

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

**RIADENIE TECHNOLOGICKÉHO PROCESU
V RIADIACOM SYSTÉME FOXBORO
DIPLOMOVÁ PRÁCA**

FCHPT-5414-22412

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

**RIADENIE TECHNOLOGICKÉHO PROCESU
V RIADIACOM SYSTÉME FOXBORO
DIPLOMOVÁ PRÁCA**

FCHPT-5414-22412

Študijný program: Automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 automatizácia
Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov
Vedúci záverečnej práce/školiťel': Ing. Katarína Matejičková

Bratislava 2010

Bc. Mário Briš



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Mário Briš**
ID študenta: 22412
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 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. Mário Briš
Študent




prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska


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

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať vedúcej diplomovej práce Ing. Kataríne Matejičkovej za pripomienky a odborné vedenie, ktoré mi poskytla v priebehu diplomovej práce.

Čestné prehlásenie

Čestne prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne, podľa pokynov vedúceho práce a s použitím zdrojov uvedených v literatúre.

V Bratislave, 12. mája 2010

.....

Podpis

Súhrn

Diplomová práca sa zaoberá návrhom dvojkapacitného súprúdového rúrkového výmenníka tepla a jeho riadením v jednoduchom a rozvetvenom regulačnom obvode v riadiacom systéme FOXBORO. Výmenník tepla je naprogramovaný v integrovanom riadiacom konfigurátore cez diferenciálne rovnice pomocou blokov *LLAG* a *CALCA*. Riadi sa pomocou *PIDA* a *FBTUNE* blokov a prepínanie riadenia sa uskutočňuje cez *SWCH* bloky. Bloky sú navzájom prepojené tak, aby sa parametre regulátorov pre naprogramovaný výmenník tepla vypočítali predladením a upravili adaptívnym ladením v *FBTUNE* bloku. Ovládanie a sledovanie parametrov sa uskutočňuje cez vytvorené užívateľské obrazovky a každá z obrazoviek obsahuje alarmy informatívneho charakteru vo forme textu a farebných signálov.

Kľúčové slová : FOXBORO, adaptívne riadenie, kaskádové riadenie

Abstract

The diploma thesis deals with the design of two-capacitive downstream tubular heat exchanger and its controlling by a simple and branched regulatory circuit of the control system Foxboro. The heat exchanger is programmed in an integrated control configurator using differential equations which are created and calculated in blocks LLAG and CALCA, It is controlled by PIDA and FBTUNE blocks and control switching is performed by SWCH blocks. The blocks are interconnected in such a way that the controller parameters for heat exchanger can be calculated by pretuning and adjusted by adaptive tuning in FBTUNE block. Controlling and monitoring of the parameters is being performed via created user screens and each screen includes an informative-nature alarms in a text form and color signals.

Keywords : FOXBORO, adaptive control, cascade control

Obsah

Zoznam obrázkov.....	8
Zoznam tabuliek.....	9
Zoznam príloh.....	9
Zoznam použitých symbolov	10
Úvod	11
1. Formulácia úlohy	12
2. Teoretická časť	13
2.1. Rúrkový výmenník tepla a jeho vlastnosti.....	13
2.1.1. Usporiadanie prúdov výmenníka tepla	14
2.1.2. Teplotný profil výmenníka tepla	14
2.2. Súprudové usporiadanie výmenníka tepla	15
2.2.1. Dynamický matematický model (DMM)	17
2.2.2. Matematický model rovnovážneho stavu (MMRS)	19
2.2.3. Sledovanie dynamiky po diskretizácií	20
2.3. Adaptívne riadenie.....	21
2.4. Rozvetvené regulačné obvody	22
3. Praktická časť	24
3.1. Výpočet rovnovážneho stavu.....	24
3.2. Sledovanie dynamiky po úsekoch v MATLABe	25
3.3. Jednoduchý regulačný obvod	27
3.4. Rozvetvený (viacsľučkový) regulačný obvod.....	29
3.4.1. Sekundárny regulačný obvod	30
3.4.2. Primárny regulačný obvod.....	32
3.5. Dvojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla vo FOXBORO	34
3.5.1. ICC - Dvojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla	34
3.5.2. Jednoduchý regulačný obvod vo FOXBORO	36
3.5.3. Rozvetvený regulačný obvod vo FOXBORO	41
3.5.4. Foxdraw - vizualizačné prostredie.....	43
3.6. Vyhodnotenie.....	49
4. Záver	57
Zoznam použitej literatúry	59
Prílohy	60

Zoznam obrázkov

Obr. 1 : Schéma rúrkového výmenníka tepla.....	12
Obr. 2 : Rúrkový výmenník tepla	13
Obr. 3 : Schéma troch možných usporiadaní vzájomnej orientácie prúdov	14
Obr. 4 : Teplotné profily súprúdového a protiprúdového výmenníka tepla	15
Obr. 5 : Simulačná schéma po úsekoch cez matice LSO.....	21
Obr. 6 : Adaptívne riadenie.....	22
Obr. 7 : Kaskádová regulácia.....	23
Obr. 8 : Teplotný profil VT v ustálenom stave	25
Obr. 9 : Teplotný profil v 5. úseku VT v ustálenom stave.....	26
Obr. 10 : Simulačná schéma na sledovanie dynamiky vytvorená z S-funkcií.....	26
Obr. 11 : Identifikácia systému pre jednoduchý regulačný obvod	27
Obr. 12 : Schéma jednoduchého regulačného obvodu.....	28
Obr. 13 : Bloková schéma na identifikáciu sekundárneho obvodu	30
Obr. 14 : Identifikácia systému pre vnútornú slučku.....	31
Obr. 15 : Simulačná schéma porovnania systémov pre vnútornú slučku	31
Obr. 16 : Simulačná schéma sekundárneho regulačného obvodu.....	32
Obr. 17 : Identifikácia systému pre vonkajšiu slučku.....	33
Obr. 18 : Simulačná schéma porovnania systémov pre vonkajšiu slučku	33
Obr. 19 : Simulačná schéma kaskádového riadenia.....	34
Obr. 20 : Schéma zapojenia <i>CALCA</i> a <i>LLAG</i> blokov	36
Obr. 21 : Schéma zapojenia regulátora k VT vo <i>FOXBORO</i>	37
Obr. 22 : Pripojenie <i>FBTUNE</i> k <i>PIDA</i> bloku	37
Obr. 23 : Aplikácia parametrov z <i>FBTUNE</i> do <i>PIDA</i> bloku	38
Obr. 24 : Nastavenia <i>FBTUNE</i> bloku	39
Obr. 25 : Zapojenie <i>PIDA</i> blokov pri kaskádovom riadení	42
Obr. 26 : <i>SWCH</i> blok	43
Obr. 27 : Riadiaca obrazovka VT pre jednoduchý regulačný obvod.....	44
Obr. 28 : Riadiaca obrazovka VT pre rozvetvený regulačný obvod.....	44
Obr. 29 : Riadiaca obrazovka s trendovými grafmi pre jednoduchý regulačný obvod	45
Obr. 30 : Riadiaca obrazovka s trendovými grafmi pre rozvetvený regulačný obvod	45
Obr. 31 : Možnosti nastavenia v záložke <i>Action</i>	46
Obr. 32 : Možnosti <i>Add Operator Action</i>	47
Obr. 33 : Možnosti nastavenia v záložke <i>Update</i>	48

Obr. 34 : Použitie <i>Group</i> a <i>Visibility</i>	49
Obr. 35 : Alarmy	49
Obr. 36 : Teplotný profil na výstupe z 5. úseku v MATLABe a FOXBORO	50
Obr. 37 : Priebeh riadenej veličiny v jednoduchom regulačnom obvode	52
Obr. 38 : Priebeh riadiacej veličiny v jednoduchom regulačnom obvode	52
Obr. 39 : Priebeh riadenia sekundárneho regulačného obvodu	54
Obr. 40 : Priebeh riadenia primárneho regulačného obvodu	55
Obr. 41 : Kaskádová regulácia pri vzniknutej poruche	56

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 : Parametre VT a médií	12
Tabuľka 2 : Konštanty	24
Tabuľka 3 : Teploty VT v ustálenom stave	24
Tabuľka 4 : Parametre regulátora	29
Tabuľka 5 : Parametre sekundárneho regulátora	32
Tabuľka 6 : Parametre primárneho regulátora	34
Tabuľka 7 : Vypočítané parametre regulátora blokom FBTUNE	41
Tabuľka 8 : Vypočítané parametre regulátorov pre kaskádové riadenie	43
Tabuľka 9 : Teploty v ustálených stavoch	50
Tabuľka 10 : Kvalita riadenia jednoduchého regulačného obvodu v MATLABe	51
Tabuľka 11 : Klasické ukazovatele kvality riadenia v jednoduchom regulačnom obvode	51
Tabuľka 12 : Vyhodnotenie kvality riadenia sekundárneho regulačného obvodu	53

Zoznam príloh

CALCA bloky	60
LLAG bloky	66
SWCH bloky	66
PIDA bloky	67
FBTUNE bloky	68

Zoznam použitých symbolov

D_1	[m]	vnútorný priemer vnútornej rúrky
D_2	[m]	vonkajší priemer vnútornej rúrky
D_3	[m]	priemer vonkajšej rúrky
L	[m]	dĺžka rúrky výmenníka
δ	[m]	hrúbka vnútornej rúrky
λ	[W/mK]	tepelná vodivosť rúrky
α_s	[W/m ² K]	koeficient prestupu tepla prúdením zo steny do petroleja
α_h	[W/m ² K]	koeficient prestupu tepla prúdením z vody do steny
ρ	[kg/m ³]	hustota rúrky
c_p	[J/kgK]	špecifická tepelná kapacita rúrky
T_h	[min]	časová konštanta horúceho média
T_s	[min]	časová konštanta studeného média
ω_h	[m/min]	rýchlosť prúdenia horúceho média
ω_s	[m/min]	rýchlosť prúdenia studeného média
a_h, b_h	[-]	vypočítané konštanty pre horúce médium
a_s, b_s	[-]	vypočítané konštanty pre studené médium
v_h	[°C]	teplota horúceho média
v_s	[°C]	teplota studeného média
Z_r	[-]	zosilnenie regulátora
P	[-]	proporcionálna zložka regulátora
$T_I (I)$	[min]	integračná časová konštanta
$T_D (D)$	[min]	derivačná časová konštanta
KD	[min]	časová konštanta filtra
$SPLLAG$	[-]	zosilnenie setpointu
t_{reg}	[min]	čas regulácie
δ_{max}	[%]	maximálne preregulovanie
t_δ	[min]	čas maximálneho preregulovania
ise	[-]	integrál štvorca regulačnej odchýlky
iae	[-]	integral absolútnej regulačnej odchýlky

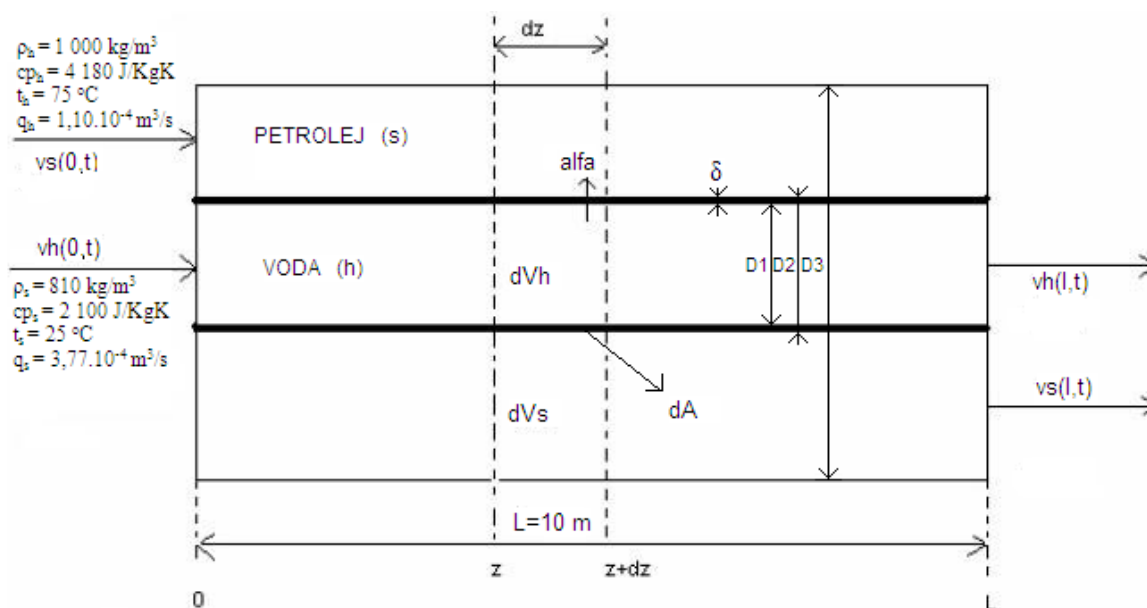
Úvod

V diplomovej práci som sa zaoberal decentralizovaným riadiacim systémom FOXBORO. Tento systém v súčasnosti patrí do skupiny najznámejších systémov, ktorých úlohou je efektívne riadenie technologických procesov. Efektívne riadenie procesov zlepšuje schopnosť predvídať, riadiť, reagovať na zmeny podmienok v systéme a maximálne tak využiť možnosti aké nám daný systém poskytuje. Správne riadenie procesov môže tiež redukovať neefektívnosť daného procesu a chyby vyplývajúce z danej neefektívnosti, taktiež nám efektívne riadenie procesov umožňuje zvýšiť bezpečnosť daného procesu. Riadiaci systém FOXBORO I/A Series System bol vytvorený, aby splňal potreby automatizácie u komplikovaných integrovaných systémov, ktoré riadia kritické operácie, vyžadujú nepretržitú prevádzku a dokonalú bezpečnosť. FOXBORO I/A Series System je kombináciou flexibility, bezpečnosti a vysokej úrovne zosieťovania. I/A Series siete ponúkajú plné riadenie a ochranu pred komunikáciou s chybnými bodmi siete. Systém otvorenej architektúry a zabudovanie priemyselných štandardov umožňujú určiť pre užívateľov najlepšiu stratégiu siete vzhľadom na ich informačné a riadiace požiadavky a ciele [1].

Na vytvorenie dvojkapacitného súprúdového rúrkového výmenníka tepla v riadiacom systéme FOXBORO I/A series systém som vytvoril *Compound* a v ňom použil *LLAG* bloky, kde jeden *LLAG* blok predstavuje jednu diferenciálnu rovnicu a *CALCA* bloky na výpočty parametrov do *LLAG* blokov. Ako regulátor som použil *PIDA* bloky a parametre regulátora sa na základe identifikácie počítali v *FBTUNE* bloku. Prepínanie medzi jednoduchým a rozvetveným regulačným obvodom som zabezpečil prostredníctvom *SWCH* blokov. Vytvorený *Compound* s blokmi sa musí po vytvorení aktivovať cez prostredie *Foxview*. V prostredí *Foxdraw* som vytvoril dve užívateľské obrazovky pre každý z regulačných obvodov. Objekty na užívateľských obrazovkách sú nakonfigurované na špecifické akcie (tlačidlá) a zobrazovanie údajov alebo alarmov. Na ukladanie údajov som použil archív, ktorý sa vytvorí v prostredí *Historian Configurator*, aktivuje v *Historian Manager* a uložené údaje sa získavajú z *AIM Historian Data Display*.

1. Formulácia úlohy

Cieľom diplomovej práce je vytvoriť model dvojkapacitného súprudového rúrkového výmenníka tepla (ďalej len VT) a vytvoriť na jeho riadenie jednoduchý a rozvetvený regulačný obvod v riadiacom systéme FOXBORO. VT (obr. 1) má nasledovné parametre :



Obr. 1 : Schéma rúrkového výmenníka tepla

Parametre potrebné na modelovanie VT sú zadané v tabuľke 1 :

Tabuľka 1 : Parametre VT a médií

D_1 [m]	0,025
δ [m]	0,0015
D_2 [m]	0,028
λ [W/mK]	395
ρ [kg/m ³]	8 930
cp [J/kgK]	385
D_3 [m]	0,05
L [m]	10
α_s [W/m ² K]	750
α_h [W/ m ² K]	1 480

2. Teoretická časť

2.1. Rúrkový výmenník tepla a jeho vlastnosti

Výmenníky tepla sú určené na ohrev alebo chladenie materiálových prúdov na žiadanú teplotu na danom medzistupni výroby. Ohrevným médiom vo výmenníkoch tepla bývajú spaliny, vodná para, teplonosné kvapaliny, roztavené soli alebo kovy a technologické prúdy s vyššou entalpiou, ktoré sa podrobujú chladeniu. Chladiacim médiom býva najčastejšie voda, vzduch, soľanka a technologické prúdy s nízkou entalpiou, ktoré sa podrobujú ohrevu. Špeciálnym druhom chladiacich médií sú chladivá, t.j. chladiace média chladiacich zariadení. Nevýhodou nasýtenej vodnej pary, ako ohrevného média, sú nároky na pevnosť zariadenia, pokiaľ sa pracuje s teplotami vyššími ako 100 °C. Najrozšírenejším druhom výmenníka tepla je výmenník rúrka v rúrke (obr. 2) a kotlový výmenník tepla. V oboch druhoch, jedno médium prúdi v rúrke alebo v rúrkach a druhé v medzirúrkovom priestore.

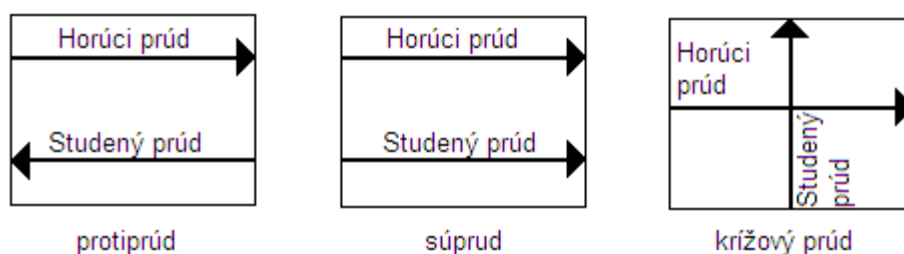


Obr. 2 : Rúrkový výmenník tepla

Z iných druhov výmenníka tepla sú v praxi rozšírené jednoduché nádoby s miešadlom a plášťom alebo rúrkovým hadom, špirálové výmenníky tepla a doskové výmenníky. Vo všetkých spomenutých druhoch výmenníkov tepla sa horúce médium nestýka bezprostredne so studeným, ale média sú od seba oddelené tuhú stenou [2].

2.1.1. Usporiadanie prúdov výmenníka tepla

Dôležitou charakteristikou výmenníkov tepla je vzájomná orientácia smerov prúdenia médií vo výmenníku. Od usporiadania smerov prúdenia médií závisí v značnej miere teplotný profil výmenníka tepla a teda jeho výkon. Ak smer prúdenia jedného z médií vzhľadom na smer prúdenia druhého média sa zachováva pozdĺž celého výmenníka, ide o výmenník s jedným vnútorným a jedným vonkajším chodom. Obe média vo výmenníku prúdia navzájom rovnobežne a súhlasným smerom, výmenník je súprúdový. Ak je vzájomné smerovanie prúdov opačné, výmenník je protiprúdový. Ak médiá neprúdia rovnobežne a smery prúdenia sa križujú, výmenník má krížové usporiadanie prúdov, ako to schematicky uvádza obrázok 3.



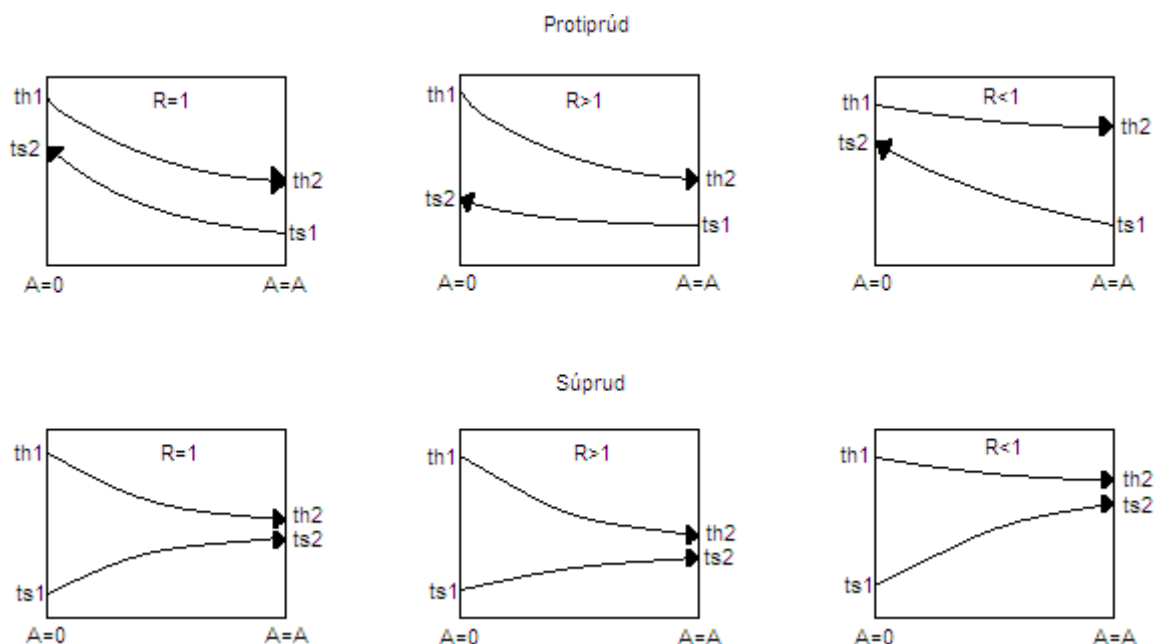
Obr. 3 : Schéma troch možných usporiadaní vzájomnej orientácie prúdov

Ak smer prúdenia vnútorného média sa zmení jeden krát o 180°C , kým smer prúdenia vonkajšieho média sa nezmení, ide o výmenník s dvomi vnútornými chodmi a jedným vonkajším chodom. Takýto kotlový výmenník tepla patrí k najfrekvencovanejším výmenníkom. Zložitejšie usporiadania prúdov vznikajú, ak za účelom získania väčšej teplovýmennej plochy sa navzájom spojí viacero výmenníkov tepla [2].

2.1.2. Teplotný profil výmenníka tepla

Priebeh teplôt jednotlivých médií pozdĺž príslušného teplovýmenného povrchu je teplotný profil výmenníka tepla. Teplotný profil výmenníka závisí predovšetkým od druhu výmenníka, od usporiadania prúdov a od ich tepelných kapacít. Obrázok 4 uvádza 6 možných teplotných profilov výmenníka tepla, pre výmenu tepla bez fázovej premeny v médiách a to

tri možnosti pre súprúdové usporiadanie a tri pre protiprúdové, v závislosti od podielu tepelných kapacít prúdov R .



Obr. 4 : Teplotné profily súprúdového a protiprúdového výmenníka tepla

Zo schematického znázornenia priebehu závislostí $t = t(A)$, pričom $dA > 0$ v smere prúdenia horúceho média, je vidieť, že hnacia sila vo výmenníku, t.j. rozdiel teplôt horúceho a studeného média podlieha väčším zmenám pri súprúdovom usporiadaní, ako pri protiprúdovom. V praxi sa častejšie volí protiprúdové usporiadanie, pri ktorom výstupná teplota studeného média môže byť vyššia, ako výstupná teplota horúceho média. Súprúdové usporiadanie je v praxi skôr výnimkou a používa sa vtedy, keď k tomu nútia technologické alebo iné hľadiská, nesúvisiace s prechodom tepla [2].

2.2. Súprúdové usporiadanie výmenníka tepla

V každom výmenníku tepla jedno z médií má vyššiu teplotu a nazývame ho horúcim médiom, kým druhé médium má v zodpovedajúcom priereze výmenníka nižšiu teplotu a nazývame ho studeným médiom. Horúce médium budem označovať indexom h a studené médium indexom s . Pre odvodenie dynamického matematického modelu VT (všeobecne) som zaviedol zjednodušujúce predpoklady, a to:

-
- systém nekoná prácu, z čoho vyplýva, že energetická bilancia sa stane len entalpickou bilanciou
 - pri ohrievaní studeného média alebo chladení horúceho média nedochádza k fázovej premene, t.j. tlak v systéme je konštantný. Zmena entalpie Δh sa bude rovnať zmene tepla ΔQ , takže entalpická bilancia sa stane tepelnou bilanciou.
 - straty tepla do okolia sú zanedbateľné, pretože predpokladám, že výmenník tepla je dokonale izolovaný
 - prestup tepla sa bude realizovať len prúdením, a to len v smere kolmom na smer prúdenia kvapaliny
 - vedenie a žiarenie tepla v kvapaline sú zanedbateľné
 - tepelné kapacity stien všetkých rúrok sú zanedbateľné
 - konštantné parametre sú : hustoty (ρ_h, ρ_s), špecifické tepelné kapacity (cp_h, cp_s), koeficient prestupu tepla prúdením (α), element plochy prestupu tepla (dA), elementy objemu (dV_h, dV_s)
 - rovnaké referenčné teploty pre všetky členy bilancií
 - tok kvapaliny sa bude chovať ako piestový a vlastnosti sa menia v dynamickom stave len v smere toku kvapaliny (z) a v čase (t).
 - DMM sa získa bilanciou elementu systému o dĺžke dz . Entalpická bilancia elementu systému s prestupom tepla (všeobecne) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{tepelné toky} \\ \text{do elementu} \\ \text{systému} \\ \text{vstupujúce} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{tepelné toky} \\ \text{z elementu} \\ \text{systému} \\ \text{vystupujúce} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{rýchlosť akumulácie} \\ \text{tepla} \\ \text{v elemente} \\ \text{systému} \end{array} \right\}$$

2.2.1. Dynamický matematický model (DMM)

Tepelná bilancia VT podľa obrázka 1 pre element systému :

- horúce médium

$$\dot{Q}_h(z, t) = \dot{Q}_h(z + dz, t) + \dot{Q}_{hs}(z, t) + \frac{\partial Q_h(z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

- studené médium

$$\dot{Q}_s(z, t) + \dot{Q}_{hs}(z, t) = \dot{Q}_s(z + dz, t) + \frac{\partial Q_s(z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

Po vyjadrení :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_h(z, t) &= \dot{m}_h c p_h \mathcal{G}_h(z, t) = q_h \rho_h c p_h \mathcal{G}_h(z, t) \\ \dot{Q}_h(z + dz, t) &= \dot{m}_h c p_h \mathcal{G}_h(z + dz, t) = q_h \rho_h c p_h \left[\mathcal{G}_h(z, t) + \frac{\partial \mathcal{G}_h(z, t)}{\partial t} dz \right] \\ Q_h(z, t) &= dV_h \rho_h c p_h \mathcal{G}_h(z, t) \\ \dot{Q}_{hs}(z, t) &= \alpha dA (\mathcal{G}_h(z, t) - \mathcal{G}_s(z, t)) \\ \dot{Q}_s(z, t) &= \dot{m}_s c p_s \mathcal{G}_s(z, t) = q_s \rho_s c p_s \mathcal{G}_s(z, t) \\ \dot{Q}_s(z + dz, t) &= \dot{m}_s c p_s \mathcal{G}_s(z + dz, t) = q_s \rho_s c p_s \left[\mathcal{G}_s(z, t) + \frac{\partial \mathcal{G}_s(z, t)}{\partial t} dz \right] \\ Q_s(z, t) &= dV_h \rho_h c p_h \mathcal{G}_h(z, t) \end{aligned} \quad (3)$$

kde α je koeficient prechodu tepla pre VT sa vypočítal zo vzťahu

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_h} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s}} \quad (4)$$

a dosadením rovnice (3) do rovníc (1) a (2) a následnou úpravou je DMM VT opísaný dvoma lineárnymi parciálnymi diferenciálnymi rovnicami

- horúce médium

$$\frac{dV_h \rho_h c p_h}{\alpha dA} \frac{\partial \mathcal{G}_h(z, t)}{\partial t} + \frac{q_h \rho_h c p_h dz}{\alpha dA} \frac{\partial \mathcal{G}_h(z, t)}{\partial z} = -\mathcal{G}_h(z, t) + \mathcal{G}_s(z, t) \quad (5)$$

Na jej riešenie potrebujeme dva typy podmienok :

- začiatočná podmienka : $\mathcal{G}_h(z, t = 0) = \mathcal{G}_h(z, 0) = \mathcal{G}_h^s(z)$
- okrajová podmienka : $\mathcal{G}_h(z = 0, t) = \mathcal{G}_h(0, t) = \mathcal{G}_{h,0}(t)$

-
- studené médium

$$\frac{dV_s \rho_s c p_s}{\alpha dA} \frac{\partial \vartheta_s(z, t)}{\partial t} + \frac{q_s \rho_s c p_s dz}{\alpha dA} \frac{\partial \vartheta_s(z, t)}{\partial z} = \vartheta_h(z, t) - \vartheta_s(z, t) \quad (6)$$

Na jej riešenie potrebujeme dva typy podmienok :

- začiatočná podmienka : $\vartheta_s(z, t = 0) = \vartheta_s(z, 0) = \vartheta_s^s(z)$
- okrajová podmienka : $\vartheta_s(z = 0, t) = \vartheta_s(0, t) = \vartheta_{s,0}(t)$

DMM VT má tvar lineárneho stavového opisu systému so spojito rozloženými parametrami s nenulovými začiatočnými podmienkami, kde :

- stavové veličiny : $\vartheta_h(z, t), \vartheta_s(z, t)$
- vstupné veličiny : $\vartheta_{h,0}(t), \vartheta_{s,0}(t)$

Výstupné veličiny sú tie, ktoré sa na procese sledujú a môžu byť definované rôzne.

- výstupné veličiny : $\vartheta_h(z, t), \vartheta_s(z, t)$ alebo $\vartheta_h(z = l, t) = \vartheta_{h,n}(t), \vartheta_s(z = l, t) = \vartheta_{s,n}(t)$

Určenie časových konštánt T_h, T_s z rovnice (5) a (6)

$$T_h = \frac{dV_h \rho_h c p_h}{\alpha dA} \quad (7)$$

$$T_s = \frac{dV_s \rho_s c p_s}{\alpha dA}$$

a rýchlostí prúdenia ω_h, ω_s z rovníc (5) a (6)

$$\frac{q_h \rho_h c p_h dz}{\alpha dA} \cdot \frac{dV_h}{dV_h} = T_h \cdot \frac{q_h}{S_h} = T_h \omega_h \Rightarrow \omega_h = \frac{q_h}{S_h} \quad (8)$$

$$\frac{q_s \rho_s c p_s dz}{\alpha dA} \cdot \frac{dV_s}{dV_s} = T_s \cdot \frac{q_s}{S_s} = T_s \omega_s \Rightarrow \omega_s = \frac{q_s}{S_s}$$

Čím bude časová konštanta T_h, T_s menšia, tým bude výstupná odozva rýchlejšia a rýchlosť prúdenia ω_h, ω_s udáva rýchlosť kvapalín v potrubí. Zavedením týchto konštánt sa zároveň zjednoduší tvar diferenciálnych rovníc.

Po zavedení časových konštánt T_h, T_s a rýchlostí prúdenia ω_h, ω_s z rovníc (7) a (8) do rovníc (5) a (6) získam DMM v tvare :

$$\begin{aligned}
T_h \frac{\partial \mathcal{G}_h(z,t)}{\partial t} + T_h \omega_h \frac{\partial \mathcal{G}_h(z,t)}{\partial z} &= -\mathcal{G}_h(z,t) + \mathcal{G}_s(z,t) \\
T_s \frac{\partial \mathcal{G}_s(z,t)}{\partial t} + T_s \omega_s \frac{\partial \mathcal{G}_s(z,t)}{\partial z} &= \mathcal{G}_h(z,t) + \mathcal{G}_s(z,t)
\end{aligned} \tag{9}$$

Na jej riešenie potrebujeme dva typy podmienok pre horúce médium :

- začiatočná podmienka : $\mathcal{G}_h(z, t = 0) = \mathcal{G}_h(z, 0) = \mathcal{G}_h^s(z)$
- okrajová podmienka : $\mathcal{G}_h(z = 0, t) = \mathcal{G}_h(0, t) = \mathcal{G}_{h,0}(t)$

a dva typy podmienok pre studené médium :

- začiatočná podmienka : $\mathcal{G}_s(z, t = 0) = \mathcal{G}_s(z, 0) = \mathcal{G}_s^s(z)$
- okrajová podmienka : $\mathcal{G}_s(z = 0, t) = \mathcal{G}_s(0, t) = \mathcal{G}_{s,0}(t)$

2.2.2. Matematický model rovnovážneho stavu (MMRS)

MMRS VT je opísaný 2 obyčajnými lineárnymi diferenciálnymi rovnicami v tvare

$$\begin{aligned}
T_h \omega_h \frac{d\mathcal{G}_h^s(z)}{dz} &= -\mathcal{G}_h^s(z) + \mathcal{G}_s^s(z) \\
T_s \omega_s \frac{d\mathcal{G}_s^s(z)}{dz} &= \mathcal{G}_h^s(z) + \mathcal{G}_s^s(z)
\end{aligned} \tag{10}$$

Rovnovážny stav sa rieši 2 obyčajnými diferenciálnymi rovnicami, ktoré opisujú rovnovážny stav a diskretizáciou. VT o dĺžke l sa rozdelí na n -úsekov o dĺžke Δz $n = \frac{l}{\Delta z}$ a spraví sa náhrada derivácie podľa z v i -tom úseku spätnou diferenciou

$$\begin{aligned}
\left. \frac{d\mathcal{G}_h^s(z)}{dz} \right|_i &\approx \left. \frac{\Delta \mathcal{G}_h^s(z)}{\Delta z} \right|_i = \frac{\mathcal{G}_h^s(z_i) - \mathcal{G}_h^s(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} = \frac{\mathcal{G}_{h,i}^s - \mathcal{G}_{h,i-1}^s}{\Delta z} \\
\left. \frac{d\mathcal{G}_s^s(z)}{dz} \right|_i &\approx \left. \frac{\Delta \mathcal{G}_s^s(z)}{\Delta z} \right|_i = \frac{\mathcal{G}_s^s(z_i) - \mathcal{G}_s^s(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} = \frac{\mathcal{G}_{s,i}^s - \mathcal{G}_{s,i-1}^s}{\Delta z}
\end{aligned} \tag{11}$$

Po dosadení do rovnice (10), úprave a definovaní konštánt a_h, b_h, a_s a b_s

$$\begin{aligned}
a_h &= \frac{T_h \omega_h}{\Delta z} + 1, \quad b_h = \frac{T_h \omega_h}{\Delta z} \\
a_s &= \frac{T_s \omega_s}{\Delta z} + 1, \quad b_s = \frac{T_s \omega_s}{\Delta z}
\end{aligned} \tag{12}$$

dostaneme MMRS pre i -tý úsek v tvare :

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{h,i}^s &= \frac{b_h}{a_h} \mathcal{G}_{h,i-1}^s + \frac{1}{a_h} \mathcal{G}_{s,i}^s \\ \mathcal{G}_{s,i}^s &= \frac{b_s}{a_s} \mathcal{G}_{s,i-1}^s + \frac{1}{a_s} \mathcal{G}_{h,i}^s \end{aligned} \quad i=1,\dots,n \quad (13)$$

2.2.3. Sledovanie dynamiky po diskretizácii

Po diskretizácii derivovanej zložky v_h a v_s podľa z v rovnici (9) DMM, úprave a použití definovaných konštánt a_h , b_h , a_s a b_s dostaneme DMM pre i -tý úsek v tvare :

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{G}_{h,i}(t)}{dt} &= -\frac{a_h}{T_h} \mathcal{G}_{h,i}(t) + \frac{b_h}{T_h} \mathcal{G}_{h,i-1}(t) + \frac{1}{T_h} \mathcal{G}_{s,i}(t) & \mathcal{G}_{h,i}(t=0) &= \mathcal{G}_{h,i}(0) = \mathcal{G}_{h,i}^s \\ \frac{d\mathcal{G}_{s,i}(t)}{dt} &= -\frac{a_s}{T_s} \mathcal{G}_{s,i}(t) + \frac{b_s}{T_s} \mathcal{G}_{s,i-1}(t) + \frac{1}{T_s} \mathcal{G}_{h,i}(t) & \mathcal{G}_{s,i}(t=0) &= \mathcal{G}_{s,i}(0) = \mathcal{G}_{s,i}^s \end{aligned} \quad (14)$$

kde $i=1,\dots,n$.

Na simuláciu dynamických vlastností po úsekoch zadefinujeme veličiny pre i -tý úsek

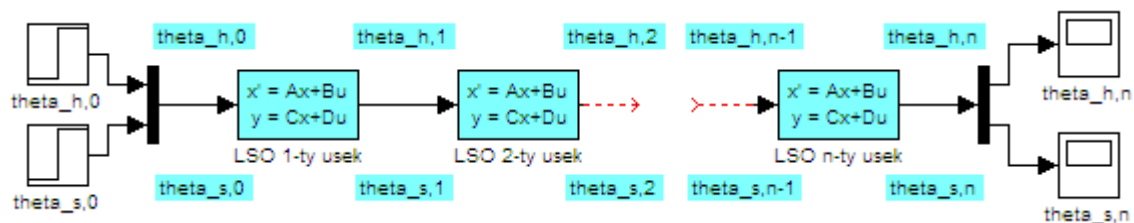
- stavové veličiny : $\mathcal{G}_{h,i}(t)$, $\mathcal{G}_{s,i}(t)$
- vstupné veličiny : $\mathcal{G}_{h,i-1}(t)$, $\mathcal{G}_{s,i-1}(t)$
- výstupné veličiny : $\mathcal{G}_{h,i}(t)$, $\mathcal{G}_{s,i}(t)$

a vytvoríme matice A, B, C, D stavového opisu pre zvolené výstupné veličiny

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{a_h}{T_h} & \frac{1}{T_h} \\ \frac{1}{T_s} & -\frac{a_s}{T_s} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{b_h}{T_h} & 0 \\ 0 & \frac{b_s}{T_s} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

a začiatočné podmienky sú vypočítané z MMRS.

Schéma zapojenia blokov State-Space v MATLABe na simuláciu dynamických vlastností po úsekoch je znázornená na obrázku 5 [3].



Obr. 5 : Simulačná schéma po úsekoch cez matice LSO

2.3. Adaptívne riadenie

Vyššie formy riadenia (ďalej VFR) sa uplatňujú v oblastiach kde sa klasické riadiace metódy ukazujú ako nevyhovujúce. Systémy, ktoré sa radia do oblasti VFR musia obsahovať prvky optimalizácie, adaptácie, učenia sa VFR sa používajú vtedy, keď nie sú k dispozícii úplne informácie o riadenom systéme.

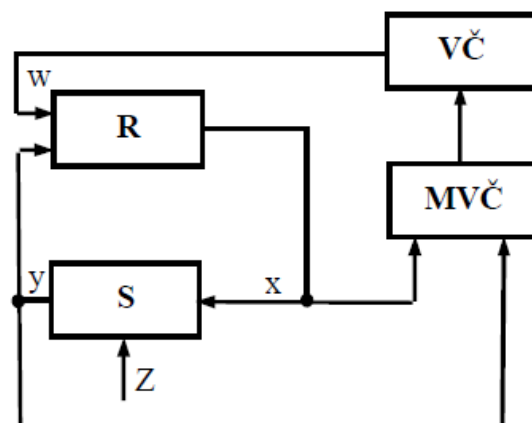
Základné typy vyšších foriem riadenia

- Optimálne riadenie
- Adaptívne riadenie
- Učiace sa systémy
- Evolučný systém riadenia

Adaptívne riadenie

Regulované sústavy sú systémy dynamické, čo spôsobuje že s časom môžu meniť svoje vlastnosti. Môžu nastať prípady kedy riadiaci algoritmus, ktorý bol na začiatku kvalitný sa zhoršuje až do miery kedy bude algoritmus riadenia nedostatočný. Adaptívne riadenie je také riadenie, kedy sa regulátor samočinne prispôsobuje nepredvídateľným premenným podmienkam v nám stanovených podmienkach kvality. V súčasnosti existujú regulátory (adaptívne regulátory), ktoré sa dokážu prispôbovať meniacim sa podmienkam a zaistiť kvalitu regulácie. Akčná a regulovaná veličina sú odmeriavané a vyhodnocované v meracom a vyhodnocovacom člene (najčastejšie PC), kde požadované zmeny parametrov vykonáva výkonný člen (obr. 6) [4].

R- regulátor
 S – regulovaná sústava
 VČ – výkonný člen
 MVČ – merací a vyhodnocovací člen



Obr. 6 : Adaptívne riadenie

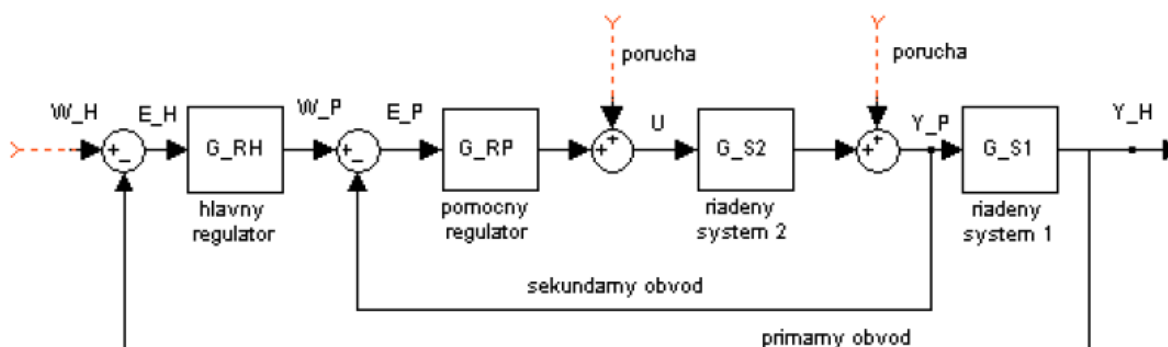
2.4. Rozvetvené regulačné obvody

Nie všetky problémy riadenia v praxi sa dajú vyriešiť jednoduchými regulačnými obvodmi. Ide o problémy spôsobené výskytom porúch a problémy spôsobené veľkým dopravným oneskorením. Tieto problémy možno riešiť pomocou rozvetvených (viacsľučkových) regulačných obvodov. Takéto obvody okrem základného spätnoväzbového obvodu riadenia obsahujú ešte

- obvod s pomocnou riadenou veličinou
- obvod s doprednou kompenzáciou poruchy
- priamu väzbu
- obvod s kompenzáciou dopravného oneskorenia

V zložitých riadených systémoch alebo v prípade výskytu porúch je ťažké dosiahnuť uspokojivý výsledok riadenia pomocou jednoduchého regulačného obvodu. Jednou z možností ako riešiť problém najmä výskytu nemerateľných porúch je použitie rozvetveného regulačného obvodu s pomocnou riadenou veličinou, ktorého bloková schéma je na obrázku 6. Takéto riešenie je možné vtedy, ak sa riadený systém aspoň formálne dá rozdeliť na dve časti. Výstupom z jednej časti riadeného systému s prenosom G_{S2} je pomocná riadená veličina y_P a výstupom z ďalšej časti s prenosom G_{S1} je hlavná riadená veličina y_H . Hlavná riadená veličina sa porovná s hlavnou žiadanou veličinou w_H hlavného – primárneho regulačného obvodu a hlavná regulačná odchýlka e_H je vstupom do hlavného regulátora G_{RH} . Hlavný regulátor na jej základe generuje pomocnú žiadanú veličinu w_P pre pomocný –

sekundárny regulačný obvod. Pomocná žiadaná veličina w_P sa porovná s pomocnou riadenou veličinou y_P a pomocná regulačná odchýlka e_P je vstupom do pomocného regulátora G_{RP} , ktorý určuje zmenu akčnej veličiny u , ktorú treba vykonať na vstupe do riadenej sústavy. Rozdelenie riadenej sústavy na dve časti sa robí tak, aby pomocná riadená veličina rýchlejšie reagovala na zmeny akčnej veličiny než hlavná riadená veličina. Pomocná riadená veličina sa volí tak, aby sekundárny obvod čo najtesnejšie obopínal poruchovú veličinu. Hlavný regulátor býva zvyčajne PI regulátor, pomocný regulátor môže byť P regulátor. Bloková schéma kaskádovej regulácie je na obrázku 7 [5].



Obr. 7 : Kaskádová regulácia

Výhody kaskádovej regulácie:

- rozdelením riadenej sústavy na dve jednoduchšie sa zjednodušuje problém navrhovania regulátorov (jednoduchšia štruktúra, jednoduchšie nastavenie)
- v prípade použitia len P regulátorov sa dosiahne menšia trvalá regulačná odchýlka
- odozva regulačného procesu sa urýchli
- zvýši sa stabilita regulačného procesu
- poruchové veličiny, ktoré pôsobia na vstupe do prvej časti riadeného systému, sa vyregulujú už pomocným regulátorom a ich vplyv na hlavnú riadenú veličinu sa redukuje
- poruchové veličiny môžu byť nemerateľné
- obmedzuje sa pôsobenie nelinearit v sekundárnom obvode
- regulácia sa môže uvádzať do prevádzky smerom zvnútra von. Redukujú sa tým riziká vyvolané chybnými zapojeniami.

3. Praktická časť

3.1. Výpočet rovnovážneho stavu

Na sledovanie dynamiky VT po úsekoch v MATLABe, som vypočítal z rovníc (7), (8) a (12) časové konštanty T_h , T_s , konštanty rýchlosti prúdenia ω_h , ω_s a konštanty a_h , b_h , a_s , b_s , ktoré som zapísal do tabuľky 2.

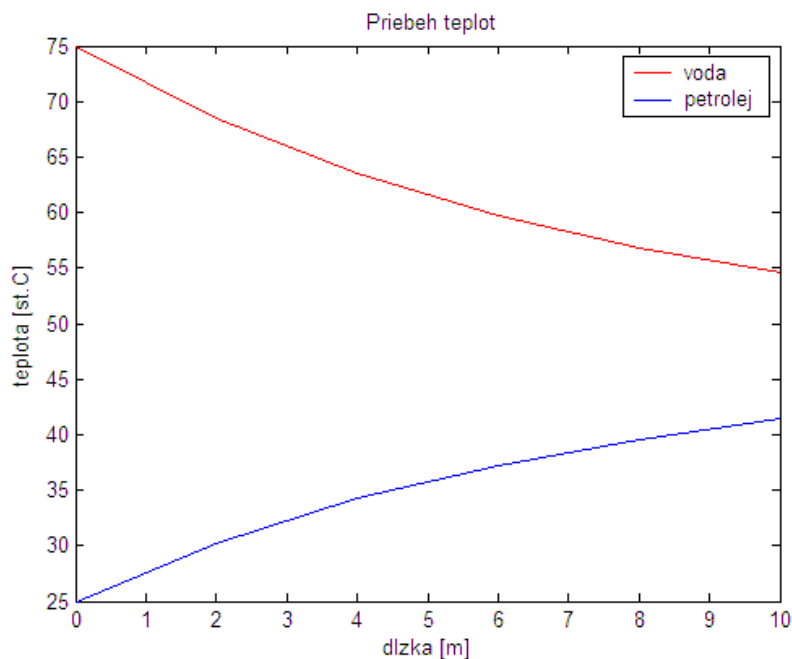
Tabuľka 2 : Konštanty

konštantá	[min]	konštantá	[m/min]	konštantá	[-]	konštantá	[-]
T_h	1,9719	ω_h	5,9757	a_h	6,8918	b_h	5,8918
T_s	0,5573	ω_s	26.3320	a_s	8,3369	b_s	7,3369

Z rovnice (13) som vypočítal ustálený stav pre 1. – 5. úsek, teploty zapísal do tabuľky 3 a graficky zobrazil teplotný profil v ustálenom stave (obr. 8).

Tabuľka 3 : Teploty VT v ustálenom stave

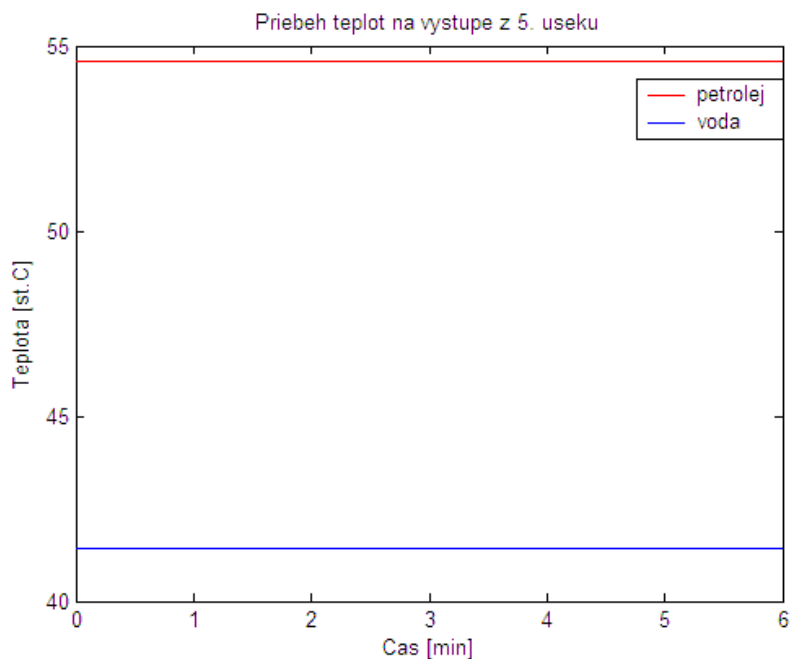
úsek [2 m]	v_h [°C]	v_s [°C]
0	75,00	25,00
1	68,50	30,22
2	63,53	34,21
3	59,72	37,27
4	56,80	39,62
5	54,57	41,41



Obr. 8 : Teplotný profil VT v ustálenom stave

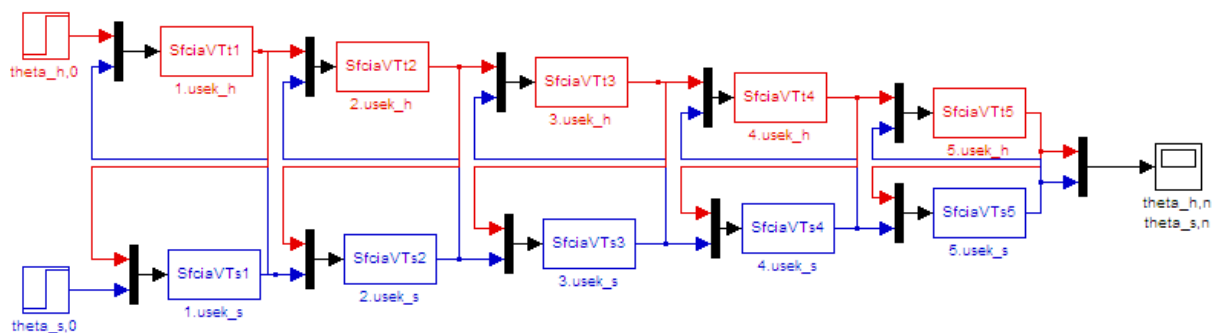
3.2. Sledovanie dynamiky po úsekoch v MATLABe

Na sledovanie dynamiky VT som pre každý úsek vytvoril matice A, B, C, D lineárneho stavového opisu (LSO) podľa rovnice (15) pre zvolené výstupné veličiny a začiatočné podmienky zodpovedali vypočítaným ustáleným stavom. V MATLABe som vložil 5 State-Space blokov, do ktorých som zapísal matice LSO s ustálenými stavmi a vzájomne prepojil (obr. 5). Správnosť nastavenia a prepojenia blokov som overil simuláciou v ustálenom stave. Ak boli teploty na výstupe z jednotlivých úsekov VT rovné čiary a ich hodnoty sa zhodovali s teplotami v ustálenom stave, tak matice boli nastavené správne a bloky správne prepojené (obr. 9).



Obr. 9 : Teplotný profil v 5. úseku VT v ustálenom stave

Model VT som následne vytvoril z piatich blokov S-function. Každá z S-funkcií obsahovala jednu diferenciálnu rovnicu pre horúce médium a jednu diferenciálnu rovnicu pre studené médium podľa rovnice (14). Vytvorené modely som navzájom porovnal a overil, či model z S-funkcií je správne vytvorený. Ďalej som musel každú z diferenciálnych rovníc vložiť do samostatného bloku S-function, čím vzrástol počet blokov o dvojnásobok (obr. 10).



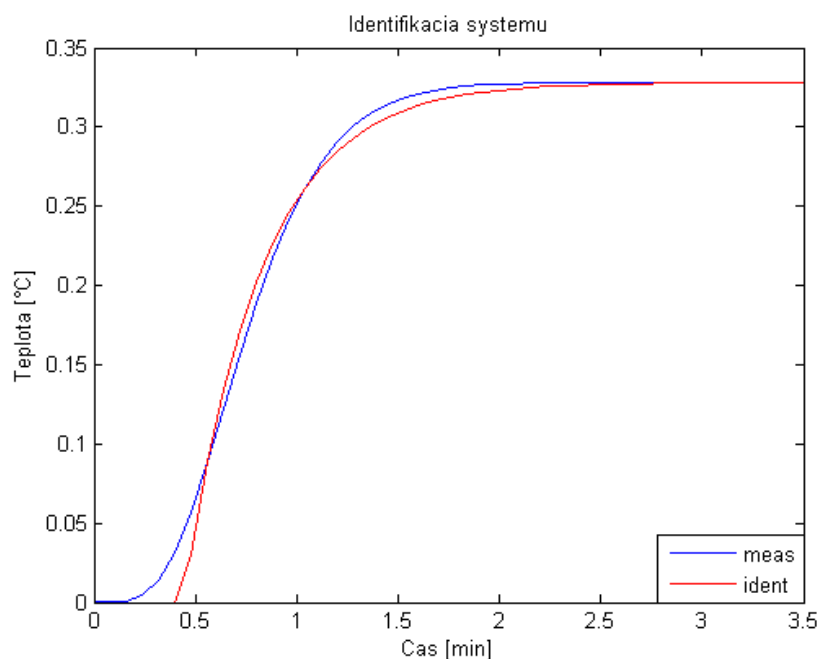
Obr. 10 : Simulačná schéma na sledovanie dynamiky vytvorená z S-funkcií

Zo schémy vidieť, že vypočítaná teplota horúceho média je vstupnou hodnotou na výpočet studeného média a naopak. Model som odsimuloval a porovnal s predchádzajúcimi, čím som si overil, že aj posledný vytvorený model je správny. Posledný model (obr. 10) mi poslužil

ako schéma na vytvorenie modelu VT v riadiacom systéme FOXBORO, v ktorom sa do jedného *LLAG* bloku dá zapísať len jedna diferenciálna rovnica.

3.3. Jednoduchý regulačný obvod

Vo VT je studené médium riadenou veličinou a horúce médium riadiacou veličinou. Na výpočet regulátora musím poznať prenos systému a ten som získal identifikáciou odozvy systému pri skokovej zmene riadiacej veličiny (obr. 11).



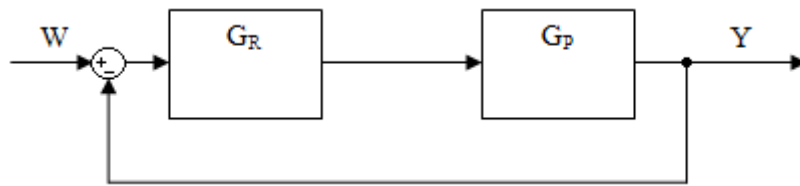
Obr. 11 : Identifikácia systému pre jednoduchý regulačný obvod

Prenos identifikovaného systému je v tvare

$$G(s) = \frac{0,3282}{0,373s + 1} e^{(-0,4435s)} \quad (16)$$

Suma štvorcov odchýliek : $ss = 0,0031$

Pre získaný prenos vypočítam parametre PID regulátora a vytvorím jednoduchý regulačný obvod (obr. 12).



Obr. 12 : Schéma jednoduchého regulačného obvodu

V prípade použitia vypočítaných parametrov regulátora do riadiaceho systému FOXBORO bolo nutné odvodiť závislosť medzi jeho štruktúrou regulátora a štruktúrou v MATLABe. V rovniciach PI regulátorov nezodpovedá parameter zosilnenia Z_r v MATLABe parametru zosilnenia P vo FOXBORO. Odvodeniu rovníc som sa venoval v bakalárskej práci ([6]).

Rovnica PID regulátora vo FOXBORO (NIPID – Non-Interactive PID) je v tvare :

$$G_R(s) = \frac{100}{P} \left(\left(\frac{1}{Is} + A \right) r - \left(\frac{1}{Is} + 1 + Ds \right) c_f \right) \quad (17)$$

kde r je žiadaná hodnota W a c_f je výstupná veličina Y , v ktorej už je aplikovaná aj konštanta filtra KD . Potom môžem napísať

$$G_R(s) = \frac{100}{P} \left(\left(\frac{1}{Is} + A \right) W - \left(\frac{1}{Is} + 1 + Ds \right) Y \right) \quad (18)$$

Úpravou a následným porovnaním so štruktúrou regulátora v MATLABe som zistil vzťahy medzi jednotlivými parametrami a to

$$\frac{100}{P} \left(1 + \frac{1}{Is} + Ds \right) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + Ds \right) \quad (19)$$

$$\frac{100}{P} = Z_R \quad (20)$$

$$I = T_I \quad (21)$$

$$D = T_D \quad (22)$$

Rovnica PID regulátora s interakciou vo FOXBORO (PID) je v tvare

$$G_R(s) = \frac{100}{P} \left(\left(\frac{1}{Is} + A \right) r - \left(\frac{1}{Is} + 1 \right) (1 + Ds) c_f \right) \quad (23)$$

kde r je žiadaná hodnota W a c_f je výstupná veličina Y , v ktorej už je aplikovaná aj konštanta filtra KD . Potom môžeme rovnicu napísať v tvare

$$G_R(s) = \frac{100}{P} \left(\left(\frac{1}{I_s} + A \right) W - \left(\frac{1}{I_s} + 1 \right) (1 + Ds) Y \right) \quad (24)$$

Úpravou a následným porovnaním so štruktúrou regulátora v MATLABe sú vzťahy rovnaké ako pri regulátore bez interakcie (NIPID).

$$\frac{100}{P} \left(1 + \frac{1}{I_s} \right) (1 + Ds) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) (1 + T_D s) \quad (25)$$

V prípade, že parameter $D = 0$, tak PD a PID regulátor vo FOXBORO pracuje ako P a PI regulátor.

Po odvodení rovníc (20), (21) a (22) som pristúpil k návrhu PID regulátora. Na výpočet regulátora som použil 5 experimentálnych metód a jeden regulátor vypočítal PID blok v MATLABe. Parametre regulátora som zapísal do tabuľky 4.

Tabuľka 4 : Parametre regulátora

	Zr	T _I [min]	T _D [min]	KD
Cohen-Coon	4,1785	0,7710	0,1326	-
Ziegler-Nicholson	3,0751	0,8870	0,2218	-
Priama syntéza	2,4351	0,5948	0,0896	-
Smith, Murrill	2,5270	0,6011	0,1354	-
Rivera, Morari	3,0487	0,5957	0,1394	-
PID blok	3,8952	0.6475	0,1457	270,7779

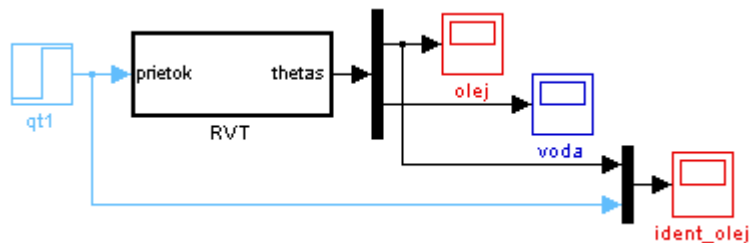
3.4. Rozvetvený (viacslučkový) regulačný obvod

Regulačný obvod sa skladá okrem základného spätnoväzbového obvodu aj z obvodu s pomocnou riadenou veličinou. Úloha riadenia sa rozdelí na dve časti tým, že sa okrem hlavnej riadenej veličiny určí aj pomocná riadená veličina. Hlavnou riadenou veličinou zostane teplota studeného média a za pomocnú riadenú veličinu sa zvolí prietok horúceho média. To znamená, že regulačný obvod musí mať dva regulátory. Hlavný regulátor bude riadiť teplotu studeného média pomocou horúceho média a podľa teploty horúceho média

nastaví požadovanú hodnotu jeho prietoku. Teda ak napr. meraná teplota studeného média je nižšia ako žiadaná hodnota, hlavný regulátor zvýši požadovanú hodnotu prietoku horúceho média. Pomocný regulátor bude riadiť prietok horúceho média a jeho úlohou je zabezpečiť také pootvorenie regulačného ventilu, aby sa dosiahol požadovaný prietok. Akčným členom je opäť regulačný ventil.

3.4.1. Sekundárny regulačný obvod

Pri návrhu regulátora pre sekundárny regulačný obvod som vychádzal z vytvorenej simulačnej schémy VT v MATLABe (obr. 13).

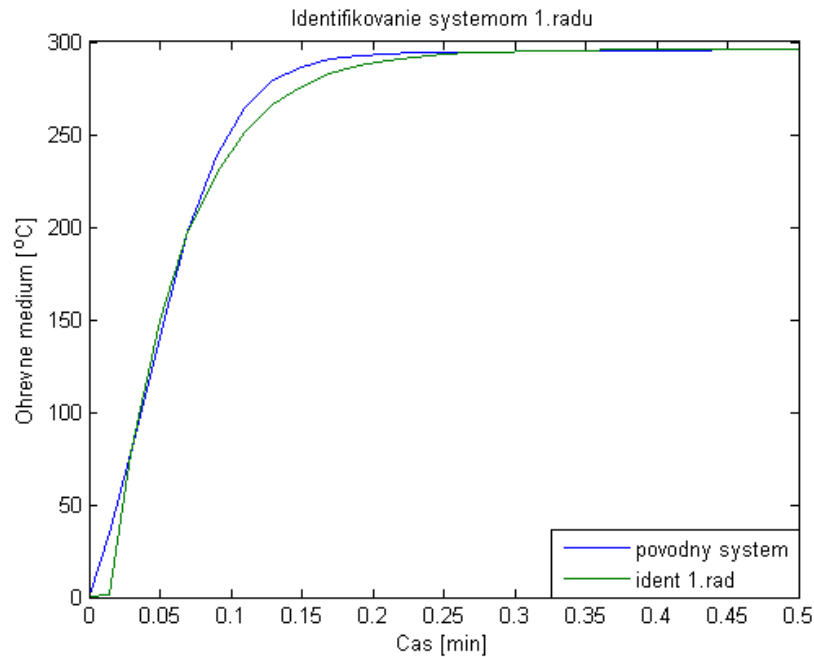


Obr. 13 : Bloková schéma na identifikáciu sekundárneho obvodu

V systéme som zvýšil prietok horúceho média o 10-násobok a sledoval jeho odozvu teploty na výstupe z VT. Výslednú PCH som znormoval, identifikoval ako systém prvého rádu a porovnal s pôvodným systémom pri jednotkovom skoku (obr. 14).

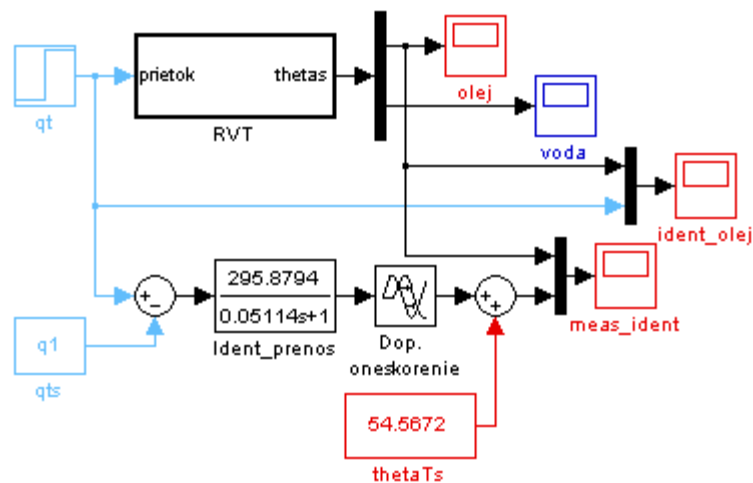
Prenos identifikovaného systému je v tvare

$$G_2(s) = \frac{295,8794}{0,05114s + 1} e^{-0.0146 \text{ min}} \quad (26)$$



Obr. 14 : Identifikácia systému pre vnútornú slučku

PCH pôvodného systému a náhradného systému nie je úplne zhodná, ale môžeme uvažovať, že systém je prvého rádu s dopravným oneskorením. Simulačnú schému na porovnanie PCH pri skokovej zmene som zobrazil na obrázku 15.



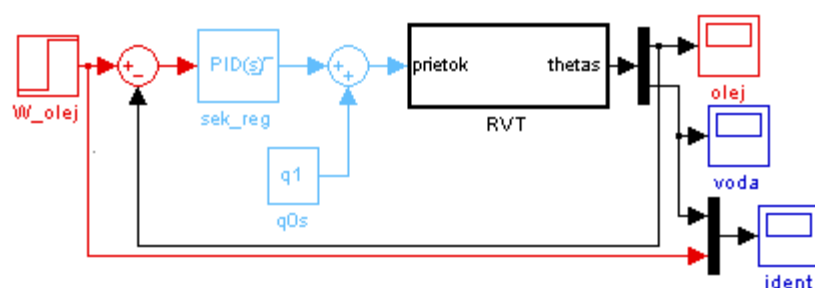
Obr. 15 : Simulačná schéma porovnania systémov pre vnútornú slučku

Po identifikovaní vnútornej slučky som navrhol parametre regulátora. Pre návrh parametrov regulátora som použil rovnaké metódy ako pri návrhu regulátora v jednoduchom regulačnom obvode a ich parametre zapísal do tabuľky 5.

Tabuľka 5 : Parametre sekundárneho regulátora

	Zr	T _I [min]
Ziegler-Nicholson	0,0107	0,0486
Cohen-Coon	0,0109	0,0306
Priama syntéza	0,0029	0,0511
Smith, Murrill	0,0062	0,0520
Rivera, Morari	0,0198	0,0584

Stabilitu riadenia systému sekundárnym regulačným obvodom pre vypočítané parametre regulátora som overil v simulačnej schéme (obr. 16).



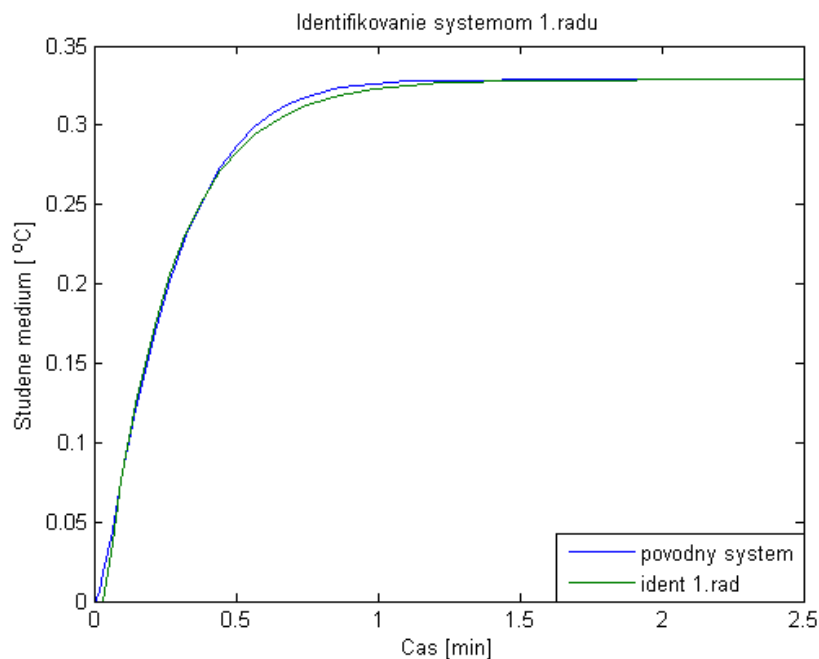
Obr. 16 : Simulačná schéma sekundárneho regulačného obvodu

3.4.2. Primárny regulačný obvod

Pri návrhu primárneho regulačného obvodu som vychádzal z navrhnutého sekundárneho regulačného obvodu (obr. 16). Vstupnou veličinou je teplota horúceho média a sledovanou veličinou je teplota studeného média. Na základe skokovej zmeny horúceho média som systém opäť znormoval, identifikoval prvým rádom a porovnal s pôvodným systémom pri jednotkovom skoku (obr. 17).

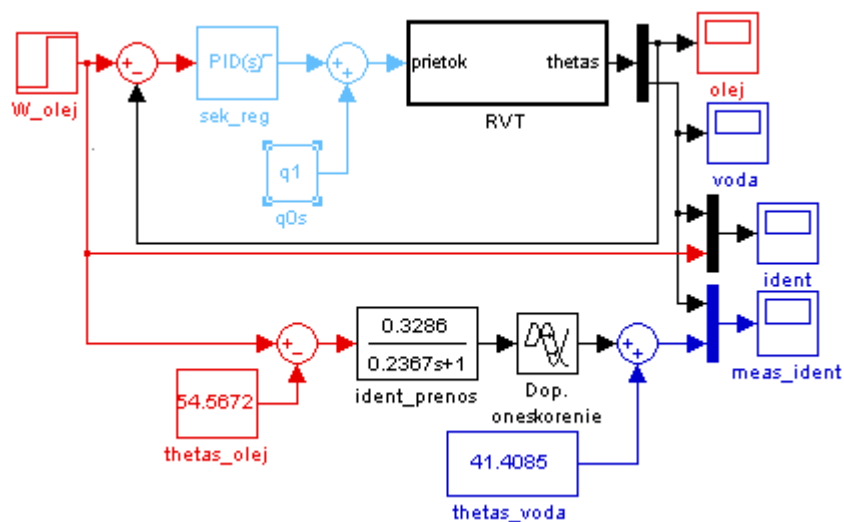
Prenos identifikovaného systému je v tvare

$$G_2(s) = \frac{0,3286}{0,2367s + 1} e^{-0,0343 \text{ min}} \quad (27)$$



Obr. 17 : Identifikácia systému pre vonkajšiu slučku

PCH pôvodného systému a náhradného prenosu opäť nie je úplne zhodná, ale môžeme uvažovať, že systém je taktiež prvého rádu s dopravným oneskorením. Simulačnú schému na porovnanie PCH pri skokovej zmene som zobrazil na obrázku 18.



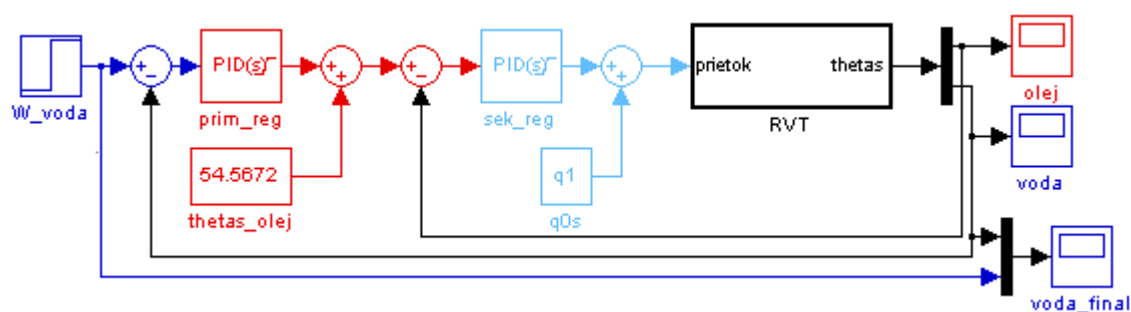
Obr. 18 : Simulačná schéma porovnania systémov pre vonkajšiu slučku

Na výpočet parametrov regulátora pre vonkajšiu slučku som použil dve metódy a zapísal do tabuľky 6.

Tabuľka 6 : Parametre primárneho regulátora

	Zr	T ₁ [min]
Priama syntéza	2,2705	0,2181
Rivera, Morari	1,3633	0,2445

Stabilitu riadenia primárneho regulačného obvodu pre vypočítané parametre regulátora som overil v simulačnej schéme (obr. 19).



Obr. 19 : Simulačná schéma kaskádového riadenia

3.5. Dvojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla vo FOXBORO

FOXBORO I/A Series System je kombináciou flexibility, bezpečnosti a vysokej úrovne zosieťovania. I/A Series siete ponúkajú plne redundantné riadenie a ochranu pred komunikáciou s chybnými bodmi siete. Systém otvorenej architektúry a zabudovanie priemyselných štandardov umožňujú určiť pre užívateľov najlepšiu stratégiu siete vzhľadom na ich informačné a riadiace požiadavky, a ciele [1]. FOXBORO I/A Series System sa skladá z niekoľkých častí. K práci som využil *Integer Control Configure (ICC)*, vizualizačné prostredie *Foxview*, *Foxselect*, históriu *AIM Archív Toolbox* a grafické prostredie *Foxdraw* na tvorbu užívateľských obrazoviek.

3.5.1. ICC - Dvojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla

Na vytvorenie VT v *ICC* som použil 15 *CALCA* blokov a 10 *LLAG* blokov. Tri *CALCA* bloky s názvom *Vypocty1*, *Vypocty2* a *Vypocty3* počítajú časové konštanty T_h , T_s , rýchlosti prúdenia ω_h , ω_s podľa rovníc (7) a (8) a úhrnný koeficient prechodu tepla α a dva

CALCA bloky s názvom *Prepocet1* a *Prepocet3* prepočítavali jednotky zo sekúnd na minúty, pretože model musí byť vytvorený v minútach. 5 CALCA blokov (*TEPCALCA1-5*) počíta vstupy do LLAG blokov (*TEPLA1-5*) pre horúce médium a 5 CALCA blokov (*STUDENA1-5*) vstupy do LLAG blokov pre studené médium (*STUDCALCA1-5*). Každý LLAG blok predstavuje jednu diferenciálnu rovnicu, a preto je potrebné mať 5 pre horúce médium a 5 pre studené médium. Rovnica LLAG bloku má tvar

$$y + LAGTIM \frac{dy}{dt} + LAGTIM.LAG2 \frac{d^2 y}{dt^2} = x + LGAIN.LAGTIM \frac{dx}{dt} \quad (28)$$

Podľa rovnice (28) som upravil rovnicu (14) do tvaru

- Horúce médium

$$\mathcal{G}_{h,i}(t) + \frac{T_h}{a_h} \frac{d\mathcal{G}_{h,i}(t)}{dt} = \frac{b_h}{a_h} \mathcal{G}_{h,i-1}(t) + \frac{1}{a_h} \mathcal{G}_{s,i}(t) \quad (29)$$

- Studené médium

$$\mathcal{G}_{s,i}(t) + \frac{T_s}{a_s} \frac{d\mathcal{G}_{s,i}(t)}{dt} = \frac{b_s}{a_s} \mathcal{G}_{s,i-1}(t) + \frac{1}{a_s} \mathcal{G}_{h,i}(t) \quad (30)$$

kde $i=1,...,5$

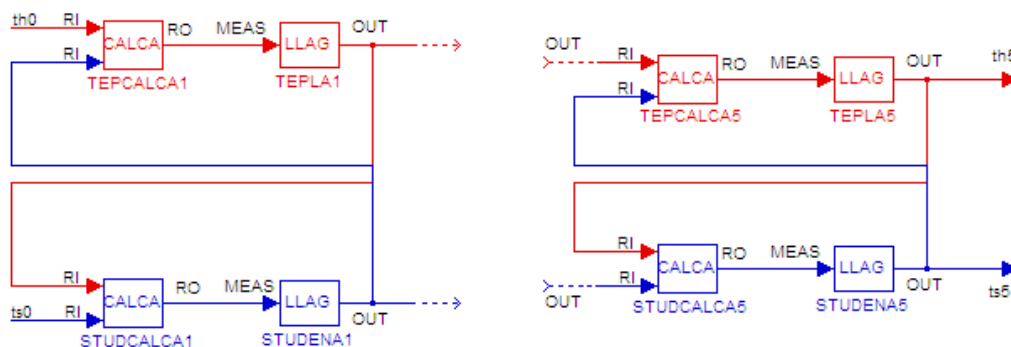
Z rovníc (29) a (30) vyplýva, že parameter *LAGTIM* sa nastaví na hodnotu $\frac{T_h}{a_h}$ pre

horúce médium a $\frac{T_s}{a_s}$ pre studené médium. Parameter x , ktorý predstavuje vstup do LLAG

bloku sa nastaví ako hodnota $\frac{b_h}{a_h} \mathcal{G}_{h,i-1}(t) + \frac{1}{a_h} \mathcal{G}_{s,i}(t)$ pre horúce médium,

$\frac{b_s}{a_s} \mathcal{G}_{s,i-1}(t) + \frac{1}{a_s} \mathcal{G}_{h,i}(t)$ pre studené médium a zapíše v LLAG bloku do parametra *MEAS*.

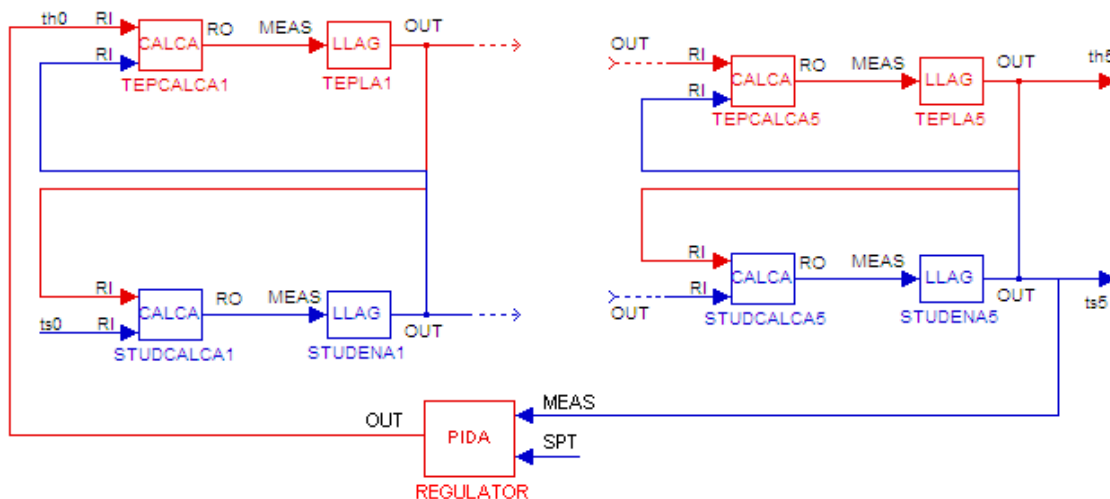
Zvyšné parametre z rovnice (28) sa v bloku nastaví na hodnotu 0 a upraví sa hranica maximálneho vstupu a výstupu bloku. Vytvorené bloky som navzájom prepočil a schematicky znázornil na obrázku 20.



Obr. 20 : Schéma zapojenia CALCA a LLAG blokov

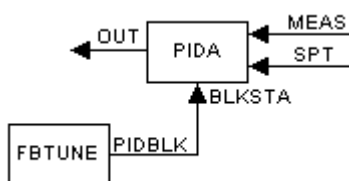
3.5.2. Jednoduchý regulačný obvod vo FOXBORO

Z regulátorov, ktoré riadiaci systém FOXBORO poskytuje som použil *PIDA* blok a pomenoval *PIDA_TEPLOTA*. Ten po nastavení parametra *MODOPT* určí, o aký typ regulátora pôjde. Medzi hlavné parametre, ktoré je nutné nastaviť sú *MEAS* (meraná veličina), v prípade aktivovania alarmov (*MALOPT* a *HHAOPT*), nastavenie horných hraníc alarmov (*MEASHL* a *HHALIM*) alebo dolných hraníc alarmov (*MEASLL* a *LLALIM*) a hranice meranej (*HSCII* a *LSCII*) a výstupnej veličiny (*HSCO1* a *LSCO1*). Parametre regulátora *P*, *I*, *D*, *SpIlg* a *KD* nie je nutné nastavovať, pretože ich vypočíta *FBTUNE* blok alebo sa nastaví priamo z užívateľskej obrazovky podľa potreby. Parameter *MODOPT* som nastavil na hodnotu 6 (*NIPID*), čomu zodpovedá PID regulátor bez interakcie. Do parametra *SPT* sa zapisuje žiadaná hodnota riadenej veličiny a do parametra *MEAS* adresa riadenej veličiny, čo je teplota studeného média na výstupe z 5. úseku (*STUDENA5.OUT*). Všetky parametre, ktoré som v *PIDA* bloku nastavoval sa nachádzajú v *Prílohe*. Na obrázku 21 je schematické znázornenie zapojenia regulátora do vytvoreného VT vo FOXBORO.



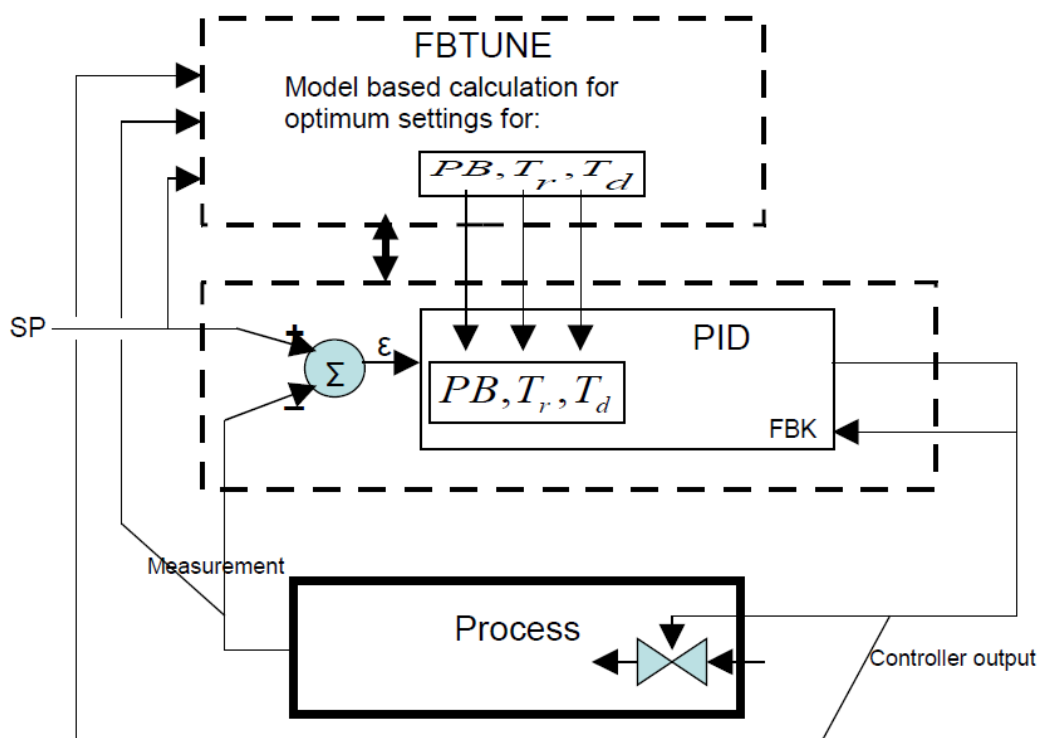
Obr. 21 : Schéma zapojenia regulátora k VT vo FOXBORO

Na výpočet parametrov regulátora som použil *FBTUNE* blok. Blok sa pripája k *PIDA* bloku cez parameter *PIDA.BLKSTA* s adresou na parameter *FBTUNE.PIDBLK* a môže byť pripojený a odpojený aj keď *PIDA* blok práve beží (obr. 22).



Obr. 22 : Pripojenie *FBTUNE* k *PIDA* bloku

Na obrázku 23 je znázornené prepojenie *FBTUNE* a *PIDA* bloku s riadeným procesom.



Obr. 23 : Aplikácia parametrov z *FBTUNE* do *PIDA* bloku

FBTUNE je blok, ktorý sa používa na výpočet parametrov regulátora a to predladením alebo adaptívnym ladením. Parametre, ktoré sa vypočítajú predladením nie sú vždy vhodné. V prípade, že ide o systém 1. rádu, tak sú vypočítané parametre v poriadku. Pokiaľ ide o systém vyššieho rádu, tak tieto parametre je potrebné doladiť. Vtedy sa aspoň dočasne zapne adaptívne ladenie a vykoná niekoľko skokov v oboch smeroch. Ten na základe určených podmienok kvality vypočíta a nastaví nové parametre regulátora, pokiaľ riadený systém nebude tieto podmienky spĺňať. Riadený model VT, ktorý som namodeloval je tvorený z 5-tich *LLAG* blokov, takže pôjde o systém vyššieho ako prvého rádu. Predladenie som použil na výpočet približných parametrov regulátora a nechal doladiť adaptívnym ladením. Namiesto predladienia sa môžu použiť aj vypočítané parametre regulátora a následne doladiť parametre adaptívnym ladením, pokiaľ by riadenie nebolo optimálne. Po otvorení *FBTUNE* bloku v prostredí *Foxview*, sú k dispozícii 3 funkcie bloku a to *PRE-TUNE*, *SELF-TUNE* a *SELF-TUNE HOLD* (obr. 24).

PTNREQ: 0	ITMAX : 4.64	STNREQ: 1	STHREQ: 0
BMP : 10.00	ITMIN : 0.0547	PROGLT: 0.0000	PIDRCL: 0
DFCT : 1.00	PBMAX : 537.13	PROGUT: 0.0000	PM : 1000.00
THRESH: 1.00	PBMIN : 26.86	OVR : 0.1000	IM : 100.00
	PR_TYP: -0.0302	LIM : 80.00	DM : 0.0000
		PR_FL : 1	

Obr. 24 : Nastavenia *FBTUNE* bloku

PRE-TUNE znamená predladenie, v ktorom sa nastavujú parametre *BMP*, *DFCT*, *TRESH* a spúšťanie predladenia *PTNREQ*. Parameter *PTNREQ* (Pre-Tune Request) nadobúda hodnoty 0, 1 a 2, kde 0 znamená vypnuté, 1 v prípade, ak odozva systému pri skokovej zmene dosiahne 2,5 násobok hodnoty *THRESH* a hodnota 2 v prípade pomalých systémov (väčšinou výmenníky tepla), kedy sa nedosiahne 2,5 násobok hodnoty *THRESH*. Parameter *BMP* sa pohybuje v hodnotách od 50 po -50 a to podľa toho, či chceme aby sa skoková zmena uskutočnila smerom nahor alebo nadol. Je to výška pulzu ako % z výstupného rozsahu (*HSCOI*), ktorá bude použitá pri predladení. To znamená, že ak aktuálny výstup z regulátora je 70°C (teplota horúceho média), maximálna hodnota výstupu z regulátora je 250°C a *BMP* je na hodnote 10, tak aktuálna hodnota výstupu z regulátora sa najskôr zvýši o 25°C a potom zníži o 25°C. Takže z pôvodných 70°C stúpne na 95°C, dosiahne sa hodnote *THRESH* a potom klesne na 45°C. Parameter *DFCT* (*Derivative Factor*) určuje, ako bude predladenie počítat parametre regulátora pre *PIDA* blok a nadobúda hodnoty od 0 po 4.

- *DFCT* = 0, derivačná zložka bude eliminovaná, čiže len PI regulátor
- *DFCT* = 1, bude počítat optimálne ladenie regulátora pre *lag-delay* proces
- *DFCT* > 1, bude predpokladať *delay-lag-lag* proces (proces vyžadujúci veľký derivačný zásah).

Posledný parameter *THRESH* (*Threshold*) určuje šírku parametra *BMP* a jeho hodnota je v percentách. Je to percento z maximálnej hodnoty meranej veličiny a o túto hodnotu sa musí navýšiť (v prípade kladnej hodnoty *BMP*) aktuálna hodnota *MEAS* aby sa výstup z regulátora znížil o hodnotu *BMP*.

Predladenie vypočíta hodnoty pre nasledujúce *PIDA* parametre :

- *PIDA.PBAND*
- *PIDA.INT*
- *PIDA.DERIV*
- *PIDA.SPLLAG*
- *PIDA.KD*
- *PIDA.DTIME* (len pre *PITAU* a *PIDTAU*)
- *PIDA.DEVTIME* (len pre *PITAU* a *PIDTAU*, čas oneskorenia pre deviation alarm)

Pre *FBTUNE* blok v časti *SELF-TUNE* vypočíta hodnoty :

- *FBTUNE.PBMAX*
- *FBTUNE.PBMIN*
- *FBTUNE.INTMAX*
- *FBTUNE.INTMIN*
- *FBTUNE.PR_TYP*
- *FBTUNE.PR_FL*
- *FBTUNE.DFCT* (prepíše túto hodnotu)

Adaptívne ladenie sa spúšťa parametrom *STNREQ* (*Self-Tune Request*) a nadobúda hodnoty 0 (vypnuté) a 1 (zapnuté).

TYP je parameter určujúci očakávaný typ procesu :

- pre čisto oneskorený proces, *PR_TYP* by mal byť -4
- pre proces s oneskorením = lag, *PR_TYP* by mal byť 0
- ak má proces druhý lag (*lag-lag* proces), *PR_TYP* by mal byť medzi 0,3 a 1
- *PR_TYP* > 1 len pre procesy so záporným lag (otvorená nestabilná slučka).

Parameter je automaticky upravený predladením a bude sa nastavovať adaptívnym ladením pod podmienkou, že *PR_FL*=0 a *DFCT* < 1.

PR_FL (*Process Factor*) určuje typ adaptívneho ladenia

- *PR_FL* = 0, adaptívne ladenie bude používať metódu fuzzy interpoláciu pre PI a PID a bude upravovať hodnotu *PR_TYP*

-
- $PR_FL = 1$, vyvolá metódu algebraického ladenia založenú na získavaní hodnoty z PR_TYP a $DFCT$. PR_FL je automaticky nastavené na hodnotu 0, keď $DFCT > 1$ a $MODOPT > 5$ (PID)
 - $PR_FL = 2$, preruší nastavovanie ladiacich parametrov, ale povolí uložené ladiace nastavenia, ktoré majú byť aktivované na začiatku každej izolovanej odozvy, na základe parametra $PROG$ a smere odozvy.

OVR (*Overshoot*) je cieľová hodnota pre (absolútny) pomer medzi druhou a prvou chybou vrcholu. Môže mať hodnoty medzi 0 a 0,2. $FBTUNE$ blok bude tento parameter používať pre výpočet jeho optimálnych ladiacich parametrov pre $PIDA$ blok [7].

Posledná časť SELF-TUNE HOLD po nastavení parametra $STHREQ$ (*Self-Tune Hold Request*) na hodnotu 1 preruší adaptívne ladenie a nastaví parametre regulátora podľa hodnôt parametrov PM, IM a DM . Všetky parametre, ktoré sa vypočítajú, sú zapísané do pamäte a naspäť sa volajú cez parameter $PIDRCL$ (*PID Recall*) [8].

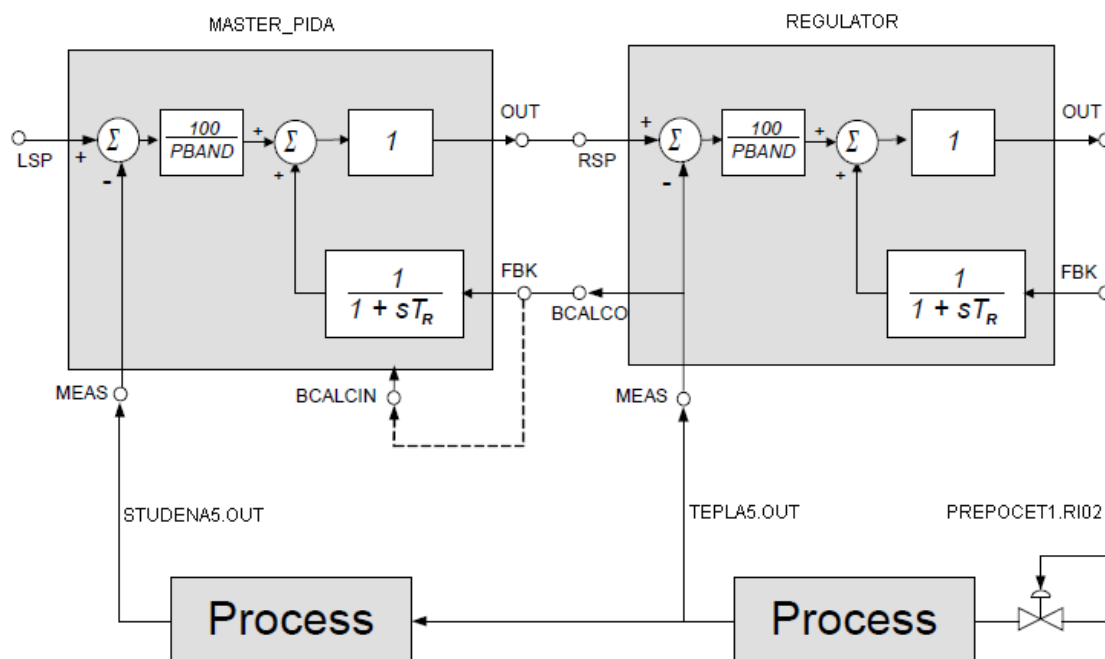
Vypočítané parametre regulátora $FBTUNE$ blokom som zapísal do tabuľky 7.

Tabuľka 7 : Vypočítané parametre regulátora blokom FBTUNE

P	83,30
I [min]	0,5643
D [min]	0,1040
KD	4,93
SPLLAG	0,43

3.5.3. Rozvetvený regulačný obvod vo FOXBORO

K vytvoreniu kaskádového riadenia som vložil ďalšie dva $PIDA$ bloky s názvom REGULATOR (sekundárny regulátor) a MASTER_PIDA (primárny regulátor). Bloky sú do procesu zapojené rovnakým spôsobom ako je popísané v kapitole 3.4.1 a 3.4.2 a ich vzájomné prepojenie vo FOXBORO je znázornené na obrázku 25.



Obr. 25 : Zapojenie *PIDA* blokov pri kaskádovom riadení

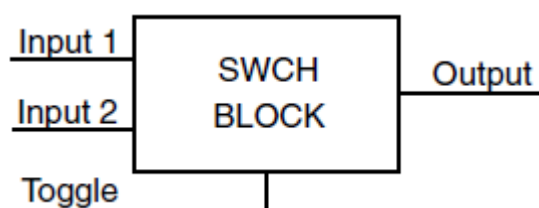
Výhodou prepojenia meranej veličiny zo sekundárneho regulátora do *FBK* parametra primárneho regulátora je, že primárny regulátor nemá problém s „reset windup“. Napríklad v prípade, keď je sekundárny regulátor zapnutý v *SPT* alebo z nejakého iného dôvodu sekundárny proces nemôže dosiahnuť požadovaný *RSP* (teplota ohrevného média je príliš nízka na dosiahnutie požadovanej teploty). Informácie kaskádovej inicializácie sú obsiahnuté v bitových stavoch *BCALCO* sekundárneho regulátora, ktoré sú spojené s *BCALCI* v primárnom regulátore. Parameter *PRIBLK* sa v sekundárnom regulátore nastaví na hodnotu 1 a v primárnom regulátore na hodnotu 0. To umožňuje sekundárnemu regulátoru sa inicializovať predtým ako primárny regulátor mal jeho výstup zhodný s jeho *BCALCI* vstupom. Funkcia *PRIBLK* je potrebná, ak primárny blok má výpočtový interval väčší ako sekundárny regulátor alebo peer-to-peer prepojenie bolo vykonané do *RSP* [8].

Ku každému z blokov som pripojil *FBTUNE* blok, ktorý vypočítal parametre regulátora a tie som zapísal do tabuľky 8.

Tabuľka 8 : Vypočítané parametre regulátorov pre kaskádové riadenie

	Primárny regulátor	Sekundárny regulátor
P	212,72	0,8712
I	0,3738	0,0684
SPLLAG	0,4344	0,2361

Nakoniec som do *compoundu* vložil dva *SWCH* bloky, pomocou ktorých sa prepínalo riadenie medzi jednoduchým a rozvetveným regulačným obvodom cez parameter *toggle* (obr. 26).

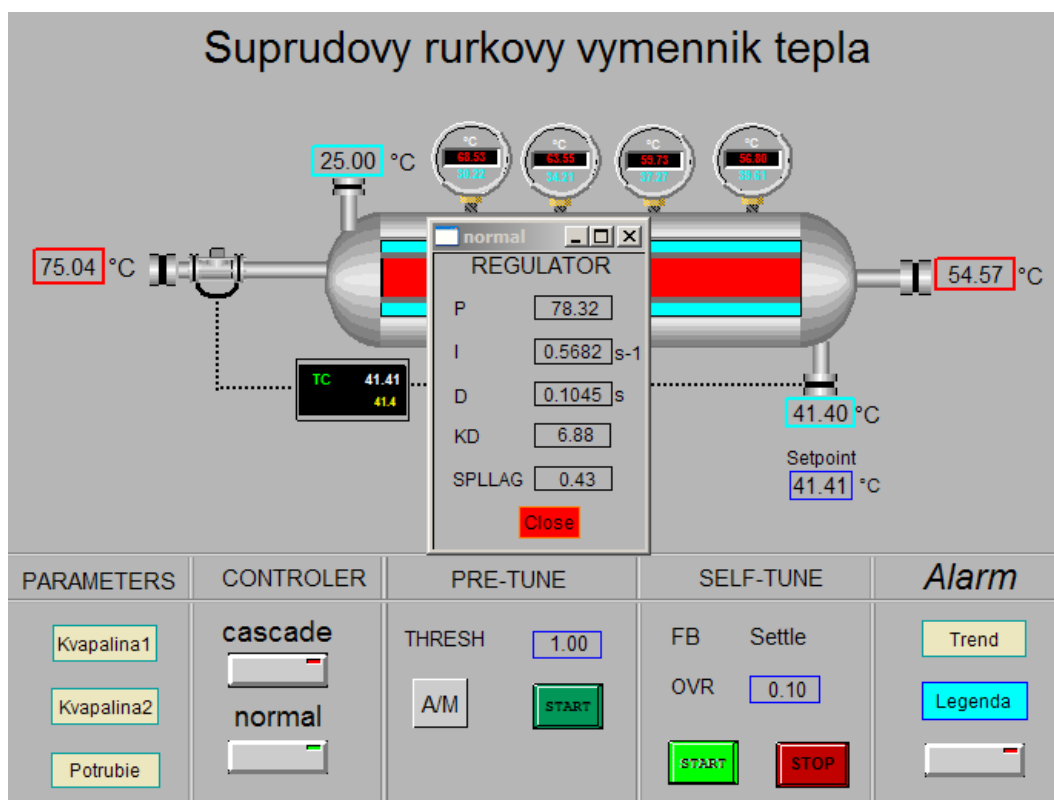


Obr. 26 : *SWCH* blok

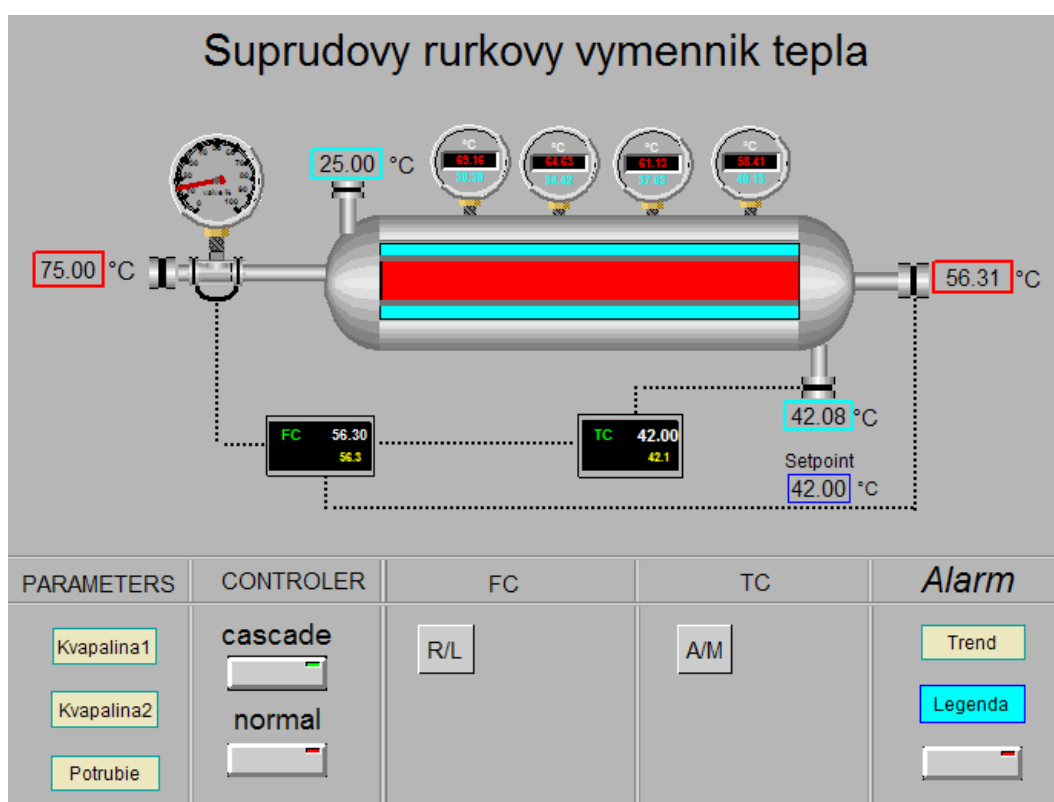
Jeden *SWCH* blok s názvom PREPINAC prepína medzi výstupom z regulátora REGULATOR a konštantným prietokom. Druhý *SWCH* blok s názvom PREPINAC_TEP prepína medzi konštantnou teplotou a výstupom z regulátora PIDA_TEPLOTA.

3.5.4. Foxdraw - vizualizačné prostredie

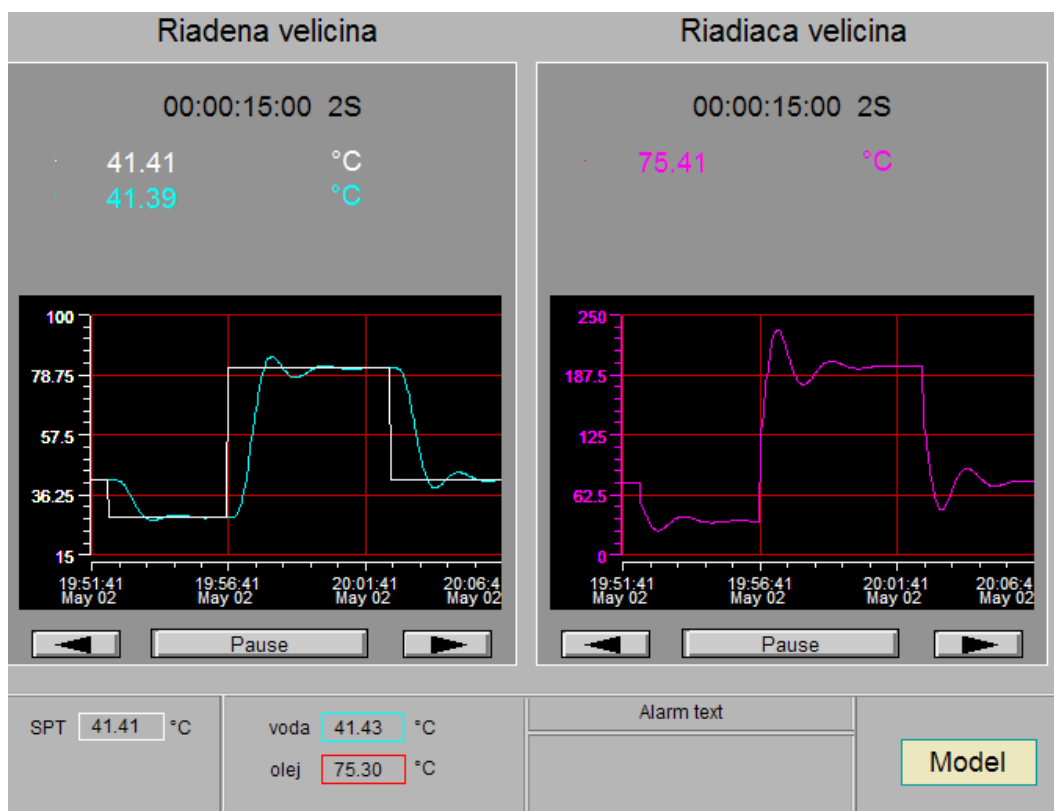
Pre namodelovaný VT som vytvoril 2 užívateľské obrazovky pre jednoduchý regulačný obvod a 2 pre rozvetvený regulačný obvod. Hlavná obrazovka má znázornený VT, políčka pre zadávanie rôznych parametrov, tlačidlá na prepínanie stavov (obr. 27 a 28) a druhá zobrazuje trendové grafy, kde možno sledovať priebehy riadených a riadiacich veličín (obr. 29 a 30).



Obr. 27 : Riadiaca obrazovka VT pre jednoduchý regulačný obvod



Obr. 28 : Riadiaca obrazovka VT pre rozvetvený regulačný obvod



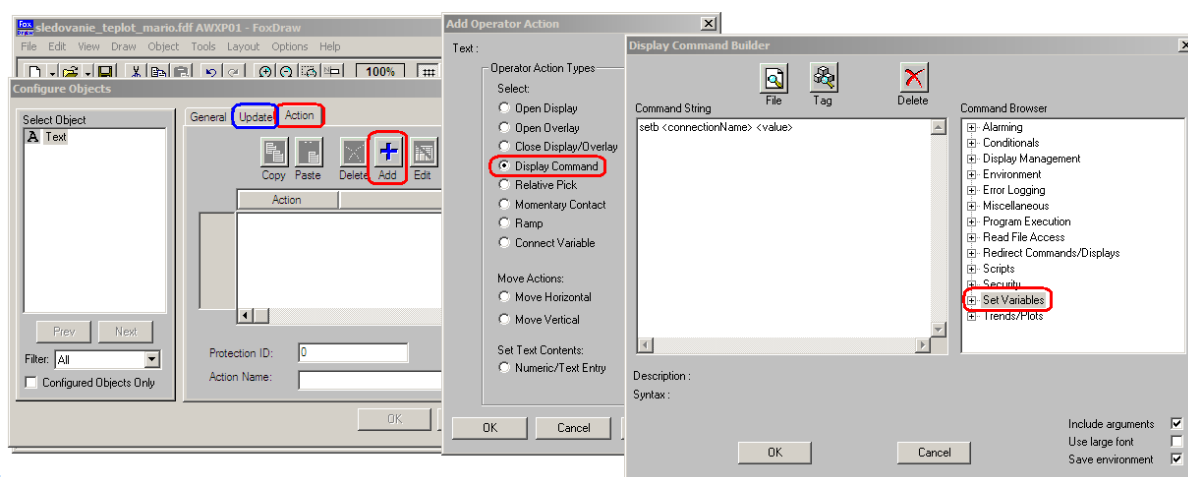
Obr. 29 : Riadiaca obrazovka s trendovými grafmi pre jednoduchý regulačný obvod



Obr. 30 : Riadiaca obrazovka s trendovými grafmi pre rozvetvený regulačný obvod

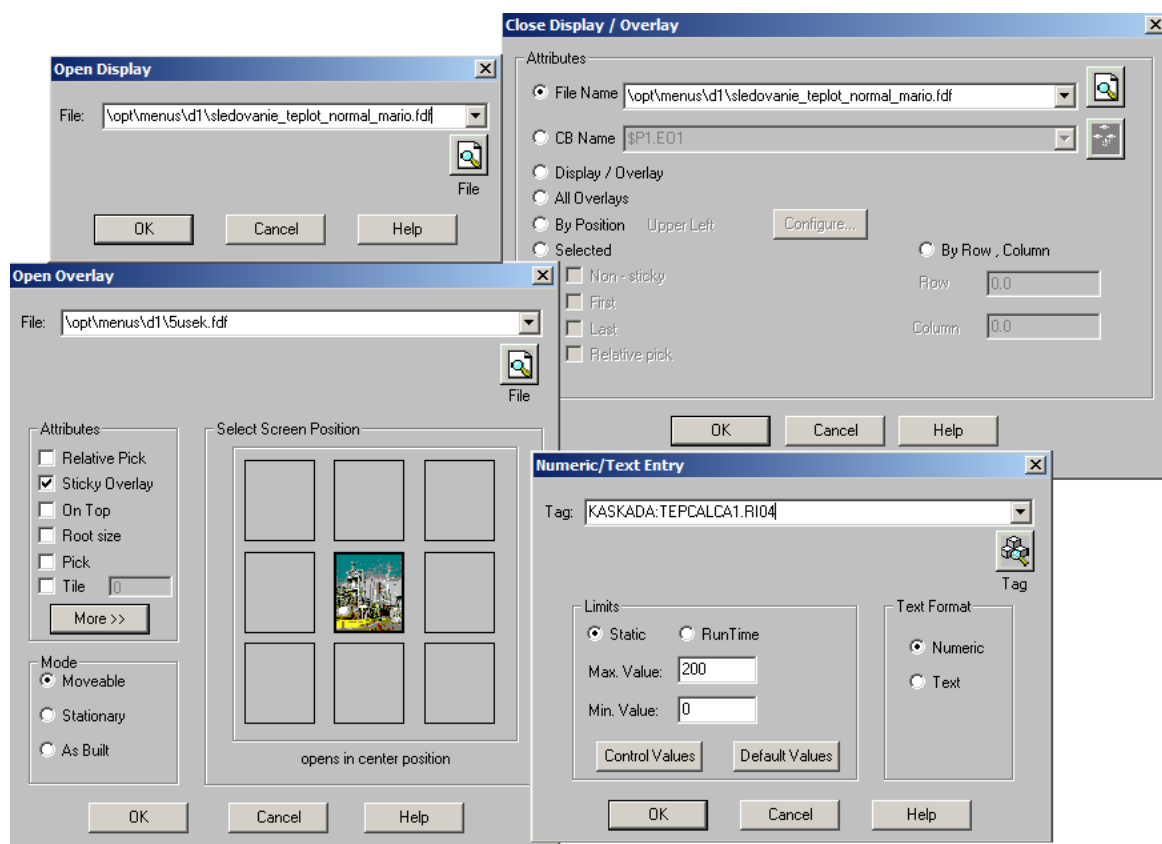
Obrazovky sú vytvorené v grafickom prostredí *Foxdraw*. Opíšem spôsob konfigurovania len niekoľkých tlačidiel alebo políček, s ktorými som sa v bakalárskej práci ešte nezaoberal ([6]).

Vzhľadom k tomu, že sú aplikované dva spôsoby riadenia na jeden proces v jednom *compounde*, ktoré sa prepínajú pomocou bloku *SWCH*, tak na prepínanie regulátorov som vytvoril tlačidlá s názvom *CASCADE* a *NORMAL*. Po vložení tlačidla na obrazovku som ho nakonfiguroval cez pravé tlačidlo a výber z možností *Configure Objects....* V otvorenom okne sa vyberie záložka *Action*, ktorá znamená, že tlačidlo alebo pole vykoná nakonfigurovanú akciu ako je poslanie hodnoty do bloku v prípade tlačidla alebo možnosť zadávania hodnoty a jej následné odoslanie do bloku. Na každý konfigurovaný objekt je možné použiť len jednu akciu. Tlačidlo *Add* ponúkne typy akcie, z ktorých som vybral možnosť *Display Command* a potvrdil tlačidlom *OK*. V otvorenom okne je na ľavej strane pole na zadávanie príkazov (*Command String*) a na pravej strane preddefinované príkazy (*Command Browser*) rozdelené podľa kategórii. Zvolil som kategóriu *Set Variables* a z nej príkaz *setb*, čo znamená, že po stlačení tlačidla sa vyšle boolovska hodnota do bloku so zadanou adresou (obr. 31). Hodnotu som posielal do bloku *SWCH*, ktorý na základe hodnoty 0 alebo 1 vyberie jeden zo vstupov ako výstup. V prípade, že by som chcel aplikovať prepínanie riadenia iba na jedno tlačidlo, tak miesto príkazu *setb* zvolím *toggle*, ktorý bude striedavo posielat' hodnoty 0 a 1 pri každom stlačení tlačidla.



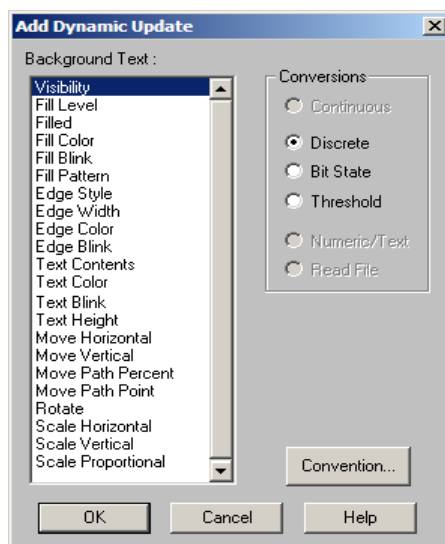
Obr. 31 : Možnosti nastavenia v záložke *Action*

Z okna *Add Operator Action* (obr. 31) som ďalej používal *Open Display* (prepnutie obrazovky), *Open Overlay* (otvorenie okien), *Close Display/Overlay* (zatvorenie obrazovky alebo okna) a *Numeric/Text Entry* (zápis čísla alebo textu) (obr. 32).



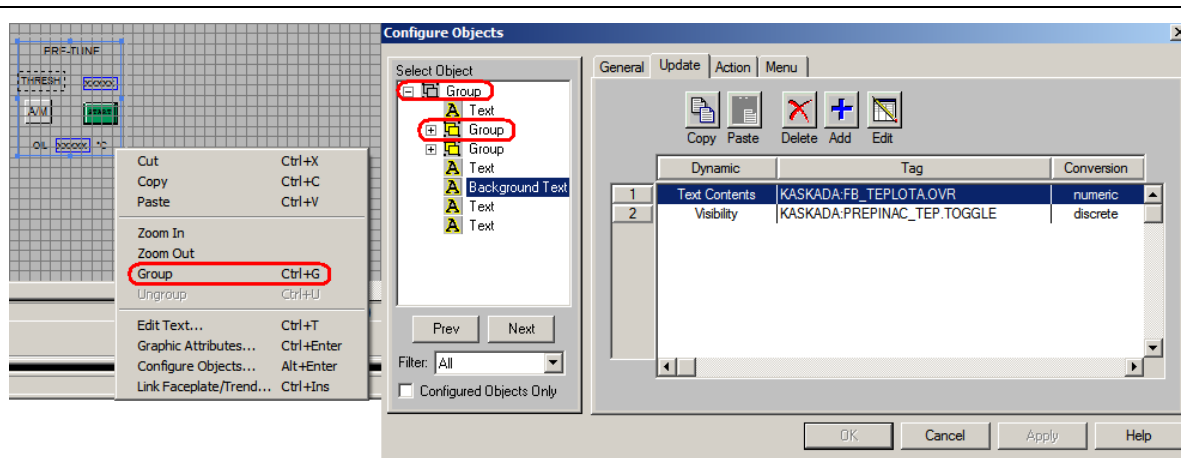
Obr. 32 : Možnosti *Add Operator Action*

Po nakonfigurovaní sa otvára obrazovka s trendovými grafmi, okno na zadávanie parametrov regulátora alebo kvapalín a prepína medzi regulátormi cez tlačidlá *CASCADE* a *NORMAL*. Zobrazovanie hodnôt parametrov, polí, tlačidiel alebo rôznych vizualizačných efektov som konfiguroval cez záložku *Update* v okne *Configure Objects* (obr. 31). Na konfigurovanie sa opäť použije tlačidlo *Add*, ktoré zobrazí okno s ponukou *Add Dynamic Update* (obr. 33).



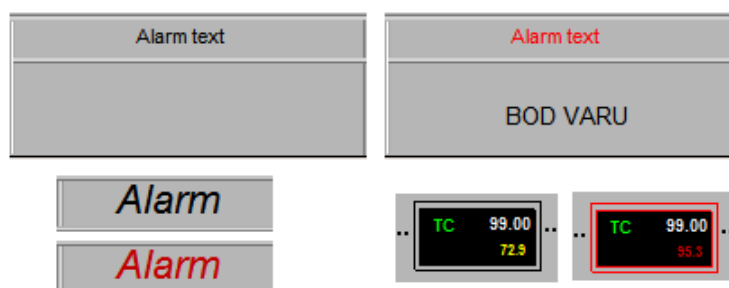
Obr. 33 : Možnosti nastavenia v záložke *Update*

Pre každý konfigurovaný objekt je možné použiť viacero *Update* rôzneho typu. Z ponúknutých možností som použil *Visibility*, *Fill Color*, *Text Contents*, *Text Color*, *Text Blink*, *Edge Color* a *Edge Blink*. *Text Contents* som použil pri zobrazovaní hodnôt z blokov, *Text Color*, *Text Blink*, *Edge Color* a *Edge Blink* pri alarmoch, *Fill Color* pri tlačidlách a *Visibility* pri špecifických akciách tlačidiel a alarmov. Po prepnutí riadenia z kaskádového na jednoduché a naopak sa zobrazujú aj tlačidlá a polia pre jednotlivé typy riadenia na jednej užívateľskej obrazovke. Jednoduchšou možnosťou je vytvoriť dve rôzne obrazovky a zobrazovať ich na základe zvoleného riadenia (obr. 27 a 28 – tlačidlo v pravom dolnom rohu). Na zobrazovanie tlačidiel, polí a textov pri prepnutí riadenia som použil *Visibility*. Týmto som zabezpečil podmienku, pri ktorej sa objekt zobrazí a zmizne pri hodnote 0 alebo 1 v parametri bloku PREPINAC_TEP.TOGGLE. Ak je zobrazným objektom tlačidlo, ktoré po jeho stlačení zobrazí ešte pole, tak tieto objekty museli byť zoskupené do *Group* (obr. 34).



Obr. 34 : Použitie *Group* a *Visibility*

Takto sa dá pre každú skupinu *Group* použiť *Visibility*, pričom konfigurácia *Group* je aplikovaná na všetky jeho objekty a tie môžu mať ešte vlastné konfigurovanie s *Visibility*. Ak by som *Group* nepoužil, nastal by problém so zobrazovaním objektov, pretože 1 objekt nemôže mať 2-krát *Visibility*. V užívateľských obrazovkách som vytvoril aj alarmy vo forme textu a farebných efektov na vybraných objektoch (obr. 35). Rozhodujúcou podmienkou na zobrazenie alarmov na obrazovke je parameter *PRTYPE* v *PIDA* bloku, ktorý zároveň aj určuje typ alarmu.



Obr. 35 : Alarmy

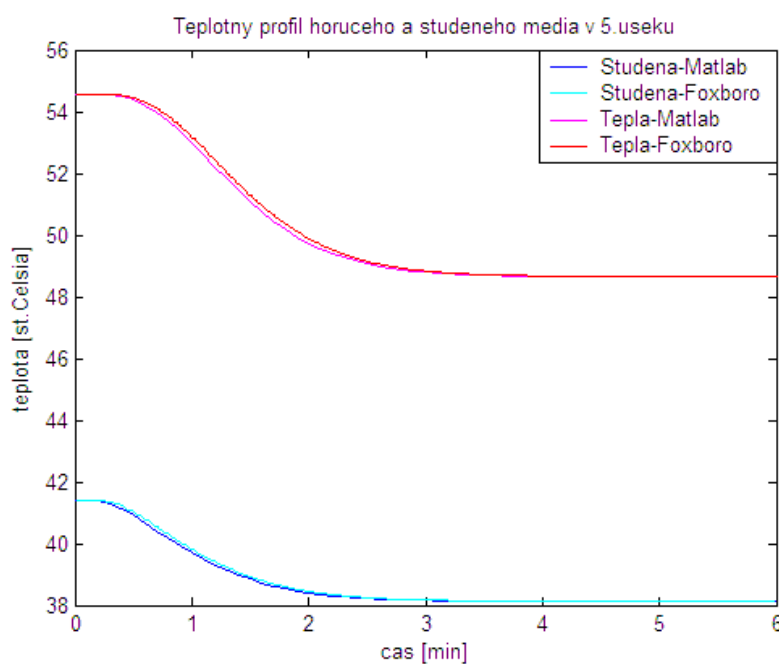
3.6. Vyhodnotenie

Správnosť vytvoreného modelu VT vo FOXBORO som overil s modelom VT vytvoreným v MATLABe na základe teplôt v ustálených stavoch v každom úseku. Hodnoty som zapísal do tabuľky 9 a porovnal.

Tabuľka 9 : Teploty v ustálených stavoch

Úsek	MATLAB		FOXBORO	
	v_h [°C]	v_s [°C]	v_h [°C]	v_s [°C]
0	75	25	75	25
1	68,5022	30,2181	68,5052	30,2201
2	63,5269	34,2134	63,5321	34,2172
3	59,7174	37,2726	59,7242	37,2778
4	56,8006	39,6150	56,8085	39,6212
5	54,5672	41,4085	54,5759	41,4156

Zhodnôt v tabuľke 9 vidieť, že ustálené teploty sú v oboch modeloch VT rovnaké. Dynamické vlastnosti som overil poklesom teploty studeného média o 10°C a porovnal graficky (obr. 36).



Obr. 36 : Teplotný profil na výstupe z 5. úseku v MATLABe a FOXBORO

Počiatkové a konečné teploty v_h , v_s sa zhodujú a priebeh teplôt v závislosti od času sa líši len s minimálnou odchýlkou, čo je spôsobené malým rozdielom v časových konštantách T_h a T_s . Táto odchýlka je spôsobená počítaním na rôzny počet platných číslíc v MATLABe a vo FOXBORO.

Ako prvý som zapojil jednoduchý regulačný obvod a kvalitu riadenia navrhnutých regulátorov vyhodnotil na základe piatich zvolených kritérií. Výsledky som zapísal do tabuľky 10.

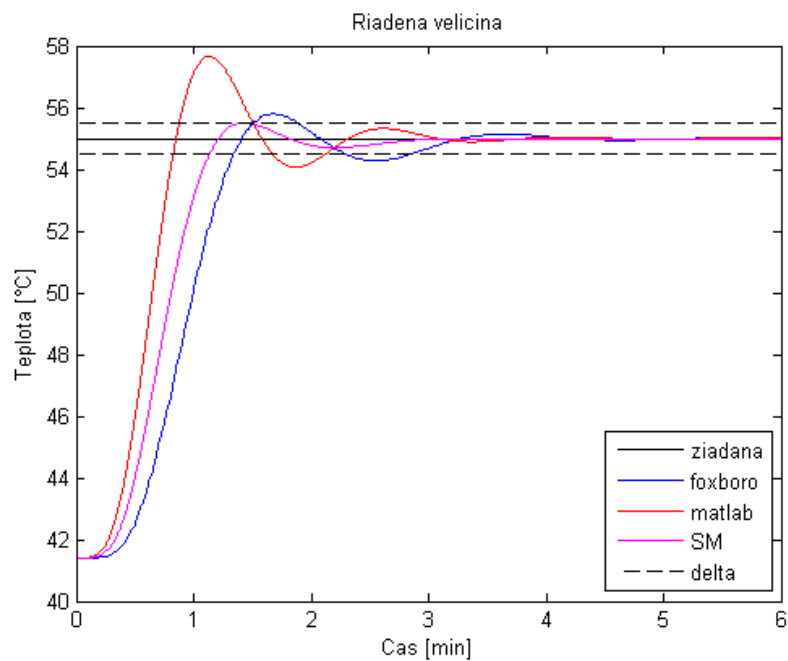
Tabuľka 10 : Kvalita riadenia jednoduchého regulačného obvodu v MATLABe

	t_{reg} [min]	δ_{max} [%]	t_{δ} [min]	iae	ise
Cohen-Coon	2,35	20,02	1,12	10,2120	94,6188
Ziegler-Nicholson	2,27	0,0	0,00	11,9454	107,3933
Priama syntéza	2,29	5,22	1,44	10,6835	110,0395
Smith, Murrill	1,13	3,53	1,44	10,2347	108,7070
Rivera, Morari	1,41	13,32	1,30	10,0489	101,9729

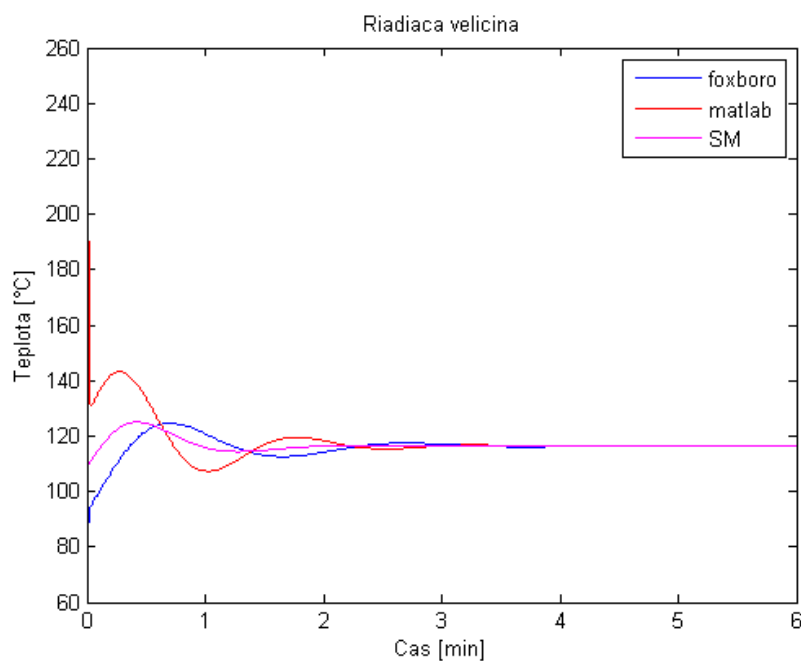
Zo získaných výsledkov som vybral regulátor navrhnutý metódou Smith-Murrill, pretože má splnené dve kritériá kvality riadenia. V tabuľke 11 som na základe objektívnych kritérií kvality riadenia vyhodnotil regulátor navrhnutý metódou Smith-Murrill, *FBTUNE* blokom vo FOXBORO a PID blokom v MATLABe. Priebeh riadenej a riadiacej veličiny som zobrazil na obrázkoch 37 a 38.

Tabuľka 11 : Klasické ukazovatele kvality riadenia v jednoduchom regulačnom obvode

	t_{reg}	δ_{max} [%]	t_{δ} [min]
Smith-Murrill	1,13	3,53	1,44
MATLAB	2,10	13,47	1,16
FOXBORO	2,52	5,82	1,68



Obr. 37 : Pribeh riadenej veličiny v jednoduchom regulačnom obvode



Obr. 38 : Pribeh riadiacej veličiny v jednoduchom regulačnom obvode

Zo získaných výsledkov som vyhodnotil, že regulátor navrhnutý metódou Smith-Murrill uradi systém najrýchlejšie a s najmenším preregulovaním. Regulátor navrhnutý

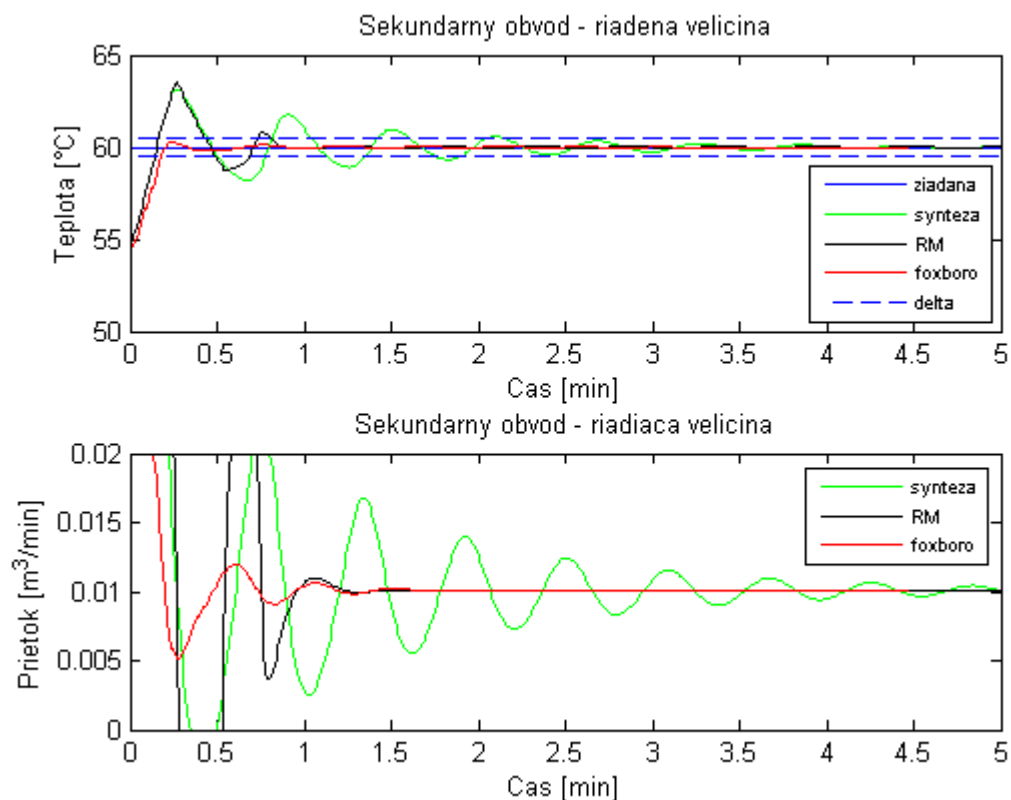
MATLABom sa uradi do stabilnej oblasti skôr ako regulátor vypočítaný vo FOXBORO, ale má väčšie preregulovanie a akčné zásahy.

Pre rozvetvený regulačný obvod som zvolil rovnaké kritériá kvality riadenia ako pre jednoduchý regulačný obvod v MATLABe. Výsledky riadenia zo sekundárneho regulačného obvodu som zapísal do tabuľky 12.

Tabuľka 12 : Vyhodnotenie kvality riadenia sekundárneho regulačného obvodu

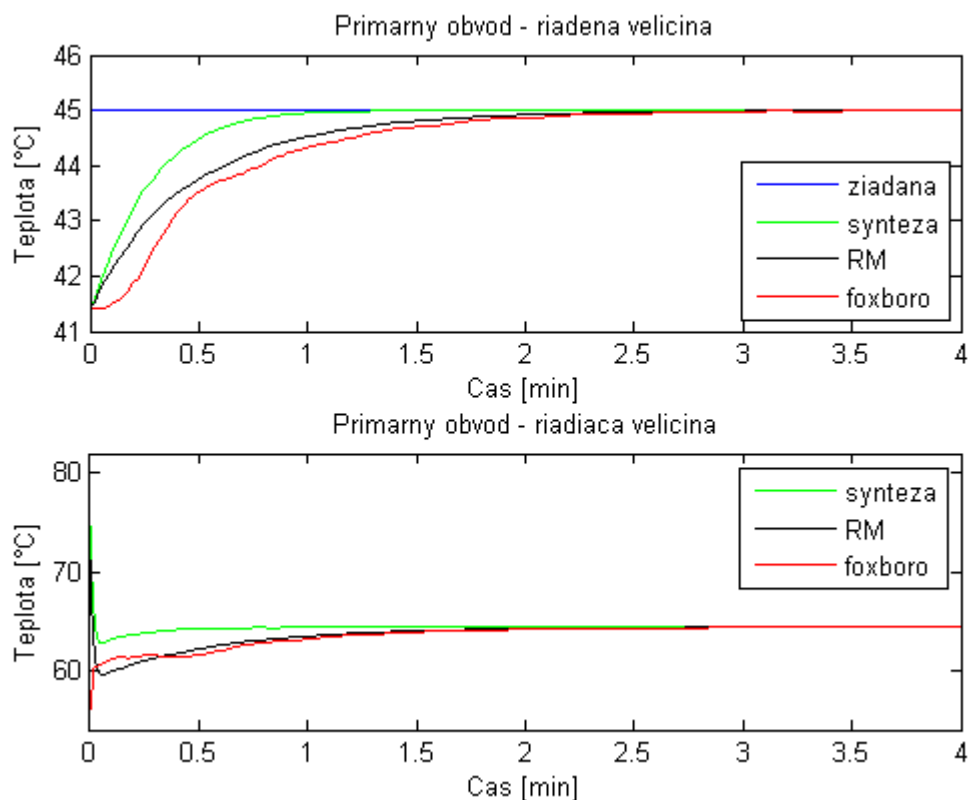
	t_{reg} [min]	δ_{max} [%]	t_{δ} [min]	iae	ise
Ziegler-Nicholson	0,83	67,32	0,25	1,3568	3,0336
Cohen-Coon	1,75	75,96	0,26	3,3805	7,3499
Priama syntéza	2,12	56,18	0,25	2,2552	3,3950
Smith, Murrill	0,85	63,00	0,25	1,3844	2,8625
Rivera, Morari	0,81	65,16	0,24	1,0251	2,4943

Na základe výsledkov v tabuľke 12 som do sekundárneho regulačného obvodu vybral regulátor navrhnutý metódou Rivera, Morari. Graficky som porovnal priebeh riadenia metódou priamej syntézy, Rivera, Morari a regulátorom navrhnutým vo FOXBORO (obr. 39). Riadenie primárneho regulačného obvodu som odsimuloval a graficky porovnal na obrázku 40.



Obr. 39 : Priebeh riadenia sekundárneho regulačného obvodu

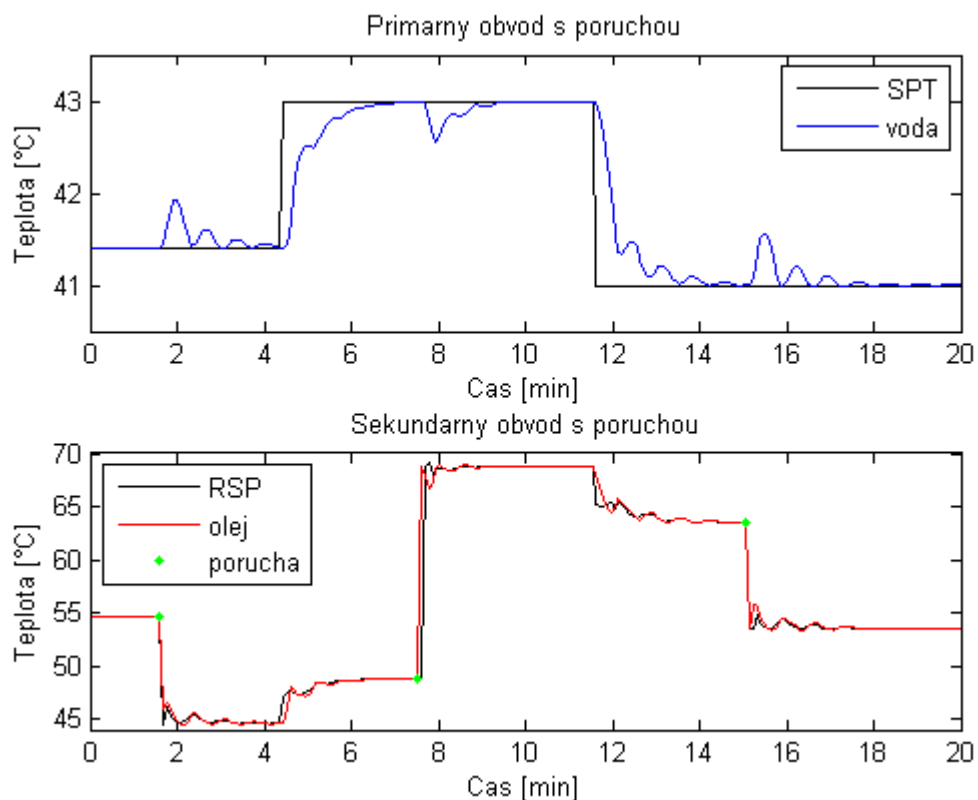
Najlepšie riadenie sekundárneho regulačného obvodu sa dosiahlo regulátorom navrhnutým v riadiacom systéme FOXBORO. Riadená veličina sa uriadila ako prvá s najmenším preregulovaním a akčné zásahy sú najmenšie.



Obr. 40 : Priebeh riadenia primárneho regulačného obvodu

Pri riadení primárneho regulačného obvodu je najrýchlejší regulátor navrhnutý metódou priamej syntézy, čo je spôsobené aj väčším akčným zásahom ako pri regulátore navrhnutom vo FOXBORO.

Nakoniec som vyvolal poruchu v teplote horúceho média a odsimuloval jej odstránenie a priebeh riadenia po vzniknutej poruche (obr. 41).



Obr. 41 : Kaskádová regulácia pri vzniknutej poruche

Sekundárny obvod odstránil vzniknutú poruchu pomerne rýchlo a riadená veličiny nadobudla len malú odchýlku. Priebeh riadenia pri skokových zmenách nadobudol kmitavý charakter, ktorý možno odstrániť zapnutím adaptívneho ladenia v primárnom regulačnom obvode. Ten na základe kmitov vypočíta pomalší primárny regulátor a tým odstráni kmity.

4. Záver

Cieľom diplomovej práce bolo vytvoriť model dvojkapacitného súprúdového rúrkového výmenníka tepla v riadiacom systéme FOXBORO a overiť jeho správnosť v MATLABe. Rovnice modelu som odvodil pri zjednodušujúcich predpokladoch z entalpických bilancií (kapitola 2.2.). Následne pre tieto modely navrhnuť riadenie pre jednoduchý a rozvetvený regulačný obvod.

Na sledovanie dynamiky systému pri zmenách teplôt v MATLABe som vytvoril simulačnú schému z S-funkcií (obr. 10), do ktorých sa zapisovali odvodené diferenciálne rovnice modelu (14). Systém som pri skokovej zmene horúceho média identifikoval 1. rádom a navrhol parametre regulátora (tabuľka 4) pre jednoduchý regulačný obvod. Riadenie som odsimuloval a porovnal s najlepším regulátorom v tabuľke 4, regulátorom vypočítaným v riadiacom systéme FOXBORO a regulátorom navrhnutým v MATLABe PID blokom (obr. 37 a 38). Pre rozvetvený regulačný obvod som vypočítal najskôr sekundárny (tabuľka 5) a potom primárny regulátor (tabuľka 6). Riadenie sekundárneho regulačného obvodu vyšlo najrýchlejšie a s najmenším preregulovaním pre FOXBORO (obr. 39). V prípade riadenia primárneho regulačného obvodu vyšiel rýchlejší regulátor navrhnutý metódou Rivera, Morari (obr. 40). Na záver som vo VT vyvolal poruchu v teplote horúceho média. Poruchu odstránil regulátor rýchlo, ale v riadení porucha vyvolala kmitavý priebeh (obr. 41). Poruchu možno odstrániť zapnutím adaptívneho ladenia v primárnom regulátore, kde sa na základe kmitov vypočíta pomalší regulátor a tým sa odstránia kmity.

Na vytvorenie modelu v riadiacom systéme FOXBORO som použil 15 *CALCA* blokov a 10 *LLAG* blokov, ktoré som naprogramoval v prostredí *ICC*. *LLAG* bloky po nastavení parametrov predstavovali diferenciálne rovnice. *CALCA* bloky počítajú jednoduché matematické operácie vedúce k výpočtom hodnôt do diferenciálnych rovníc, ktoré sa posielajú do *LLAG* blokov. Vytvorený model vo FOXBORO som porovnal s modelom v MATLABe na základe teplôt v ustálenom stave (tabuľka 9) a dynamiku pri poklese teploty studeného média (obr. 34). Na riadenie modelu som pridal 3 *PIDA* bloky a 3 *FBTUNE* bloky. Jeden *PIDA* blok s názvom *PIDA_TEPLOTA* riadil jednoduchý regulačný obvod a dva *PIDA* bloky s názvom *REGULATOR* a *PIDA_MASTER* rozvetvený regulačný obvod. Parametre regulátora v *PIDA* bloku sa nastavili po pripojení a spustení *FBTUNE* bloku. Prepínanie

regulačných obvodov som zabezpečil dvoma *SWCH* blokmi s názvom *PREPINAC* a *PREPINAC_TEP*.

K modelu vytvorenému v *ICC* som vytvoril v prostredí *Foxdraw* užívateľské obrazovky. Hlavnú so znázorneným VT, tlačidlami na zobrazovanie okien a prepínanie stavov, poľami na zadávanie hodnôt do parametrov a dvoma úrovňami alarmov (obr. 27 a 28). Druhá obrazovka obsahovala trendové grafy a teploty riadenej a riadiacej veličiny so žiadanou hodnotou (obr. 29 a 30). Na ukladanie hodnôt som vytvoril a nakonfiguroval archív v *Historian Configurator*, aktivoval v *Historian Manager* a archivované údaje získaval z *AIM Historian Data Display*.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Tomáš Madzin, diplomová práca: Návrh riadenia pomocou riadiaceho systému FOXBORO, Bratislava 2007
- [2] Bafrnec, M. – Bálež, V. – Langfelder, I. – Longauer J.: *Chemické inžinierstvo I*, Vydavateľstvo MALÉ CENTRUM, str. 211-309, 1999.
- [3] Bakošová, M. : *Modelovanie v procesnom priemysle - prednáška*, Fakulta Chemickej a Potravinárskej Technológie v Bratislave, Ústav Informatizácie, Automatizácie a Matematiky, 2008.
- [4] Vyššie formy riadenia – adaptívne riadenie, Dostupné na internete : <http://web.tuke.sk/sjf-kaar/stranky/Predmetove_str/TK/material/Prednasky/VFR-UI.pdf>, Online, 12.5.2010
- [5] Rozvetvené regulačné obvody – kaskádové riadenie, Dostupné na internete : <http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~bakosova/wwwRTP/rro_prednaska.pdf>, Online, 12.5.2010
- [6] Briš, M.: *Riadiaci systém FOXBORO - Bakalárska práca*, Fakulta Chemickej a Potravinárskej Technológie v Bratislave, Ústav Informatizácie, Automatizácie a Matematiky, 2008
- [7] Manual for course on I/A series controllers
- [8] I/A Series Electronic Documentation V7.0, Integrated Control Configurator a Foxdraw, Invensys System, Inc., 2002

Prílohy

CALCA bloky

PREPOCET1 (prepočet jednotiek zo sekúnd na minúty)

RI01	4 180	$c_{p,h}$ z obrazovky
RI02	KASKADA:PREPINAC.OUT	q_h zo SWCH bloku
RI03	2 100	$c_{p,s}$ z obrazovky
RI04	$3,77 \cdot 10^{-4}$	q_s z obrazovky
M01	60	konštanta
M02	3 600	60^2 konštanta
STEP01	MUL RI01 M02	$c_{p,h} \cdot 3600$
STEP02	OUT RO01	$c_{p,h}$ prepočítané na minúty
STEP03	MUL RI02 M01	$q_h \cdot 60$
STEP04	OUT RO02	q_h prepočítané na minúty
STEP05	MUL RI03 M02	$c_{p,s} \cdot 3600$
STEP06	OUT RO03	$c_{p,s}$ prepočítané na minúty
STEP07	MUL RI04 M01	$q_s \cdot 60$
STEP08	OUT RO04	q_s prepočítané na minúty

PREPOCET3 (prepočet jednotiek zo sekúnd na minúty)

RI01	1 480	α_h z obrazovky
RI02	395	λ z obrazovky
RI03	750	α_s z obrazovky
M01	216 000	60^3 konštanta
STEP01	MUL RI01 M01	$\alpha_h \cdot 60^3$
STEP02	OUT RO01	α_h prepočítané na minúty
STEP03	MUL RI02 M01	$\lambda \cdot 60^3$
STEP04	OUT RO02	λ prepočítané na minúty
STEP05	MUL RI03 M01	$\alpha_s \cdot 60^3$
STEP06	OUT RO03	α_s prepočítané na minúty

<i>VYPOCTYI</i>		
RI01	1 000	ρ_h z obrazovky
RI02	KASKADA:PREPOCET1.RO01	$c_{p,h}$
RI03	KASKADA:PREPOCET1.RO02	q_h
RI04	KASKADA:VYPOCTY3.RO02	Dz
RI05	KASKADA:VYPOCTY3.RO01	k
RI06	KASKADA:VYPOCTY3.RI05	D_l
RI07	2	Δz
M01	4	konštanta
M02	3,14	π
STEP01	MUL RI04 RI04	Dz^2
STEP02	MUL RI01 RI02	$\rho_h c_{p,h}$
STEP03	MUL	$Dz^2 \rho_h c_{p,h}$
STEP04	OUT M03	dočasná pamäť
STEP05	MUL M01 RI05	$4k$
STEP06	OUT M04	dočasná pamäť
STEP07	MUL M04 RI06	$4kD_1$
STEP08	OUT M05	dočasná pamäť
STEP09	DIV M03 M05	$\frac{Dz^2 \rho_h c_{p,h}}{4kD_1}$
STEP10	OUT RO01	T_h uloženie do pamäte
STEP11	MUL RI03 M01	$4q_h$
STEP12	OUT M06	dočasná pamäť
STEP13	MUL RI04 RI04	Dz^2
STEP14	OUT M07	dočasná pamäť
STEP15	MUL M07 M02	$Dz^2 \pi$
STEP16	OUT M08	dočasná pamäť
STEP17	DIV M06 M08	$\frac{4q_h}{Dz^2 \pi}$
STEP18	OUT RO02	ω_h uloženie do pamäte
STEP19	MUL RO01 RO02	$T_h \omega_h$
STEP20	OUT M09	dočasná pamäť

STEP21	DIV M09 RI07	$\frac{T_h \omega_h}{\Delta z}$
STEP22	OUT RO03	b_h uloženie do pamäte
STEP23	ADD RO03 1	$b_h + 1$
STEP24	OUT RO04	a_h uloženie do pamäte

VYPOCTY2

RI01	810	ρ_s z obrazovky
RI02	KASKADA:PREPOCET1.RO03	$c_{p,s}$
RI03	KASKADA:PREPOCET1.RO04	q_s
RI04	KASKADA:VYPOCTY3.RO02	Dz
RI05	KASKADA:VYPOCTY3.RO01	k
RI06	KASKADA:VYPOCTY3.RI07	D_3
RI07	KASKADA:VYPOCTY3.RI06	D_2
RI08	KASKADA:VYPOCTY1.RI07	Δz
M01	4	konštanta
M02	3,14	π
STEP01	MUL RI06 RI06	D_3^2
STEP02	MUL RI04 RI04	Dz^2
STEP03	SUB	$D_3^2 - Dz^2$
STEP04	OUT M03	dočasná pamäť
STEP05	MUL RI01 RI02	$\rho_s c_{p,s}$
STEP06	OUT M04	dočasná pamäť
STEP07	MUL M03 M04	$(D_3^2 - Dz^2) \rho_s c_{p,s}$
STEP08	OUT M05	dočasná pamäť
STEP09	MUL M01 RI05	$4k$
STEP10	OUT M06	dočasná pamäť
STEP11	MUL M06 RI07	$4kD_2$
STEP12	OUT M07	dočasná pamäť
STEP13	DIV M05 M07	$\frac{(D_3^2 - Dz^2) \rho_s c_{p,s}}{4kD_2}$
STEP14	OUT RO01	T_s uloženie do pamäte

STEP15	MUL RI03 M01	$4q_s$
STEP16	OUT M08	dočasná pamäť
STEP17	MUL RI06 RI06	D_3^2
STEP18	MUL RI04 RI04	Dz^2
STEP19	SUB	$D_3^2 - Dz^2$
STEP20	OUT M09	dočasná pamäť
STEP21	MUL M02 M09	$\pi(D_3^2 - Dz^2)$
STEP22	OUT M10	dočasná pamäť
STEP23	DIV M08 M10	$\frac{4q_s}{\pi(D_3^2 - Dz^2)}$
STEP24	OUT RO02	ω_s uloženie do pamäte
STEP25	MUL RO01 RO02	$T_s \omega_s$
STEP26	OUT M09	dočasná pamäť
STEP27	DIV M09 RI08	$\frac{T_s \omega_s}{\Delta z}$
STEP28	OUT RO03	b_s uloženie do pamäte
STEP29	ADD RO03 1	$b_s + 1$
STEP30	OUT RO04	a_s uloženie do pamäte

VYPOCTY3

RI01	KASKADA:PREPOCET3.RO01	α_h
RI03	KASKADA:PREPOCET3.RO02	λ
RI04	KASKADA:PREPOCET3.RO03	α_s
RI05	0,025	D_1 z obrazovky
RI06	0,028	D_2 z obrazovky
RI07	0,050	D_3 z obrazovky
M01	1	konštanta
M02	2	konštanta
STEP01	SUB RI06 RI05	$D_2 - D_1$
STEP02	OUT M06	dočasná pamäť
STEP03	DIV M06 M02	$\frac{D_2 - D_1}{2}$
STEP04	OUT RO03	δ uloženie do pamäte

STEP05	DIV M01 RI01	$\frac{1}{\alpha_h}$
STEP06	DIV RO03 RI03	$\frac{1}{\delta}$
STEP07	ADD	$\frac{1}{\alpha_h} + \frac{1}{\delta}$
STEP08	OUT M03	dočasná pamäť
STEP09	DIV M01 RI04	$\frac{1}{\alpha_s}$
STEP10	OUT M04	dočasná pamäť
STEP11	ADD M03 M04	$\frac{1}{\alpha_h} + \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\alpha_s}$
STEP12	OUT M05	dočasná pamäť
STEP13	DIV M01 M05	$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_h} + \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\alpha_s}}$
STEP14	RO01	k uloženie do pamäte
STEP15	ADD RI05 RI06	$D_2 + D_1$
STEP16	OUT M06	dočasná pamäť
STEP17	DIV M06 M02	$\frac{(D_2 + D_1)}{2}$
STEP18	OUT RO02	D_z

TEPCALCAI

RI01	KASKADA:VYPOCTY1.RO01	T_h
RI02	KASKADA:VYPOCTY1.RO04	a_h
RI03	KASKADA:VYPOCTY1.RO03	b_h
RI04	KASKADA:PREPINAC_TEP.OUT	$\mathcal{G}_{h,0}$ zo SWCH bloku
RI05	KASKADA:STUDENA1.OUT	$\mathcal{G}_{s,1}$
M01	1	konštanta

TEPCALCAX (X=2-5)

RI01	KASKADA:VYPOCTY1.RO01	T_h
RI02	KASKADA:VYPOCTY1.RO04	a_h
RI03	KASKADA:VYPOCTY1.RO03	b_h

RI04	KASKADA:TEPLA(X-1).OUT	$\mathcal{G}_{h,i-1}$
RI05	KASKADA:STUDENAX.OUT	$\mathcal{G}_{s,i}$
M01	1	konštanta

STUDCALCAI

RI01	KASKADA:VYPOCTY2.RO01	T_h
RI02	KASKADA:VYPOCTY2.RO04	a_h
RI03	KASKADA:VYPOCTY2.RO03	b_h
RI04	25	$\mathcal{G}_{s,0}$ z obrazovky
RI05	KASKADA:TEPLA1.OUT	$\mathcal{G}_{h,1}$
M01	1	konštanta

STUDCALCAX (X=2-5)

RI01	KASKADA:VYPOCTY2.RO01	T_h
RI02	KASKADA:VYPOCTY2.RO04	a_h
RI03	KASKADA:VYPOCTY2.RO03	b_h
RI04	KASKADA:STUDENA(X-1).OUT	$\mathcal{G}_{s,i-1}$
RI05	KASKADA:TEPLAX.OUT	$\mathcal{G}_{h,i}$
M01	1	konštanta

Výpočty v TEPCALCAX a STUDCALCAX (X=1-5)

STEP01	DIV RI01 RI02	$\frac{T_h}{a_h}$
STEP02	OUT RO01	uloženie do pamäte
STEP03	DIV RI03 RI02	$\frac{b_h}{a_h}$
STEP04	MUL RI04	$\frac{b_h}{a_h} \mathcal{G}_{h,i-1}(t)$
STEP05	OUT RO02	uloženie do pamäte
STEP06	DIV M01 RI02	$\frac{1}{a_h}$
STEP07	MUL RI05	$\frac{1}{a_h} \mathcal{G}_{s,i}(t)$
STEP08	OUT RO03	uloženie do pamäte

STEP09	ADD RO02 RO03	$\frac{b_h}{a_h} \mathcal{G}_{h,i-1}(t) + \frac{1}{a_h} \mathcal{G}_{s,i}(t)$
STEP10	OUT RO04	uloženie do pamäte

LLAG bloky

TEPLAX (X=1-5)

MEAS	KASKADA:TEPCALCAX.RO04	$\frac{b_h}{a_h} \mathcal{G}_{h,i-1}(t) + \frac{1}{a_h} \mathcal{G}_{s,i}(t)$
LAGTIM	KASKADA:TEPCALCAX.RO01	$\frac{T_h}{a_h}$
HSCI1	250	maximálny vstup
HSCO1	250	maximálny výstup

STUDENAX (X=1-5)

MEAS	KASKADA:STUDCALCAX.RO04	$\frac{b_s}{a_s} \mathcal{G}_{s,i-1}(t) + \frac{1}{a_s} \mathcal{G}_{h,i}(t)$
LAGTIM	KASKADA:STUDCALCAX.RO01	$\frac{T_s}{a_s}$
HSCI1	200	maximálny vstup
HSCO1	200	maximálny výstup

SWCH bloky

PREPINAC

INP1	KASKADA:REGULATOR.OUT	q_h
INP2	0,000111	q_h

PREPINAC_TEP

INP1	75	$\mathcal{G}_{h,0}$
INP2	KASKADA:PIDA_TEPLOTA.OUT	$\mathcal{G}_{h,0}$

PIDA bloky

PIDA_TEPLOTA

MEAS	KASKADA:STUDENA5.OUT	$\mathcal{G}_{s,5}$
MODOPT	6	NIPID regulátor
HSCO1	250	maximálny výstup
MALOPT	1	HIGH a LOW alarm
MEASHL	85	horná hranica H alarmu
MEASHT	TEXT	správa pri H alarme
MEASLL	20	dolná hranica L alarmu
MEASLT	TEXT	správa pri L alarme
HHAOPT	1	HIGH-HIGH a LOW-LOW alarm
HHALIM	95	horná hranica HH alarmu
HHATXT	TEXT	správa pri HH alarme
LLALIM	17	dolná hranica LL alarmu
LLATXT	TEXT	správa pri LL alarme

REGULATOR

MEAS	KASKADA:TEPLA5.OUT	$\mathcal{G}_{h,5}$
MODOPT	4	PI regulátor
HSCI1	250	maximálny vstup
RSP	KASKADA:MASTER_PIDA.OUT	vzdialený SPT $\mathcal{G}_{h,5}$
LR	1	local (SPT)/remote (RSP)
HSCO1	0,0003334	maximálny výstup
PRIBLK	1	priorita bloku
MALOPT	1	HIGH a LOW alarm
MEASHL	64,1	horná hranica H alarmu
MEASHT	TEXT	správa pri H alarme
MEASLL	27,3	dolná hranica L alarmu
MEASLT	TEXT	správa pri L alarme
HHAOPT	1	HIGH-HIGH a LOW-LOW alarm
HHALIM	66	horná hranica HH alarmu
HHATXT	TEXT	správa pri HH alarme
LLALIM	25,5	dolná hranica LL alarmu
LLATXT	TEXT	správa pri LL alarme

<i>MASTER_PIDA</i>		
MEAS	KASKADA:STUDENA5.OUT	$\vartheta_{s,5}$
MODOPT	4	PI regulátor
HSCI1	50	maximálny vstup
LSCI1	20	minimálny vstup
HSCO1	250	maximálny výstup
PRIBLK	0	priorita bloku
BCALCI	KASKADA:REGULATOR.BCALCO	
FBK	KASKADA:REGULATOR.BCALCO	reset windup
MALOPT	1	HIGH a LOW alarm
MEASHL	45	horná hranica H alarmu
MEASHT	TEXT	správa pri H alarme
MEASLL	32	dolná hranica L alarmu
MEASLT	TEXT	správa pri L alarme
HHAOPT	1	HIGH-HIGH a LOW-LOW alarm
HHALIM	45,5	horná hranica HH alarmu
HHATXT	TEXT	správa pri HH alarme
LLALIM	31	dolná hranica LL alarmu
LLATXT	TEXT	správa pri LL alarme

FBTUNE bloky

<i>FB_TEPLOTA</i>		
PIDBLK	KASKADA:PIDA_TEPLOTA.BLKSTA	pripojenie k PIDA bloku
<i>FB_REGULATOR</i>		
PIDBLK	KASKADA:REGULATOR.BLKSTA	pripojenie k PIDA bloku
<i>FB_MASTER</i>		
PIDBLK	KASKADA:MASTER_PIDA.BLKSTA	pripojenie k PIDA bloku