f \right) f_r + b$$

$$\tau = 0 \tag{31}$$

$$c_f = \frac{c}{1 + \tau s + 0.5(\tau s)^2}$$

za jednotlivé premenné som dosadila:

$$\begin{aligned} m_b &= m_f + b = m f_r + b \\ A &= 1 \\ b &= 0 \\ f_r &= 100 \\ c_f &= c \end{aligned} \tag{32}$$

pričom m je vstupná veličina a c je výstupná veličina a r je zvolený setpoint.

Rovnicu (31) som zjednodušila:

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{100}{P} \left(\frac{1}{I_s} + 1 \right) e(t) \\ e(t) &= w(t) - y(t) \end{aligned} \tag{33}$$

kde $e(t)$ je regulačná odchýlka, ktorá vstupuje do regulátora, P je proporcionálna zložka a I je integračná časová konštanta.

Prenos PI regulátora v MATLABe má tvar:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (34)$$

porovnaním rovníc (33) a (34)

$$\frac{100}{P} \left(\frac{1}{I_s} + 1 \right) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (35)$$

som odvodila vzťahy medzi zosilneniami a integračnými časovými konštantami, ktoré po dosadení z rovníc (25) sú rovné:

$$\begin{aligned} P &= \frac{100}{Z_R} = 156.8 \\ I &= T_i = 12.73 \text{ min} \end{aligned} \quad (36)$$

Odvođenje P regulátora

Rovnica PI regulátora má tvar [16]:

$$m_b = \frac{100}{P} (r - c_f) f_r + b \quad (37)$$

$$\tau = 0$$

$$c_f = \frac{c}{1 + \tau s + 0.5(\tau s)^2}$$

za jednotlivé premenné som dosadila:

$$\begin{aligned} m_b &= m_f + b = m f_r + b \\ A &= 1 \\ b &= 0 \\ f_r &= 100 \\ c_f &= c \end{aligned} \quad (38)$$

pričom m je vstupná veličina a c je výstupná veličina a r je žiadaná hodnota.

Rovnicu (37) som zjednodušila:

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{100}{P} e(t) \\ e(t) &= w(t) - y(t) \end{aligned} \quad (39)$$

kde $e(t)$ je regulačná odchýlka, ktorá vstupuje do regulátora a P je proporcionálna zložka.

Prenos P regulátora v MATLAbE má tvar:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R \quad (40)$$

porovnaním rovníc (39) a (40)

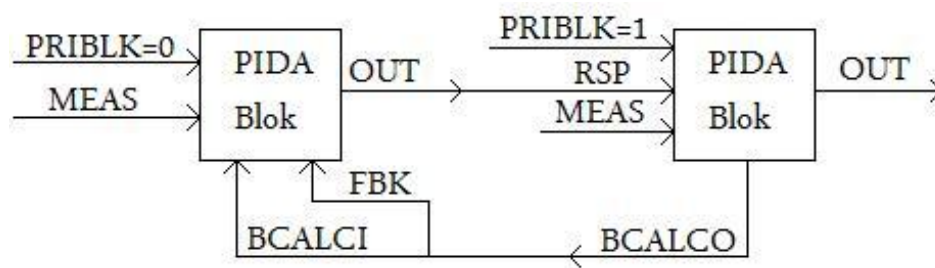
$$\frac{100}{P} = Z_R \quad (41)$$

som odvodila vzťah pre zosilnenie, ktoré po dosadení z rovnice (30) je rovné:

$$P = \frac{100}{Z_R} = 0.12 \quad (42)$$

Kaskádové riadenie

Na obr.8 je znázornená typická konfigurácia pri použití PIDA regulátora. Pričom parameter PRIBLK = 0 pre hlavný regulátor (Master) a PRIBLK = 1 pre vedľajší regulátor (Slave).



Obr. 8 Konfigurácia kaskádového riadenia vo FOXBORE

Pri kaskádovej konfigurácii pripájame FBK hlavného regulátora k parametru BCALCO vedľajšieho regulátora a parameter BCALCI hlavného regulátora ku BCALCO. Informácia o kaskádovej inicializácii je zahrnutá v parametre BCALCO, ktoré je prepojené s parametrom BCALCI predchádzajúceho bloku [16].

Parametre:

- BCALCI predstavuje skutočný vstup, ktorý poskytuje počiatočnú hodnotu výstupu predtým ako sa blok dostane do stavu riadenia.
- BCALCO predstavuje skutočný výstup, ktorý je zvyčajne rovný meranému vstupu. Ak je pripojený k parametru BCALCO predchádzajúceho bloku poskytuje počiatočnú hodnotu výstupu predchádzajúceho bloku, čo je potrebné na beznárazovú inicializáciu.
- FBK predstavuje skutočný vstup, ktorý poskytuje externú integrálnu spätnú väzbu. Zabráňuje wind-up efektu.
- MEAS predstavuje vstup ako zdroj meraného vstupu bloku, riadenú veličinu.
- OUT v móde Auto je reálny výsledok algoritmu bloku.
- RSP predstavuje vzdialenú žiadanú veličinu. Je zvolený ako zdroj žiadanej veličiny ak parameter LR je nastavený na vzdialený. Predstavuje reálny vstup.
- LR Lokálny/Vzdialený je boolovský vstup, ktorý vyberá zdroj žiadanej hodnoty (0=Lokálny, 1=Vzdialený). Ak je LR nastavené na 1 zdroj žiadanej hodnoty je parameter RSP. Ak je LR nastavené na 0 zdroj žiadanej hodnoty je parameter SPT.
- SPT vždy predstavuje žiadanú hodnotu aktívneho regulátora. Žiadaná hodnota predstavuje veličinu, ktorá je porovnávaná so vstupom MEAS a tým vytvára chybový signál. Parameter LR určuje zdroj žiadanej hodnoty.

2.1.4 Blok FBTUNE

Blok FBTUNE (Feedback Tuner) sa používa pri adaptívnom riadení. Uskutočňuje sa tu ladenie hodnoty proporcionálnej, integračnej a derivačnej zložky PID regulátora. Pripája sa k PIDA bloku, môžeme ho odpojiť od PIDA bloku aj keď proces beží [17].

Názov bloku:

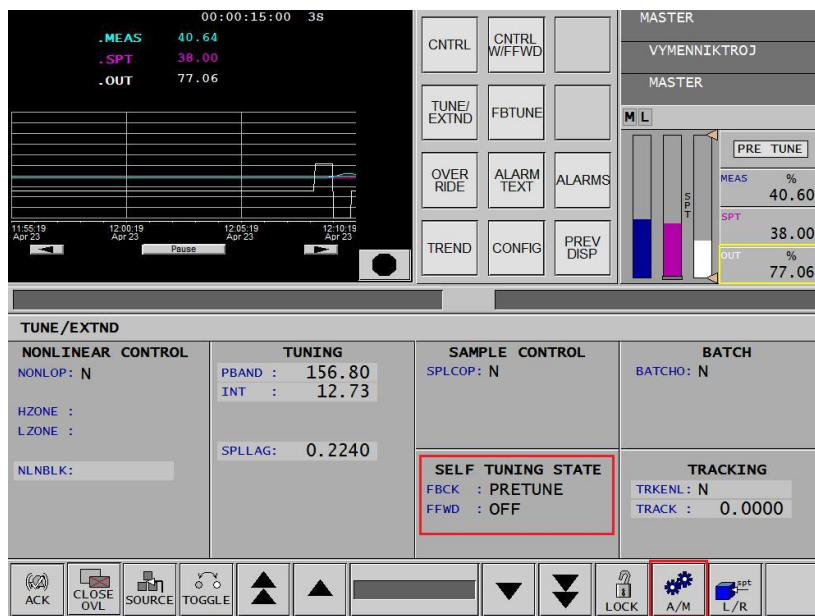
- ADAP

Parametre:

- TRESH určujeme podľa výstupu. Pričom prvý dosiahnutý vrchol výstupu musí byť menší ako 2.5 krát hodnota TRESH.
- BMP je potrebný len na predladenie, spôsobuje zdvojenie pulzu, ktorý je vnútený výstupu z regulátora a spôsobuje odozvu merania. Hodnota BMP musí byť oveľa väčšia ako hodnota TRESH, ale nesmie prekročiť ohraničenie regulátora.
- STNREQ určuje zapnutie a vypnutie adaptívneho riadenia. Ak je nastavené na 1 je adaptívne riadenie aktívne a naopak ak je rovné 0 je adaptívne riadenie vypnuté.
- PTNREQ inicializuje funkciu predladenia. Ak je 0 predladenie je vypnuté a uskutočňuje sa ladenie regulátora. Ak je nastavené na 1 je spustené predladenie.
- PIDBLK slúži na prepojenie s blokom PIDA

Najprv je potrebné nechať proces predladiť (obr. 9) tak, že ho prepne do manuálneho módu a nastavíme hodnotu PTNREQ na 1 a STNREQ na 1 (obr. 10). Taktiež je potrebné určiť parametre TRESH a BMP. Po uskutočnení predladenia sa systém automaticky prepne naspäť do automatického módu a zapne sa prepočítavanie zložiek P, I, D (obr. 11) [17].

Presné nastania parametrov som uviedla v prílohe D.

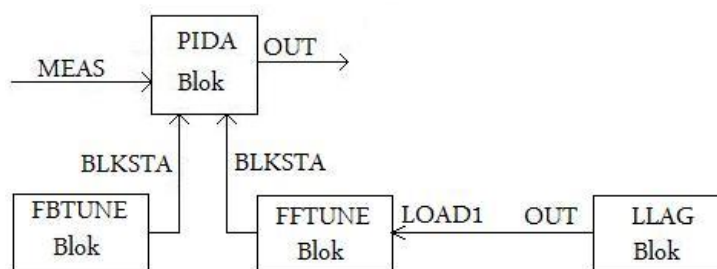


Obr. 9 Predladenie - prepnutie do manuálneho módu

Adaptívne riadenie vo FOXBORE

Na obr. 12 je znázornená typická konfigurácia pri použití adaptívneho riadenia.

Pri adaptívnom riadení pripájame k procesu blok FBTUNE, ktorý zabezpečí ladenie proporcionálnej, integračnej a časovej konštanty. Tieto konštanty sa posielajú pomocou parametra BLKSTA do PIDA bloku.



Obr. 12 Zapojenie adaptívneho riadenia všeobecne

Ak nám do procesu vstupuje porucha pridávame blok FFTUNE, ktorý taktiež zabezpečí ladenie proporcionálnej, integračnej a časovej konštanty. Do tohto bloku nám vstupuje porucha pomocou parametru LOAD1. Do bloku LLAG zadávame poruchu.

2.1.5 Prepojenie jednotlivých blokov

Na obr. 13 je znázornené prepojenie vytvorených blokov AIN, CALCA, PIDA a FBTUNE v ICC.

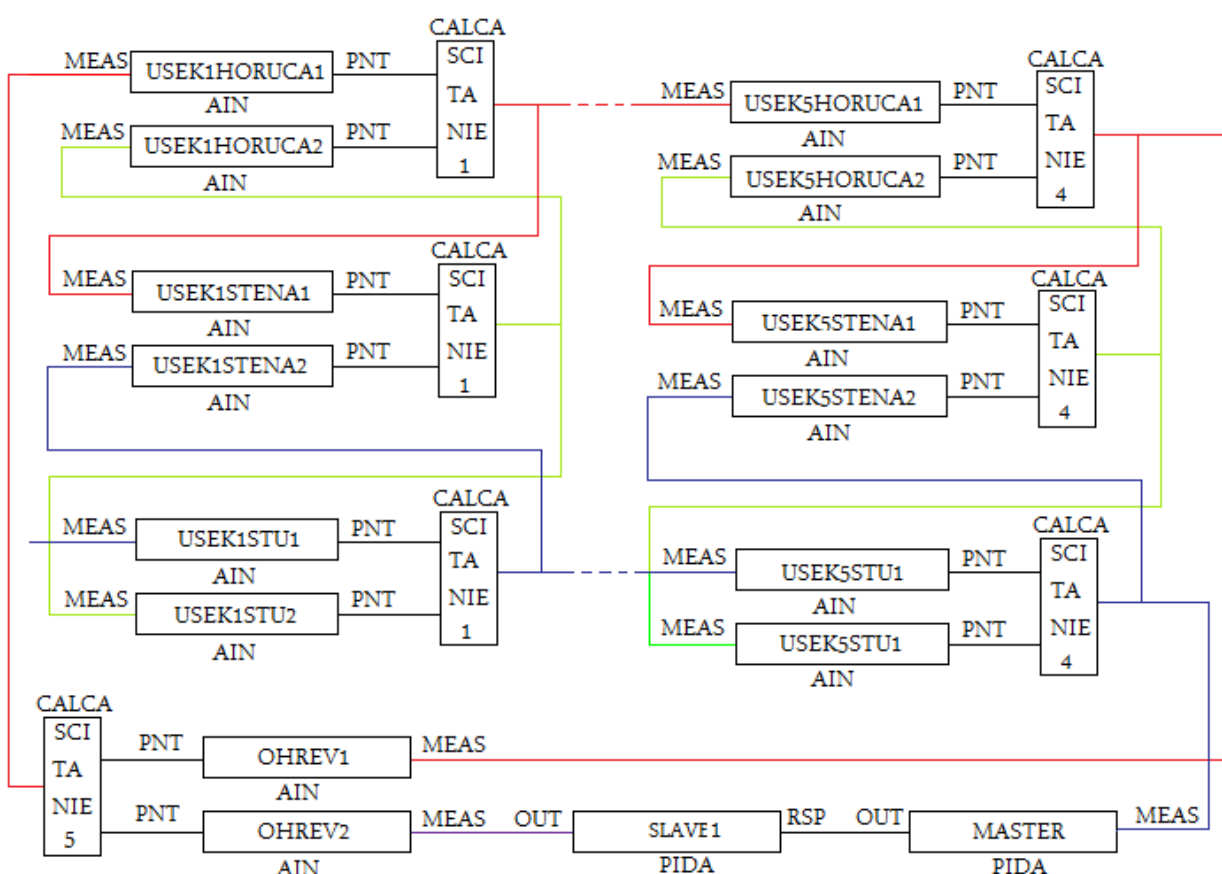
Bloky AIN predstavujú prenosy pre jednotlivé úseky a médiá pre SVT a prenosy pre VTSO. Horúce médium je znázornené červenou, studené médium modrou, stena zelenou a ohrev fialovou farbou.

Bloky CALCA za každou dvojicou AIN blokov SCITANIE1 až SCITANIE5 slúžia na sčítanie výstupov z AIN blokov. Ich výstup predstavuje vstup do ďalších AIN blokov. Výstup z posledného CALCA bloku SCITANIE4 pre horúce médium slúži ako vstup do AIN bloku pre

VTSO OHREV1 a pre studené médium slúži ako vstup do bloku regulátora PIDA MASTER. V bloku SCITANIE5 sa spočítavajú výstupy z AIN blokov OHREV1 a OHREV2 a jeho výstup sa napája ako vstup do AIN bloku USEK1HORUCA1 čím sa uzavrie celý systém dvoch výmenníkov tepla.

Pri adaptívnom riadení sa do bloku PIDA MASTER posielajú prepočítané hodnoty P a I z bloku FBTUNE ADAP. Bloky PIDA MASTER a SLAVE1 sú prepojené a predstavujú kaskádové riadenie. Výstup z bloku PIDA SLAVE1 slúži ako vstup do AIN bloku OHREV2.

Po odpojení riadenia vstupom do AIN bloku OHREV2 je číselná hodnota posielaná z obrazovky.

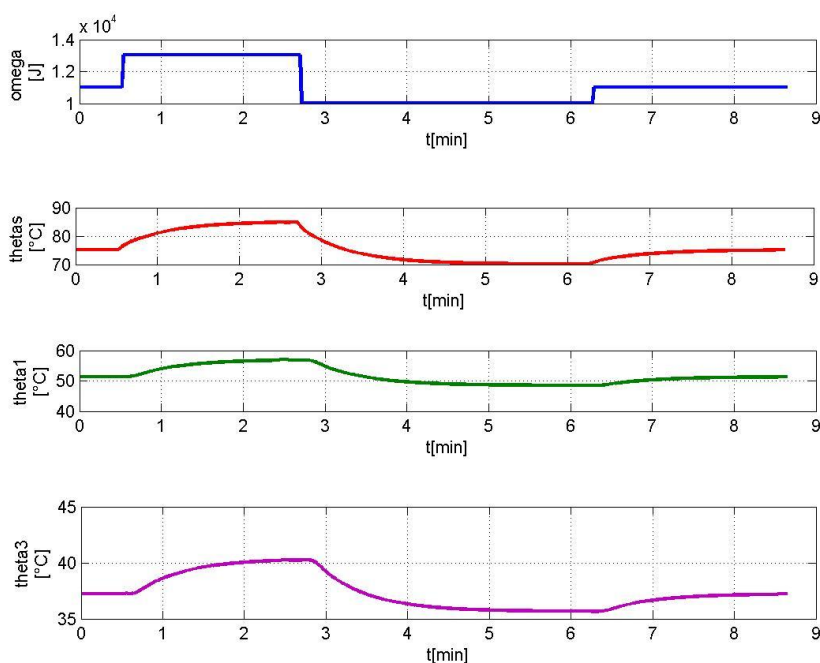


Obr. 13 Prepojenie blokov vo FOXBORE

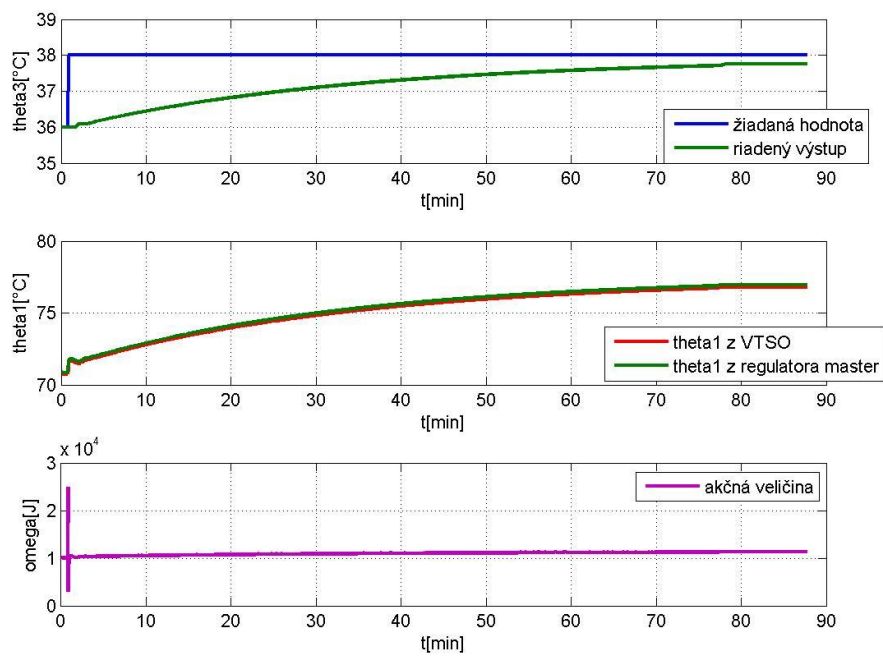
Po spustení vytvoreného modelu bez regulátora vo vizualizačnom prostredí FoxView som si overila funkčnosť a správnosť sústavy dvoch výmenníkov tepla vo FOXBORE s dátami získanými v MATLABe. Na obr. 14 sú znázornené priebehy po skokových zmenách ohrevu špirály. Theta1 predstavuje horúce médium na výstupe, theta3 studené médium na výstupe, thetas ohriate horúce médium a omega predstavuje ohrev.

Následne som k vytvorenému modelu systému dvoch výmenníkov tepla pripojila kaskádové riadenie. Na overenie správnosti riadenia som spravila niekoľko skokových zmien žiadanej hodnoty studeného média. Priebeh riadenia je vykreslený na obr. 15.

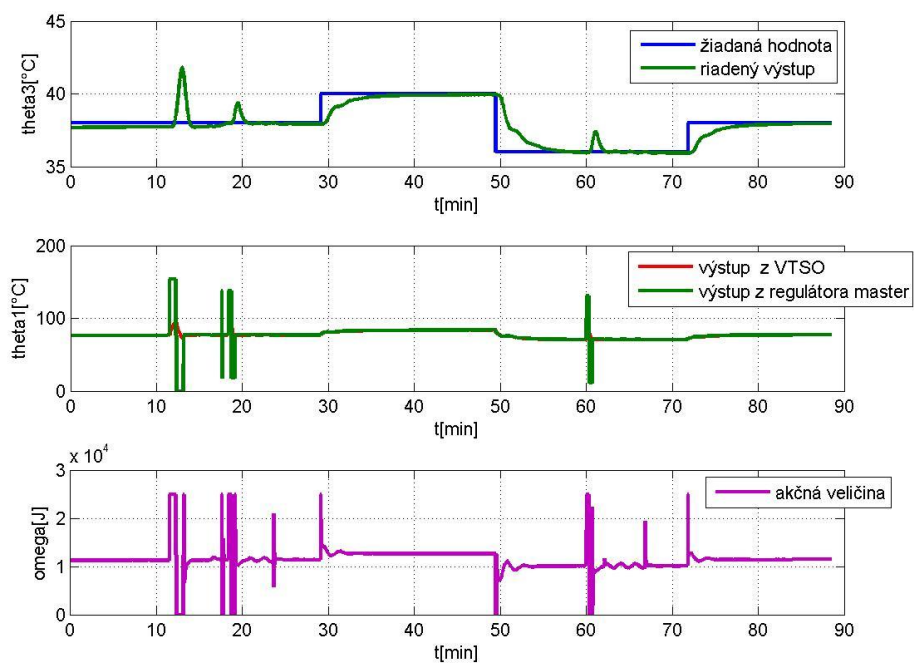
Nakoniec som pripojila adaptívne riadenie k PI regulátoru, ktoré som prepojila podľa obr. 13. Spravila som niekoľko skokových zmien, čím som overila funkčnosť adaptívneho riadenia. Priebeh adaptívneho riadenia je zobrazený na obr. 16. Následne som porovnala adaptívne riadenie so štandardným riadením (obr. 17).



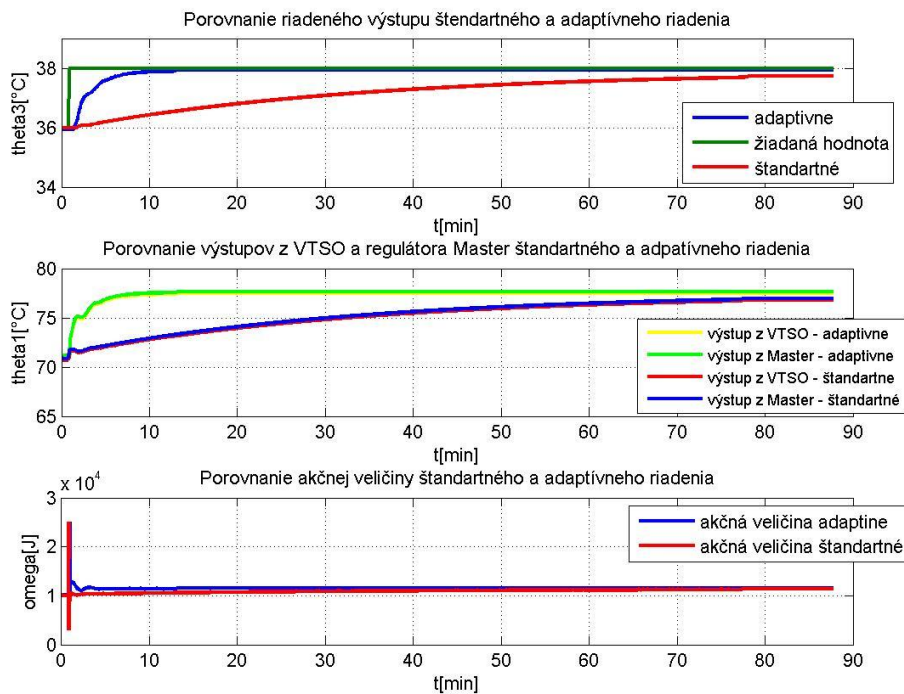
Obr. 14 Priebehy teplôt po skokovej zmene ohrevu



Obr. 15 Pribeh kaskádového riadenia



Obr. 16 Pribeh adaptívneho riadenia



Obr. 17 Porovnanie adaptívneho a štandardného riadenia

2.2 Vizualizácia

Na tvorbu vizualizačných obrazoviek slúži grafický editor FoxDraw.

Vytvorila som 5 hlavných obrazoviek a 10 vedľajších obrazoviek. Medzi hlavné obrazovky patria obrazovky na zadávanie parametrov výmenníkov, obrazovky riadenia a pozorovania teplôt. Medzi vedľajšie obrazovky patria obrazovky vysvetliviek a grafov pre jednotlivé úseky.

Na obr. 18 je zobrazená obrazovka na zadávanie parametrov SVT. Taktiež tu môžeme vidieť vypočítané hodnoty časových konštánt, zosilnení a rýchlosti prúdenia. V pravej časti obrazovky sa nachádzajú prepínacie tlačítka, ktoré slúžia na prepínanie medzi ďalšími obrazovkami. Po stlačení tlačítka „Vysvetlivky“ sa zobrazia vysvetlivky k jednotlivým parametrom ako aj ich jednotky (obr. 19).

Na obr. 20 je zobrazená obrazovka na zadávanie parametrov VTSO. Taktiež tu môžeme vidieť vypočítané hodnoty časovej konštanty a zosilnenia. V pravej časti obrazovky sa nachádzajú prepínacie tlačítka, ktoré slúžia na prepínanie medzi ďalšími obrazovkami. Po stlačení tlačítka „Vysvetlivky“ sa zobrazia vysvetlivky k jednotlivým parametrom ako aj ich jednotky (obr. 21).

Na obr. 22 je zobrazený systém dvoch výmenníkov tepla a to Súprudový výmenník tepla a Výmenník tepla s ohrevom ku ktorému sú pripojené dva regulátory zapojené do kaskády. Môžeme tu vidieť teploty studeného, horúceho média a steny pre jednotlivé úseky ako aj hodnotu ohrevu. V pravej časti obrazovky môžeme zadávať *spt* čiže žiadanú hodnotu ako aj *y* čo je výstupná hodnota riadeného studeného média. Bloky „Master“ a „Slave“ predstavujú regulátory, zadávame tu hodnoty proporcionálnej a integračnej zložky. Pri adaptívnom riadení nie je možné zadávať konštanty regulátorov. V dolnej časti obrazovky sa nachádzajú prepínacie tlačítka, ktorými sa prepíname medzi jednotlivými obrazovkami. Po stlačení tlačítka „Vysvetlivky“ sa zobrazia vysvetlivky k jednotlivým značkám (obr. 23).

Na obr. 24 je znázornená obrazovka sledovania riadenia. Môžeme tu vidieť porovnanie priebehov žiadanej hodnoty a riadeného výstupu (červená a žltá farba), pomocnej žiadanej hodnoty a jeho výstupu (fialová a modrá) ako aj priebeh akčnej veličiny (biela). Taktiež tu môžeme zadávať hodnoty žiadanej veličiny. Ako aj proporcionálnu a integračnú zložku regulátorov, ktoré pri adaptívnom riadení taktiež nie je možné zadávať, pretože sa automaticky menia v priebehu regulácie. V ľavej časti obrazovky sa taktiež nachádzajú prepínacie tlačítka, ktorými sa prepíname medzi jednotlivými obrazovkami.

Na obr. 25 môžeme sledovať hodnoty teplôt horúceho, studeného média a steny SVT, ako aj vstupné a výstupné teploty VTSO. Po stlačení tlačítka „Trend“ sa zobrazí priebeh teplôt pre jednotlivé úseky a pre VTSO (obr. 26). V ľavej časti obrazovky sa taktiež nachádzajú prepínacie tlačítka, ktorými sa prepíname medzi jednotlivými obrazovkami. Po stlačení tlačítka „Vysvetlivky“ sa zobrazia vysvetlivky k jednotlivým skratkám a značkám (obr. 27).

**Parametre a vypocitane konstanty
pre Suprudovy vymennik tepla - trojkapacitny**

Modelovanie	m1	400.0	Casove konstanty	
	m3	1100.0	T1	0.2875
Riadenie	ro1	974.80	T2	0.0393
	ro2	8930.00	T3	0.5792
Parametre pre VTSO	ro3	810.00		
Sledovanie teplot	d1	0.0250	Zosilnenia	
	d2	0.0280	Z21	0.6379
	d3	0.0500	Z23	0.3621
	alfa12	1480.0		
	alfa23	750.00	Rychlosti	
	Cp1	4190.0	w1	13.93
	Cp2	385.00	w3	16.79
	Cp3	2100.0		
Vysvetlivky				

Obr. 18 Obrazovka na zadávanie parametrov SVT

Vysvetlivky

m1 - hmotnostny tok horuceho media (kg/h)
m2 - hmotnostny tok studeneho media (kg/h)
ro1 - hustota horudeho media (kg/m3)
ro2 - hustota steny (kg/m3)
ro3 - hustota studeneho media (kg/m3)
d1-priemer vnutorneho potrubia (m)
d2 - priemer steny (m)
d3 - priemer vonkajsieho potrubia (m)
alfa12 - koeficient prestupu tepla z horuceho media do steny (W/m2 K)
alfa23 - koeficient prestupu tepla zo steny do studeneho media (W/m2 K)
Cp1 - tepelna kapacita horuceho media (J/kg K)
Cp2 - tepelna kapacita steny (J/kg K)
Cp3 - tepelna kapacita studeneho media (J/kg K)
T - casove honstanty (min)
Z - zosilnenia
w- rychlosti prudenja (m3/min)

Obr. 19 Vysvetlivky k obrazovke na zadávanie parametrov SVT

**Konstanty a vypocitane parametre
pre Vymennik tepla s ohrevom**

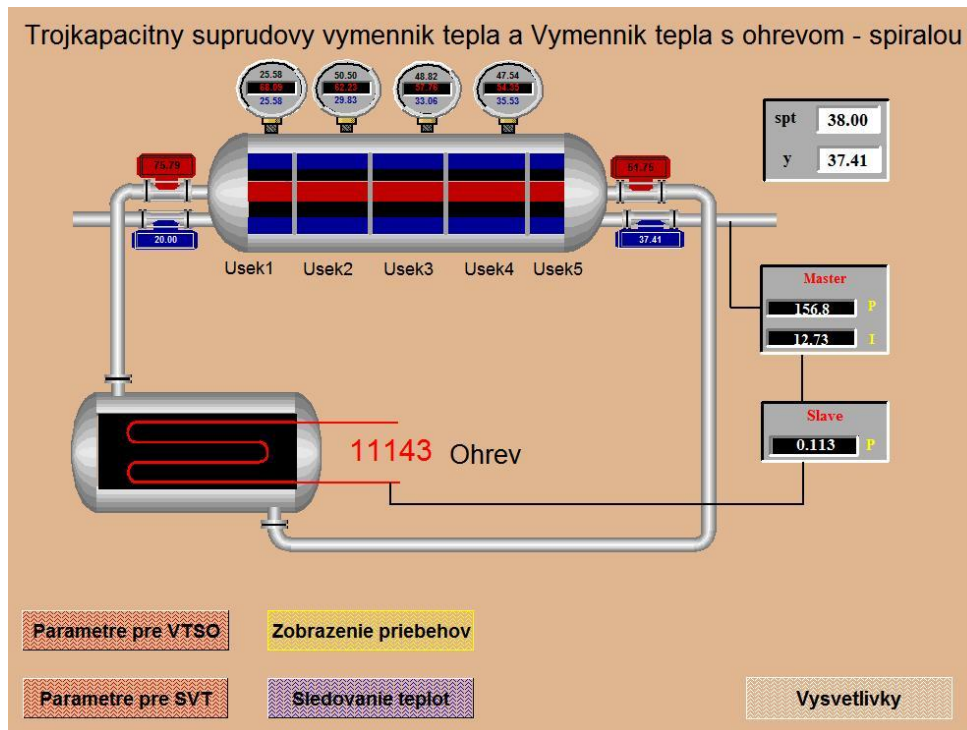
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Modelovanie</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Riadenie</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Parametre pre SVT</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Sledovanie teplot</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 20px;">Vysvetlivky</div>	<table border="0"> <tr> <td>V</td> <td>0.0049</td> <td>thetavs</td> <td>51.65</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>0.0068</td> <td>thetas</td> <td>75.62</td> </tr> <tr> <td>ro1</td> <td>974.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cp</td> <td>4190.0</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p style="text-align: center; color: red;">Vypocitane hodnoty casovej konstanty a zosilnenia</p> <table border="0"> <tr> <td>To</td> <td>0.7206</td> </tr> <tr> <td>Zo</td> <td>0.0022</td> </tr> </table>	V	0.0049	thetavs	51.65	q	0.0068	thetas	75.62	ro1	974.8			Cp	4190.0			To	0.7206	Zo	0.0022
V	0.0049	thetavs	51.65																		
q	0.0068	thetas	75.62																		
ro1	974.8																				
Cp	4190.0																				
To	0.7206																				
Zo	0.0022																				

Obr. 20 Obrazovka na zadávanie parametrov VTSO

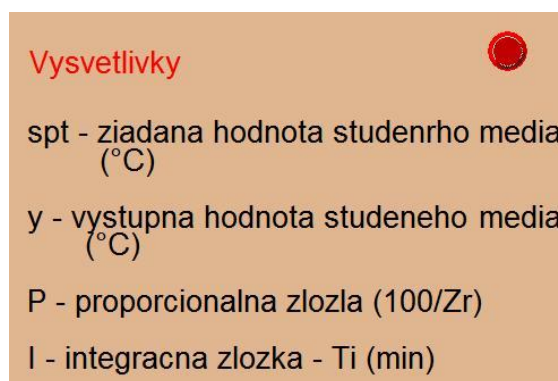
Vysvetlivky

V - Objem vymennika (m³)
q - Obsjemovy prietok (m³/min)
ro - Hustota (kg/m³)
Cp - Tepelna kapacita (J/kg/K)
thetavs - ustalena teplota vstupujuceho media (°C)
thetas - ustalena hodnota vystupujuceho media (°C)
To - casova konstanta (min)
Zo - zosilnenie

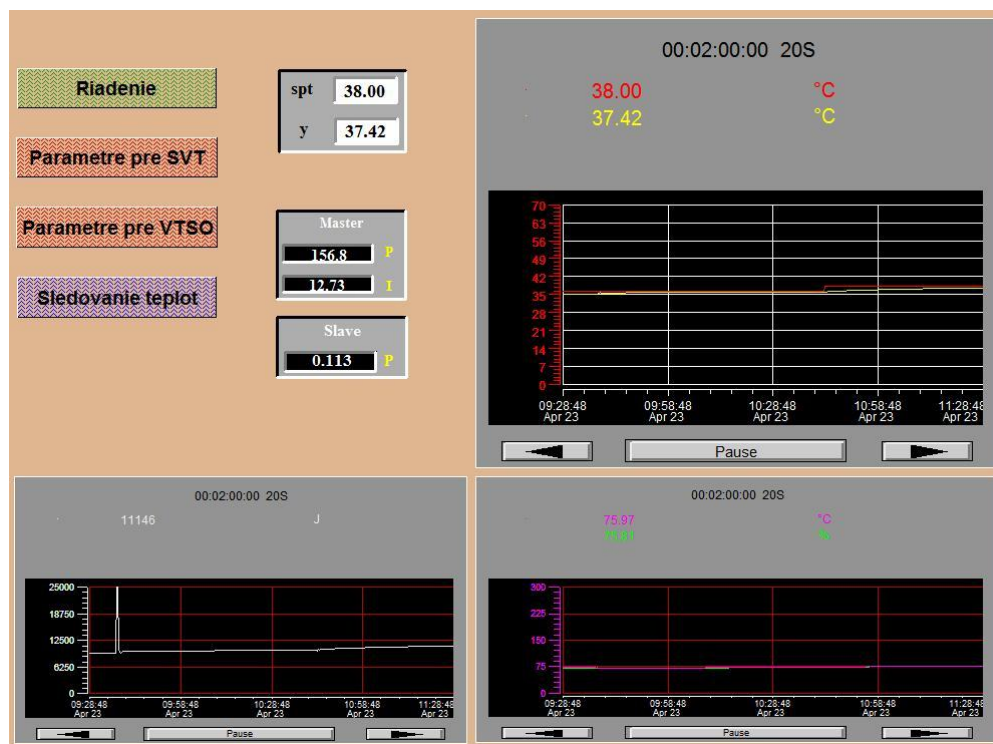
Obr. 21 Vysvetlivky k obrazovke na zadávanie parametrov VTSO



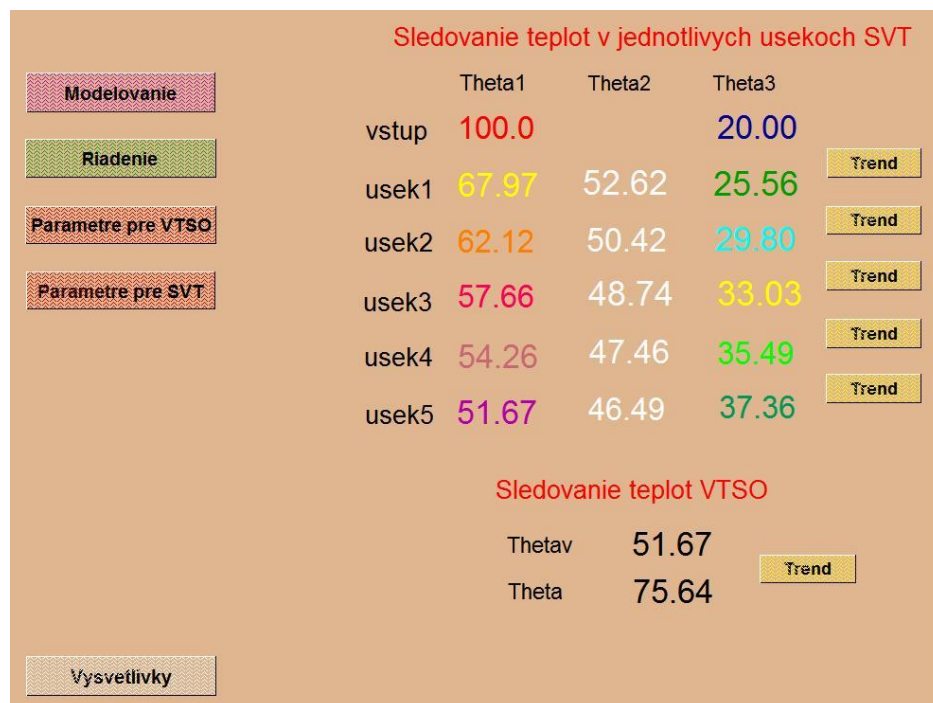
Obr. 22 Obrazovka riadenia systému dvoch výmenníkov tepla



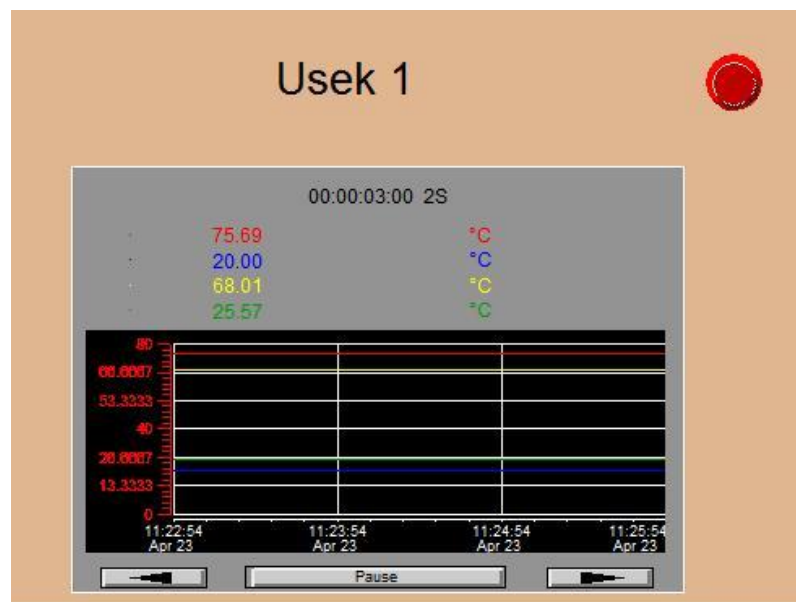
Obr. 23 Vysvetlivky k obrazovke riadenia systém dvoch výmenníkov tepla



Obr. 24 Obrazovka pre pozorovanie riadenia



Obr. 25 Obrazovka sledovania teplôt



Obr. 26 Pozorovanie priebehu pre 1. Úsek

Vysvetlivky



Theta1 - teplota horuceho media
 Theta2 - teplota steny
 Theta3 - teplota studeneho media
 Vsetky uvedene teploty su v °C
 Vstup - vstupujuca teplota horuceho a studeneho media
 Thetav - vstupujuca teplota VTSO
 Theta - vystupujuca teplota VTSO

Obr. 27 Vysvetlivky k obrazovke na sledovanie teplôt

Výsledky práce

Na úspešné splnenie cieľov bolo potrebné pre systém dvoch výmenníkov tepla a to trojkapacitného súprúdového výmenníka tepla a výmenníka tepla s ohrevom odvodiť matematický model ako aj model rovnovážneho stavu. Pri trojkapacitnom súprúdovom rúrkovom výmenníku tepla bolo odvodenie modelu zložitejšie, pretože na riešenie rovnovážneho stavu sa používa diskretizácia, pri ktorej som výmenník rozdelila na 5 úsekov a následne som za derivácie v MMRS dosadila spätnú diferenciu. Takto som dostala tri rovnice pre každý úsek a ich ustálené stavy som vypočítala pomocou MATLABu (tab. 3). Pri výmenníku tepla s ohrevom to bolo jednoduchšie, tam som ustálené stavy vedela vypočítať priamo z MMRS (18). Následne som odvodila prenosy pre jednotlivé výmenníky (23), (24), (obr. 7). Tieto prenosy som použila pri implementácii systému výmenníkov tepla do FOXBORA, pretože som použila bloky AIN, do ktorých sa zadávajú prenosy. Následne som sledovala dynamiku procesu (obr.14) a skontrolovala som hodnoty ustálených stavov. Tieto hodnoty sa zhodovali s vypočítanými hodnotami. Čím som sa uistila, že systém dvoch výmenníkov tepla funguje správne.

Keďže mám systém dvoch výmenníkov tepla, rozhodla som sa pre kaskádové riadenie, pri ktorom riadim studené médium vystupujúce z rúrkového výmenníka tepla ohrevom, ktorý vstupuje do výmenníka tepla s ohrevom. Aby som mohla navrhnúť regulátor pre SVT musela som systém identifikovať a tým som získala prenos pre celý systém. Prenos systému VTSO, potrebného pre návrh regulátora, som získala pomocou Laplaceovej transformácie lineárneho odchylkového modelu. Navrhla som dva regulátory, PI regulátor pre SVT, ktorý predstavuje hlavný regulátor a P regulátor pre VTSO, ktorý predstavuje vedľajší regulátor. PI a P regulátor som najprv navrhla pomocou metódy umiestnenia pólov, ale táto kombinácia nebola dobre zvolená, pretože riadený výstup kmital okolo žiadanej hodnoty. Tento spôsob by nebol výhodný, pretože vo výrobe by mal za následok rýchle opotrebovanie ventilov. Preto som skúsila navrhnúť PI a P regulátor Strejcovou metódou syntézy regulátora, táto kombinácia bola vhodne zvolená, pretože riadený výstup sa ustálil na žiadanej hodnote. Skúsila som ešte kombinácie PI regulátora navrhnutého Strejcovou metódou syntézy regulátora a P regulátor metódou umiestnenia pólov. Vyskúšala som rôzne póly, ktoré spôsobovali, že systém bol buď rýchlejší alebo pomalší, nakoniec som zvolila túto kombináciu, pretože riadený systém bol rýchlejší ako keď som zvolila

kombináciu PI a P regulátora navrhnutého pomocou strejcovej metódy syntézy regulátora. Vykreslenie kaskádového riadenia je znázornené na obr. 15.

Po vyskúšaní rôznych kombinácií regulátorov bolo riadenie stále pomalé, preto som sa rozhodla zmeniť PI regulátor na adaptívny. Zvolila som PI regulátor pretože vo výrobe by bolo jednoduchšie navrhnuť jeden regulátor P a PI nechať samodopočítať. Pri adaptívnom riadení vo FOXBORE je potrebné systém najprv nechať predladať a následne si systém sám prepočítava parametre na základe vrcholov riadeného výstupu. Takéto riadenie je oveľa rýchlejšie. Vykreslenie priebehu adaptívneho riadenia je znázornené na obr.16 a porovnanie kaskádového riadenia s adaptívnym a bez adaptívneho regulátora je znázornené na obr.17.

Pre jednoduchšiu orientáciu v prostredí FOXBORO som vytvorila 5 hlavných a 10 vedľajších obrazoviek. Prostredníctvom týchto obrazoviek môžeme zadávať parametre výmenníkov tepla ako aj vidieť vypočítané konštanty. Taktiež môžeme zadávať parametre regulátorov a žiadanú hodnotu. Na samostatnej obrazovke môžeme vidieť priebehy jednotlivých výstupov, vstupov a žiadanej hodnoty potrebných pri riadení. Zase na inej obrazovke môžeme sledovať meniace sa teploty v jednotlivých úsekoch výmenníka a taktiež ich grafické zobrazenie.

Záver

Cieľom diplomovej práce bolo riadiť sústavu výmenníkov tepla pomocou riadiaceho systému FOXBORO.

Na uskutočnenie tohto cieľu bolo najprv potrebné namodelovať sústavu výmenníkov tepla, ktorú som implementovala do riadiaceho systému FOXBORO pomocou jednotlivých blokov AIN a CALCA a pozorovala som dynamiku procesu (obr. 14).

Prenosy systémov, potrebné na návrh regulátorov, som získala identifikáciou procesu SVT a odvodením pomocou Laplaceovej transformácie lineárneho odchyľkového modelu VTSO. Následne som navrhla dva regulátory pomocou klasických metód syntézy regulátora. Hlavný regulátor PI, pre SVT, som navrhla pomocou Strejcovej metódy syntézy regulátora a vedľajší regulátor P, pre VTSO, som navrhla pomocou metódy umiestnenia pólov. Navrhnuté regulátory som zapojila do kaskády a následne som pozorovala riadenie (obr. 15). Keďže riadenie bolo pomalé rozhodla som sa navrhnúť jeden z regulátorov ako adaptívny, po implementácii adaptívneho regulátora som pozorovala adaptívne riadenie (obr. 16). Zvolila som PI regulátor pretože vo výrobe by bolo jednoduchšie navrhnúť jeden regulátor P a PI nechať samodopočítať. Implementáciou adaptívneho PI regulátora sa riadenie výrazne zrýchlilo. Následne som porovnala kaskádové riadenie s adaptívnym a bez adaptívneho regulátora (obr. 17).

V riadiacom systéme FOXBORO som navrhla 5 vizualizačných obrazoviek. A to obrazovky na zadávanie jednotlivých parametrov SVT a VTSO, obrazovky na zadávanie proporčionalnej a integračnej zložky regulátorov, ako aj na sledovanie priebehu riadenia a obrazovky s trendovými grafmi, pomocou ktorých môžeme sledovať dynamiku procesu.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Vanecková, K.: *FOXBORO (Stručný manuál)*, Bratislava 2008
- [2] Badrnec M., Bálež V., Langfelder I., Longauer J.: *Chemické inžinierstvo I*, str.291-294, Malé Centrum 1999
- [3] Lipták, B. G.: *Process control and optimalization, volume II*, kapitola 8.29 Heat exchanger control and optimalization, 2005
- [4] Mikeš, J., Fikar, M.: *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov II*, STU Bratislava 2008
- [5] Bakošová, M. – Fikar, M.: *Procesy s prestupom tepla*, prednáška č. 2, FCHPT STU v Bratislave, ZS 2008/2009
- [6] Bakošová, M. – Fikar, M.: *Procesy s prestupom tepla*, prednáška č. 3, FCHPT STU v Bratislave, ZS 2008/2009
- [7] Jakubcová, Z.: *Tvorba modelu trojkapacitného výmenníka tepla riadiacim systémom FOXBORO*, Bratislava, Semestrálny projekt, 2009
- [8] Bakošová, M.: *Modelovanie*, prednáška č. 7, FCHPT STU v Bratislave, 2007
- [9] Bakošová, M.: *Modelovanie*, prednáška č. 8, FCHPT STU v Bratislave, 2007
- [10] Jakubcová, Z.: *Riadenie trojkapacitného výmenníka tepla riadiacim systémom FOXBORO*, Bratislava, Semestrálny projekt, 2009
- [11] Bakošová, M. – Fikar, M.: *Spätnoväzbové riadenie procesov*, prednáška, FCHPT STU v Bratislave, ZS 2007/2008
- [12] Bakošová, M. – Fikar, M.: *Nastavovanie parametrov regulátorov*, prednáška, FCHPT STU v Bratislave, ZS 2007/2008
- [13] Bakošová, M. – Fikar, M.: *Rozvetvené regulačné obvody*, prednáška, FCHPT STU v Bratislave, ZS 2007/2008
- [14] Fikar, M.: *Self-tuning control*, prednáška, FCHPT STU v Bratislave, ZS 2009/2010
- [15] Doležalová, R.: *Riadiaci systém FOXBORO*, Bratislava, 2008
- [16] *I/A Series Electronic Documentation V7.0*, Invensys Systems, Inc., kapitola 93, 2002
- [17] *I/A Series Electronic Documentation V7.0*, Invensys Systems, Inc., kapitola 67, 2002

Prílohy

Príloha A

CALCA blok KONT1T2		
Parametre	Adresa	Popis
RI01	0.0	ρ_1 – posielané z displeja
RI02	0.0	ρ_2 – posielané z displeja
RI03	:PREPOCET1.RO01	C_{p1}
RI04	:PREPOCET1.RO02	C_{p2}
RI05	0.0	D_1 – posielané z displeja
RI06	0.0	D_2 – posielané z displeja
RI07	:PREPOCET1.RO04	α_{12}
RI08	:PREPOCET2.RO01	α_{23}
M01	4	
STEP1	MUL RI01 RI03	$\rho_1 C_{p1}$
STEP2	OUT M02	
STEP3	MUL M02 RI05	$\rho_1 C_{p1} D_1$
STEP4	OUT M03	
STEP5	MUL M01 RI07	$\alpha_{12} 4$
STEP6	OUT M04	
STEP7	DIV M03 M04	T_1
STEP8	OUT RO01	
STEP9	MUL RI02 RI04	$\rho_2 C_{p2}$
STEP10	OUT M05	
STEP11	MUL RI06 RI06	D_2^2
STEP12	OUT M06	
STEP13	MUL RI05 RI05	D_1^2
STEP14	OUT M07	

STEP15	SUB M06 M07	$D_2^2 - D_1^2$
STEP16	OUT M08	
STEP17	MUL M05 M08	$\rho_2 C_{p2} (D_2^2 - D_1^2)$
STEP18	OUT M09	
STEP19	MUL RI05 M04	$\alpha_{12} \ 4 \ D_1$
STEP20	OUT M10	
STEP21	MUL M01 RI08	$\alpha_{23} \ 4$
STEP22	OUT M11	
STEP23	MUL M11 RI06	$\alpha_{23} \ 4 \ D_2$
STEP24	OUT M12	
STEP25	ADD M10 M12	$\alpha_{12} \ 4 \ D_1 + \alpha_{23} \ 4 \ D_2$
STEP26	OUT M13	
STEP27	DIV M09 M13	T_2
STEP28	OUT RO02	

CALCA blok KONZ21Z23T3

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:PREPOCET1.RO04	α_{12}
RI02	:PREPOCET1.RO01	α_{23}
RI03	:KONT1T2.RI05	D_1
RI04	:KONT1T2.RI06	D_2
RI05	0.0	D_3 – posielané z displeja
RI06	0.0	ρ_3 – posielané z displeja
RI07	:PREPOCET1.RO03	c_{p3}
M01	4	
STEP1	MUL RI01 RI03	$\alpha_{12} \ D_1$
STEP2	OUT M02	
STEP3	MUL RI02 RI05	$\alpha_{23} \ D_2$
STEP4	OUT M03	
STEP5	MUL M02 M03	$\alpha_{12} \ D_1 + \alpha_{23} \ D_2$

STEP6	OUT M04	
STEP7	DIV M02 M04	Z_{21}
STEP8	OUT RO01	
STEP9	DIV M03 M04	Z_{23}
STEP10	OUT RO02	
STEP11	MUL RI06 RI07	$\rho_3 C_{p3}$
STEP12	OUT M05	
STEP13	MUL RI05 RI05	D_3^2
STEP14	OUT M06	
STEP15	MUL RI04 RI04	D_2^2
STEP16	OUT M07	
STEP17	SUB M06 M07	$D_2^2 - D_1^2$
STEP18	OUT M08	
STEP19	MUL M06 M08	$q_2 C_{p2} (D_2^2 - D_1^2)$
STEP20	OUT M09	
STEP21	MUL M01 M03	$\alpha_{23} 4 D_2$
STEP22	OUT M10	
STEP23	MUL M09 M10	T_3
STEP24	OUT RO03	

CALCA blok KONW1W3

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:KONT1T2.RI01	ρ_1
RI02	:KONZ21Z23T3.RI06	ρ_3
RI03	:PREPOCET2.RO02	m_1
RI04	:PREPOCET2.RO03	m_2
RI05	:KONT1T2.RI05	D_1
RI06	:KONT1T2.RI06	D_2
RI07	:KONZ21Z23T3.RI05	D_3
M01	4	

M02	3.14	
STEP1	MUL M01 RI03	$m_1 4$
STEP2	OUT M02	
STEP3	MUL RI01 M02	$\pi \rho_1$
STEP4	OUT M03	
STEP5	MUL RI05 RI05	D_1^2
STEP6	OUT M04	
STEP7	MUL M03 M04	$\pi \rho_1 D_1$
STEP8	OUT M05	
STEP9	DIV M02 M05	w_1
STEP10	OUT RO01	
STEP11	MUL M01 RI04	$m_3 4$
STEP12	OUT M06	
STEP13	MUL RI02 M02	$\pi \rho_3$
STEP14	OUT M07	
STEP15	MUL RI07 RI07	D_3^2
STEP16	OUT M08	
STEP17	MUL RI06 RI06	D_2^2
STEP18	OUT M09	
STEP19	SUB M08 M09	$D_3^2 - D_2^2$
STEP20	OUT M10	
STEP21	MUL M07 M10	$\pi \rho_3 (D_3^2 - D_2^2)$
STEP22	OUT M11	
STEP23	DIV M06 M11	w_3
STEP24	OUT RO02	

CALCA blok KONSTANTY1

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:KONT1T2.RO01	T_1
RI02	:KONW1W3.RO01	w_1
M01	2	z

M02	1	
STEP1	MUL RI01 RI02	$T_1 w_1$
STEP2	OUT M03	
STEP3	DIV M03 M01	b_1
STEP4	OUT M04	
STEP5	ADD M04 M02	a_1
STEP6	OUT M05	
STEP7	DIV M04 M05	$\frac{b_1}{a_1}$
STEP8	OUT RO01	
STEP9	DIV M02 M05	$\frac{1}{a_1}$
STEP10	OUT RO02	
STEP11	MUL RI01 M05	$\frac{T_1}{a_1}$
STEP12	OUT RO03	

CALCA blok KONSTANTY2

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:KONZ21Z23T3.RO03	T_3
RI02	:KONW1W3.RO02	w_3
M01	1	
M02	2	z
STEP1	MUL RI01 RI02	$T_3 w_3$
STEP2	OUT M03	
STEP3	DIV M03 M02	b_3
STEP4	OUT M04	
STEP5	ADD M04 M01	a_3
STEP6	OUT M05	
STEP7	DIV M04 M05	$\frac{b_3}{a_3}$
STEP8	OUT RO01	

STEP9	DIV M01 M05	$\frac{1}{a_3}$
STEP10	OUT RO02	
STEP11	MUL RI01 M05	$\frac{T_3}{a_3}$
STEP12	OUT RO03	

CALCA blok SCITANIE1

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:USEK1HORUCA1.PNT	
RI02	:USEK1HORUCA2.PNT	
RI03	:USEK1STENA1.PNT	
RI04	:USEK1STENA2.PNT	
RI05	:USEK1STU1.PNT	
RI06	:USEK1STU2.PNT	
RI07	:USEK2HORUCA1.PNT	
RI08	:USEK2HORUCA2.PNT	
STEP1	ADD RI01 RI02	Theta11
STEP2	OUT RO01	
STEP3	ADD RI03 RI04	Theta21
STEP4	OUT RO02	
STEP5	ADD RI05 RI06	Theta31
STEP6	OUT RO03	
STEP7	ADD RI07 RI08	Theta12
STEP8	OUT RO04	

CALCA blok SCITANIE2

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:USEK2STENA1.PNT	
RI02	:USEK2STENA2.PNT	
RI03	:USEK2STU1.PNT	
RI04	:USEK2STU2.PNT	
RI05	:USEK3HORUCA1.PNT	

RI06	:USEK3HORUCA2.PNT	
RI07	:USEK3STENA1.PNT	
RI08	:USEK3STENA2.PNT	
STEP1	ADD RI01 RI02	Theta22
STEP2	OUT RO01	
STEP3	ADD RI03 RI04	Theta32
STEP4	OUT RO02	
STEP5	ADD RI05 RI06	Theta13
STEP6	OUT RO03	
STEP7	ADD RI07 RI08	Theta23
STEP8	OUT RO04	

CALCA blok SCITANIE3

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:USEK3STU1.PNT	
RI02	:USEK3STU2.PNT	
RI03	:USEK4HORUCA1.PNT	
RI04	:USEK4HORUCA2.PNT	
RI05	:USEK4STENA1.PNT	
RI06	:USEK4STENA2.PNT	
RI07	:USEK4STU1.PNT	
RI08	:USEK4STU2.PNT	
STEP1	ADD RI01 RI02	Theta33
STEP2	OUT RO01	
STEP3	ADD RI03 RI04	Theta14
STEP4	OUT RO02	
STEP5	ADD RI05 RI06	Theta24
STEP6	OUT RO03	
STEP7	ADD RI07 RI08	Theta34
STEP8	OUT RO04	

CALCA blok SCITANIE4

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:USEK5HORUCA1.PNT	
RI02	:USEK5HORUCA2.PNT	
RI03	:USEK5STENA1.PNT	
RI04	:USEK5STENA2.PNT	
RI05	:USEK5STU1.PNT	
RI06	:USEK5STU2.PNT	
STEP1	ADD RI01 RI02	Theta15
STEP2	OUT RO01	
STEP3	ADD RI03 RI04	Theta25
STEP4	OUT RO02	
STEP5	ADD RI05 RI06	Theta35
STEP6	OUT RO03	

CALCA blok PREPOCET1

Parametre	Adresa	Popis
RI01	0.0	C_{p1} - posielané z displeja
RI02	0.0	C_{p2} - posielané z displeja
RI03	0.0	C_{p3} - posielané z displeja
RI04	0.0	α_{12} - posielané z displeja
M01	60	
STEP1	MUL M01 M01	60*60
STEP2	OUT M02	
STEP3	ADD M01 M02	60*60*60
STEP4	OUT M03	
STEP5	ADD RI01 M02	C_{p1}
STEP6	OUT RO01	
STEP7	ADD RI02 M02	C_{p2}
STEP8	OUT RO02	

STEP9	ADD RI03 M02	C_{p3}
STEP10	OUT RO03	
STEP11	ADD RI04 M03	α_{12}
STEP12	OUT RO04	

CALCA blok PREPOCET2

Parametre	Adresa	Popis
RI01	0.0	α_{23} - posielané z displeja
RI02	0.0	m_1 - posielané z displeja
RI03	0.0	m_3 - posielané z displeja
M01	60	
STEP1	MUL M01 M01	60*60
STEP2	OUT M02	
STEP3	ADD M01 M02	60*60*60
STEP4	OUT M03	
STEP5	ADD RI01 M03	α_{23}
STEP6	OUT RO01	
STEP7	ADD RI02 M01	m_1
STEP8	OUT RO02	
STEP9	ADD RI03 M01	m_3
STEP10	OUT RO03	

CALCA blok KONOHEV

Parametre	Adresa	Popis
RI01	0.0	V - posielané z displeja
RI02	0.0	q - posielané z displeja
RI03	0.0	ρ - posielané z displeja
RI04	0.0	C_p - posielané z displeja
M01	1	
M02	60	
M03	1	

STEP1	MUL RI04 M03	C_p
STEP2	OUT M04	
STEP3	DIV RI02 M02	$q/60$
STEP4	OUT M05	
STEP5	DIV RI01 M05	T
STEP6	OUT RO01	
STEP7	MUL M05 RI03	ρq
STEP8	OUT M06	
STEP9	MUL M06 M04	$\rho q C_p$
STEP10	OUT M07	
STEP11	DIV M01 M07	Z
STEP12	OUT RO02	

CALCA blok SCITANIE5

Parametre	Adresa	Popis
RI01	:OHREV1.PNT	
RI02	:OHREV2.PNT	
STEP1	ADD RI01 RI02	Theta11
STEP2	OUT RO01	

Príloha B

AIN blok USEK1HORUCA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO03
KSCALE	:KONSTANTY1.RO01
MEAS	:SCITANIE5.RO01

AIN blok USEK1HORUCA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO02
KSCALE	:KONSTANTY1.RO03
MEAS	:SCITANIE1.RO02

AIN blok USEK1STENA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO01
MEAS	:SCITANIE1.RO01

AIN blok USEK1STENA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO02
MEAS	:SCITANIE1.RO03

AIN blok USEK1STU1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO01
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	0.0

AIN blok USEK1STU2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO02
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE1.RO02

AIN blok USEK2HORUCA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO03
KSCALE	:KONSTANTY1.RO01
MEAS	:SCITANIE1.RO01

AIN blok USEK2HORUCA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO02
KSCALE	:KONSTANTY1.RO03
MEAS	:SCITANIE2.RO01

AIN blok USEK2STENA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO01
MEAS	:SCITANIE1.RO04

AIN blok USEK2STENA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO02
MEAS	:SCITANIE2.RO02

AIN blok USEK2STU1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO01
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE2.RO03

AIN blok USEK2STU2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO02
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE2.RO01

AIN blok USEK3HORUCA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO03
KSCALE	:KONSTANTY1.RO01
MEAS	:SCITANIE1.RO03

AIN blok USEK3HORUCA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO02
KSCALE	:KONSTANTY1.RO03
MEAS	:SCITANIE2.RO04

AIN blok USEK3STENA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO01
MEAS	:SCITANIE2.RO03

AIN blok USEK3STENA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO02
MEAS	:SCITANIE3.RO01

AIN blok USEK3STU1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO01
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE2.RO02

AIN blok USEK3STU2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO02
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE2.RO04

AIN blok USEK4HORUCA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO03
KSCALE	:KONSTANTY1.RO01
MEAS	:SCITANIE2.RO03

AIN blok USEK4HORUCA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO02
KSCALE	:KONSTANTY1.RO03
MEAS	:SCITANIE3.RO03

AIN blok USEK4STENA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO01
MEAS	:SCITANIE3.RO02

AIN blok USEK4STENA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO02
MEAS	:SCITANIE3.RO02

AIN blok USEK4STU1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO01
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE3.RO01

AIN blok USEK4STU2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO02
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE3.RO03

AIN blok USEK5HORUCA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO03
KSCALE	:KONSTANTY1.RO01
MEAS	:SCITANIE3.RO02

AIN blok USEK5HORUCA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY1.RO02
KSCALE	:KONSTANTY1.RO03
MEAS	:SCITANIE4.RO02

AIN blok USEK5STENA1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO01
MEAS	:SCITANIE4.RO01

AIN blok USEK5STENA2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONT1T2.RO02
KSCALE	:KONZ21Z23T3.RO02
MEAS	:SCITANIE4.RO03

AIN blok USEK5STU1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO01
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE3.RO04

AIN blok USEK5STU2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONSTANTY2.RO02
KSCALE	:KONSTANTY2.RO03
MEAS	:SCITANIE4.RO02

AIN blok OHREV1

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONOHREV.RO01
KSCALE	1
MEAS	:SCITANIE4.RO01

AIN blok OHREV2

Parametre	Adresa/Hodnota
FLOP	1
IOMPT	2
FTIM	:KONOHREV.RO01
KSCALE	:KONOHREV.RO02
MEAS	:SLAVE.OUT

Príloha C

PIDA blok MASTER

Parametre	Adresa/Hodnota	Popis
MEAS	:SCITANIE4.RO03	Theta35
SPT	0.0	Setpoint - posielané z displeja
BCALCI	:SLAVE1.BCALCO	Počiatočná hodnota výstupu
FBK	:SLAVE1.BCALCO	Na zabránenie wind-up efektu
MODOPT	4	PI regulátor
PBAND	1000.0	Zosilnenie posielané z displeja
INT	100.0	Časová konštanta posielaná z displeja
PRIBLK	0	Primárny PIDA regulátor
HSCI	100.0	Horná hranica vstupu
LSCI	0.0	Dolná hranica vstupu
HSCO	300.0	Horná hranica výstupu
LSCO	0.0	Dolná hranica výstupu

PIDA blok SLAVE1

Parametre	Adresa/Hodnota	Popis
MEAS	:SCITANIE5.RO01	Theta11
RSP	:MASTER.OUT	Vzdialený (pomocný) setpoint
BCALCI	:SLAVE1.OUT	Počiatočná hodnota výstupu
FBK	:SLAVE1.OUT	Na zabránenie wind-up efektu
LR	1	Vzdialený vstup (vstupom je RSP)
MODOPT	1	P regulátor
PBAND	1000.0	Zosilnenie posielané z displeja
PRIBLK	1	Sekundárny PIDA regulátor
HSCI	300.0	Horná hranica vstupu
LSCI	0.0	Dolná hranica vstupu
HSCO	25000.0	Horná hranica výstupu
LSCO	0.0	Dolná hranica výstupu

Príloha D

FBTUNE blok ADAP

Parametre	Adresa/Hodnota	Popis
PIDBLK	:MASTER.BLKSTA	