

Slovenská technická univerzita v Bratislave

FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ

TECHNOLÓGIE



KATEDRA

INFORMATIZÁCIE A RIADENIA PROCESOV

**Tvorba knižnice matematických modelov  
chemickotechnologických procesov**

Diplomová práca

Vedúci diplomovej práce:

doc. Ing. Monika Bakošová, CSc.

Vypracoval:

Bc. Ján Baleja

Bratislava 2005

***Pod'akovanie:***

Týmto si dovoľujem úprimne poďakovať vedúcej diplomovej práce pani Doc. Ing. Monike Bakošovej CSc. za cenné rady a odborné vedenie pri písaní a revidovaní danej práce.

*Túto prácu by som rád venoval človeku, ktorému najviac záležalo na tom,  
aby som to sem dotiahol ....*

*d'akujem*

# ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá tvorbou knižnice matematických modelov chemickotechnologických procesov ako sú zásobníky kvapaliny, výmenníky tepla, etážová rektifikačná kolóna a chemické reaktory. Knižnica je vytvorená v pracovnom prostredí MATLAB, a má tvar toolboxu MODELTOOL, ktorý v sebe zahŕňa jednotlivé simulinkové bloky vymenovaných procesov. Jednotlivé bloky umožňujú simulovať dynamické vlastnosti procesov pomocou nelineárnych, alebo linearizovaných matematických modelov a získať matice stavového opisu pre linearizované, resp. lineárne modely.

# ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design of a library of mathematical models for processes in chemical technology as liquid tanks, heat exchangers, plate distillation columns and chemical reactors. The library has been created in a MATLAB simulation environment and has the form of MATLAB Toolbox MODELTOOL, which contains individual Simulink blocks of listed processes. These blocks allow to simulate dynamic behavior of processes using non-linear or linear mathematical models and to obtain matrices of state-space description of linearized or linear models.

# OBSAH

ÚVOD.....	1
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	2
1.1 Prehľad pojmov .....	2
1.2 MODELTOOL – úvod do toolboxu.....	4
1.2.1 Inštalácia toolboxu MODELTOOL .....	5
1.2.2 Otvorenie toolboxu MODELTOOL .....	7
1.2.3 Odinštalovanie toolboxu MODELTOOL.....	7
1.3 Zoznam použitých symbolov .....	9
2 ZÁSObNÍKY KVAPALINY.....	10
2.1 Zásobníky kvapaliny - nelineárny matematický model .....	10
2.1.1 Teoretická časť .....	10
2.1.2 Zásobníky kvapaliny nelineárny model - použitie bloku .....	13
2.1.2.1 Opis bloku .....	14
2.1.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku.....	14
2.1.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom .....	18
2.2 Zásobníky kvapaliny linearizovaný matematický model .....	19
2.2.1 Teoretická časť .....	19
2.2.2 Zásobníky kvapaliny linearizovaný model - použitie bloku .....	23
2.2.2.1 Opis bloku .....	24
2.2.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku.....	25
2.2.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom .....	27
2.3 Zoznam použitých symbolov .....	28
3 VÝMENNÍKY TEPLA .....	30
3.1 Prietokové ohrievače.....	30
3.1.1 Teoretická časť .....	30
3.1.2 Prietokové ohrievače – použitie bloku .....	32
3.1.2.1 Opis bloku .....	32
3.1.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku.....	33
3.1.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom .....	39
3.2 Plášťové výmenníky tepla.....	40
3.2.1 Teoretická časť .....	40
3.2.2 Plášťové výmenníky tepla – použitie bloku .....	41
3.2.2.1 Opis bloku .....	42
3.2.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku.....	42
3.2.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom .....	46
3.3 Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla .....	46
3.3.1 Teoretická časť .....	46
3.3.2 Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla – použitie bloku.....	48
3.3.2.1 Opis bloku .....	49
3.3.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku.....	50
3.3.2.3 Opis funkcií využívaných danými blokmi .....	56
3.4 Trojkapacitný súprúdový rúrkový výmenník tepla.....	57
3.4.1 Teoretická časť .....	57

3.4.2	Trojkapacitný rúrkový výmenník tepla – použitie bloku .....	60
3.4.2.1	Opis bloku .....	61
3.4.2.2	Vyplnenie formulára daného bloku.....	62
3.4.2.3	Opis funkcií využívaných danými blokmi .....	68
3.4.3	Dvojkapacitný výmenník tepla.....	70
3.5	Zoznam použitých symbolov .....	70
4	ETÁŽOVÁ REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA.....	72
4.1	Etážová rektifikačná kolóna - nelineárny matematický model.....	72
4.1.1	Teoretická časť .....	72
4.1.2	Etážová rektifikačná kolóna – použitie bloku .....	76
4.1.2.1	Opis bloku .....	77
4.1.2.2	Vyplnenie formulára daného bloku.....	78
4.1.2.3	Opis funkcií využívaných daným blokom .....	84
4.2	Zoznam použitých symbolov .....	85
5	CHEMICKÉ REAKTORY .....	87
5.1	Prietokový chemický reaktor s miešaním – nelineárny model .....	87
5.1.1	Teoretická časť .....	87
5.1.2	Prietokový chemický reaktor s miešaním – použitie bloku .....	89
5.1.2.1	Opis bloku .....	90
5.1.2.2	Vyplnenie formulára daného bloku.....	91
5.1.2.3	Opis funkcií využívaných daným blokom .....	96
5.2	PCHR pre postupné reakcie – nelineárny model .....	98
5.2.1	Teoretická časť .....	98
5.2.2	PCHR pre postupné reakcie – použitie bloku .....	100
5.2.2.1	Opis bloku .....	101
5.2.2.2	Vyplnenie formulára daného bloku.....	101
5.2.2.3	Opis funkcií využívaných daným blokom .....	104
5.3	Analýzy stability rovnovážnych stavov prietokových chemických reaktorov s miešaním.....	106
5.3.1	Teoretická časť .....	106
5.3.2	Funkcie vytvorené pre analýzu stability rovnovážnych stavov chemických reaktorov – použitie.....	106
5.3.2.1	Funkcia reaktor_SRS.....	107
5.3.2.2	Funkcia reaktorCP_SRS.....	108
5.4	Zoznam použitých symbolov .....	109
	ZÁVER.....	111
	POUŽITÁ LITERATÚRA.....	112

# ÚVOD

Chemická technológia je charakterizovaná rozmanitosťou procesov, ktoré sú doprevádzané transformáciami jednotlivých druhov energie. Úlohou modelovania je opísať dané procesy pomocou matematických vzťahov medzi veličinami, ktoré charakterizujú daný proces. To z akého pohľadu daný proces opisujeme sa nazýva prístup k modelovaniu. Poznáme dva základné prístupy

- *deterministický*
- *experimentálno – štatistický*

*Deterministický prístup* je založený na spoznaní a matematickom opísaní základných fyzikálnych a fyzikálno-chemických zákonov, ktoré platia pre proces, ktorý sledujeme. Jeho výhodou je, že sa dá použiť v štádiu projektovania a matematické opisy majú všeobecnú platnosť, avšak môžu byť značne komplikované

*Experimentálno - štatistický prístup* je založený na vykonaní experimentu a jeho vyhodnotení metódami matematickej štatistiky, čím sa získa opísanie vzťahov daného procesu. Výhodou daného prístupu sú jednoduché matematické vzťahy, ktoré majú platnosť iba v určitom rozsahu pracovnej oblasti.

Matematické opisy sa nazývajú matematické modely a cieľom danej práce bolo vytvoriť ich knižnicu. Jednotlivé modely reprezentujú simulinkové bloky, ktoré sú uložené v knižnici vo forme toolboxu MODELTOOL. Toolbox zahŕňa tieto modely chemickotechnologických procesov

- *Zásobníky kvapaliny*
- *Výmenníky tepla*
- *Etážová rektifikačná kolóna*
- *Chemické reaktory*

Simulinkové bloky modelov slúžia na návrh a overenie algoritmov riadenia zodpovedajúcich procesov, pričom sa dajú použiť ako jednorozmerné, alebo mnohorozmerné úlohy. Sú vytvorené tak, aby užívateľovi poskytovali čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.

Jednotlivé kapitoly sa skladajú z *teoretickej* časti a *použitia bloku* daného procesu. V teoretickej časti je opísaná základná problematika a časť použitia bloku je užívateľskou príručkou k danému bloku.



# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

## 1.1 Prehľad pojmov

Teoretické (matematické) modely sa zostavujú na základe materiálových a energetických bilancií. Na získanie dynamických matematických modelov sa využívajú bilancie v neustálenom stave, pričom materiálová bilancia môže byť robená ako celková, alebo ako bilancia zložiek, ako bilancia hmotnosti, alebo látkového množstva. Matematické modely dynamiky procesov majú tvar diferenciálnych rovníc.

Na získanie matematického modelu procesu, ktorý je v ustálenom stave (jeho veličiny sa v čase nemenia) použijeme materiálovú bilanciu sformulovanú pre hmotnosti

$$\textit{súčet hmotností vstupov} = \textit{súčtu hmotností výstupov}$$

pre látkové množstvá

$$\textit{súčet látkových množstiev vstupov} = \textit{súčtu látkových množstiev výstupov}$$

alebo energetickú bilanciu

$$\textit{súčet energií na vstupe} + \textit{dodané teplo} = \textit{súčet energií na výstupe} + \textit{vykonaná práca}$$

Za dosť rozsiahlych zjednodušujúcich predpokladov (sústava nekoná prácu, zanedbateľné – málo významné druhy energie, atď. ...) sa energetická bilancia nazýva entalpickou.

V prietokovej sústave (ustálený kontinuálny vstup i výstup) treba namiesto hmotností, látkových množstiev, energií, tepiel bilancovať hmotnostné toky, mólové toky, tepelné toky.

Existujú rozličné spôsoby, ako vyjadriť teplo a tepelný tok. Najčastejšie je to:

- Teplo obsiahnuté v nejakom množstve látky o hmotnosti  $m$ , hmotnostnej tepelnej kapacite pri stálom tlaku  $cp$  a teplote  $\vartheta$ . Ak budeme uvažovať rovnakú referenčnú teplotu pre všetky objekty, potom  $Q = mcp\vartheta$ .
- Tepelný tok prechádzajúci cez stenu o ploche  $F$  s definovaným koeficientom prechodu tepla  $\alpha$ , keď na teplejšej strane je teplota  $\vartheta_p$  a na chladnejšej teplota  $\vartheta$ .

Tepelný tok je daný vzťahom  $\dot{Q} = F\alpha(\vartheta_p - \vartheta)$ .

- Reakčné teplo. Ak predpokladáme objem reakčnej zmesi  $V$ , rýchlosť reakcie na jednotku objemu reagujúcej zmesi  $\xi_V$  a reakčnú entalpiu  $(\Delta_r H)$ , potom  $Q_r = V(\Delta_r H)\xi_V$ .

V prípade, že sa veličiny procesu v čase menia, t.j. proces je v dynamickom stave, materiálové a energetické bilancie musia zohľadniť skutočnosť, že v systéme dochádza k akumulácii hmoty a energie.

Na získanie modelu dynamického procesu použijeme buď materiálovú bilanciu sformulovanú pre hmotnosti

$$\text{súčet hmotnostných tokov na vstupe} = \text{súčet hmotnostných tokov na výstupe} + \\ \text{rýchlosť akumulácie hmotností v systéme}$$

alebo energetickú bilanciu

$$\text{Súčet tokov energie na vstupe} + \text{teplo dodané za jednotku času} = \text{súčet tokov energií na} \\ \text{výstupe} + \text{práca vykonaná za jednotku času} + \text{rýchlosť akumulácie energie v systéme}$$

V prípade systémov s chemickou reakciou nesmieme zabudnúť, že nejaké množstvo látky i tepla môže vzniknúť resp. zaniknúť chemickou reakciou.

Člen, ktorý opisuje rýchlosť akumulácie hmotnosti v systéme – akumulačný člen, je daný ako derivácia danej premennej podľa času.

Pri zostavovaní modelu treba najskôr urobiť materiálovú, alebo energetickú – entalpickú bilanciu. Potom treba určiť známe konštanty, alebo parametre, ktoré sú nemenné. Ich nemennosť môže vyplývať z rozmerov zariadenia, z konštantných fyzikálnych vlastností atď. V ďalšom kroku treba definovať veličiny, ktoré sa budú získavať riešením diferenciálnych a algebraických rovníc modelu. Nakoniec treba definovať veličiny, ktorých časový priebeh je daný okolím procesu (vstupné veličiny – riadiace, alebo poruchové). Model bude riešiteľný vtedy, ak sa počet rovníc, ktoré ho tvoria bude rovnať počtu neznámych veličín, ktoré v ňom vystupujú [1].

### **Linearizácia**

Všeobecne môžeme povedať, že funkcia je lineárna vzhľadom na nejakú premennú, ak derivácia tejto funkcie podľa danej premennej je konštantná. Inak je funkcia nelineárna.

Linearizácia je založená na tom, že ľubovoľnú nelineárnu funkciu možno v okolí nejakého (pracovného) bodu aproximovať lineárnou závislosťou.

Všeobecný postup pri linearizácii procesu opísaného diferenciálnou rovnicou pozostáva z viacerých krokov.

1. Napíšeme si nelineárny matematický model procesu v neustálenom stave
2. Odčítame od neho model procesu v ustálenom stave
3. Definujeme odchýlkové veličiny. Odchýlková veličina je definovaná ako rozdiel veličiny v neustálenom a ustálenom stave a predstavuje zmenu veličiny vzhľadom na ustálený stav.
4. Nelineárne členy aproximujeme Taylorovým rozvojom do prvého radu, ktorý pre funkciu jednej premennej  $f(x)$  má

$$f(x) = f(x^s) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x^s} (x - x^s) \quad (1.1)$$

a pre funkciu dvoch premenných  $f(x,y)$

$$f(x,y) = f(x^s, y^s) + \left. \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x^s \\ y=y^s}} (x - x^s) + \left. \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right|_{\substack{x=x^s \\ y=y^s}} (y - y^s) \quad (1.2)$$

5. Dosadíme odchýlkové veličiny.

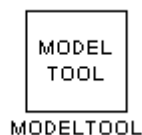
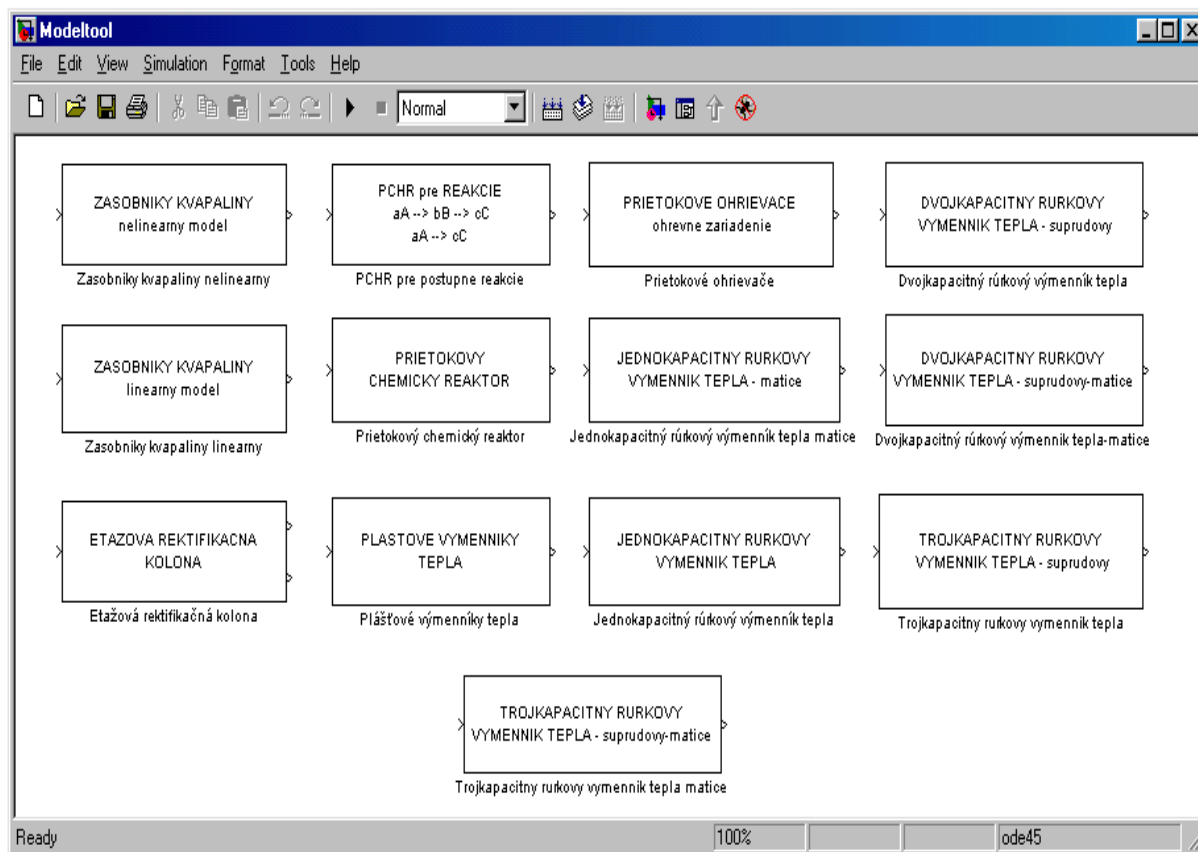
### **Diskretizácia**

Diskretizáciou rozumieme matematický aparát založený na pretransformovaní parciálnej diferenciálnej rovnice na sústavu obyčajných diferenciálnych rovníc a obyčajnej diferenciálnej rovnice na sústavu algebraických rovníc. Diskretizácia je založená na náhrade deriváciu diferenciou. Matematický zápis má tvar:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{\Delta x} \quad (1.3)$$

## **1.2 MODELTOOL – úvod do toolboxu**

MODELTOOL je toolbox vytvorený v pracovnom prostredí MATLAB a je knižnicou matematických modelov vybraných chemickotechnologických procesov. Tvar toolboxu je znázornený na obr. 1.1. Na obr. 1.2 sú znázornené bloky procesov, ktoré obsahuje.

Obr. 1.1 *Toolbox MODELTOOL*Obr. 1.2 *Bloky matematických modelov v toolboxe MODELTOOL*

V nasledujúcich častiach je vysvetlená inštalácia, otvorenie (spustenie) a odinštalovanie toolboxu.

### 1.2.1 Inštalácia toolboxu MODELTOOL

Toolbox MODELTOOL je adresár súborov, ktorý je súčasťou priloženého CD a má názov *modeltool.zip*. Inštalácia toolboxu spočíva v nasledujúcich krokoch

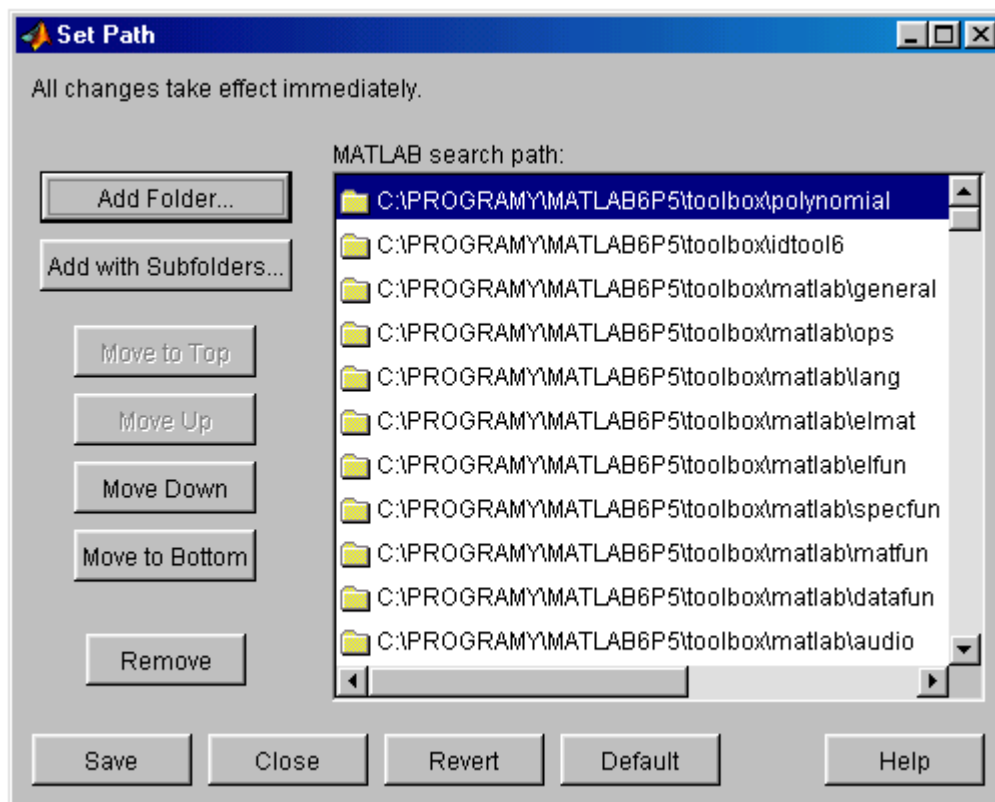
- Dekompresia súboru *modeltool.zip* do *C:\MATLAB6p5\toolbox*
- Nastavenie vyhľadávacej cesty

*Nastavenie vyhľadávacej cesty*

Cestu môžeme nastaviť dvomi spôsobmi. Prvý spočíva v zadaní cesty v m-file *pathdef.m*, do ktorej sa musia explicitne zadať názvy všetkých adresárov, t.j.

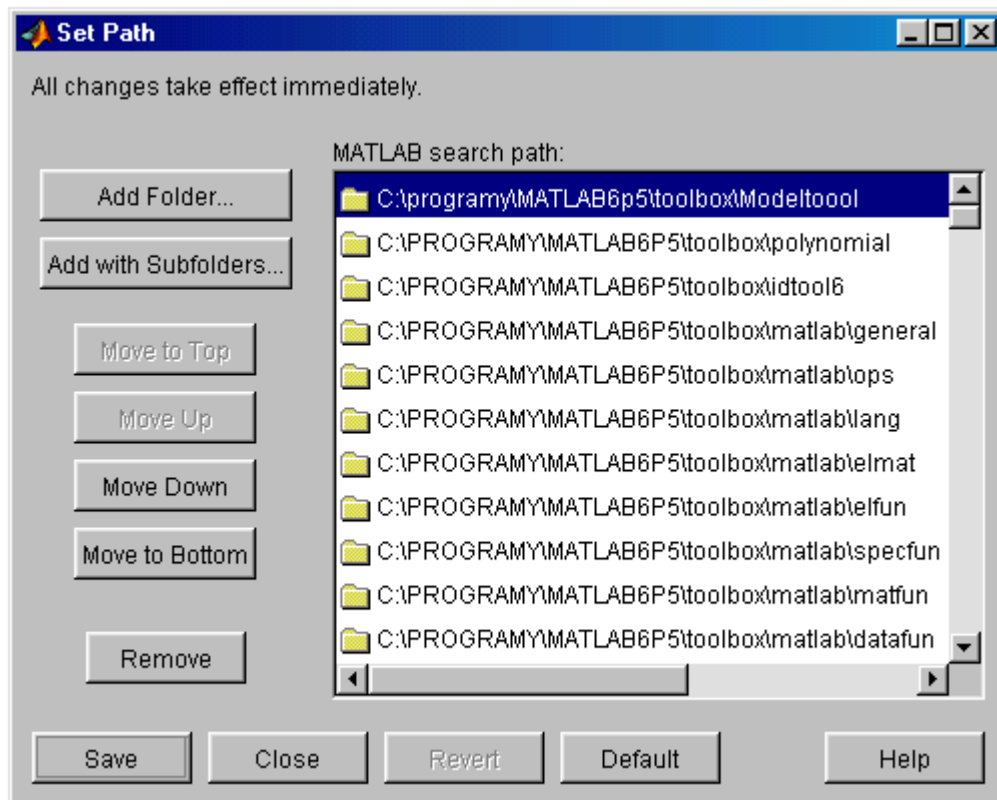
C:\MATLAB6p5\toolbox\Modeltool

Druhý spôsob spočíva vo vybratí vyhľadávacej cesty z ponuky *File → Set Path ...* a otvorí sa nám nové okno *Set path* obr. 1.3.



Obr. 1.3 *Okno pre nastavenie vyhľadávacej cesty*

Klikneme na voľbu *Add Folder* a vyberieme cestu k danému adresáru (C:\MATLAB6p5\toolbox\Modeltool). Ak sme nastavenie vykonali podľa predchádzajúcich pokynov zobrazí sa nám v dialógovom okne daná cesta (obr. 1.4). Zostáva len potvrdiť danú voľbu kliknutím na položku *Save* a môžeme začať pracovať s daným toolboxom.

Obr. 1.4 *Okno po nastavení vyhledávací cesty*

### 1.2.2 Otvorenie toolboxu MODELTOOL

Toolbox môžeme otvoriť týmito spôsobmi

- *Pomocou príkazov `simulink` resp. `simulink3`*
- *Napísaním názvu toolboxu v príkazovom riadku pracovného okna MATLAB.*

```
>> Modeltool
```

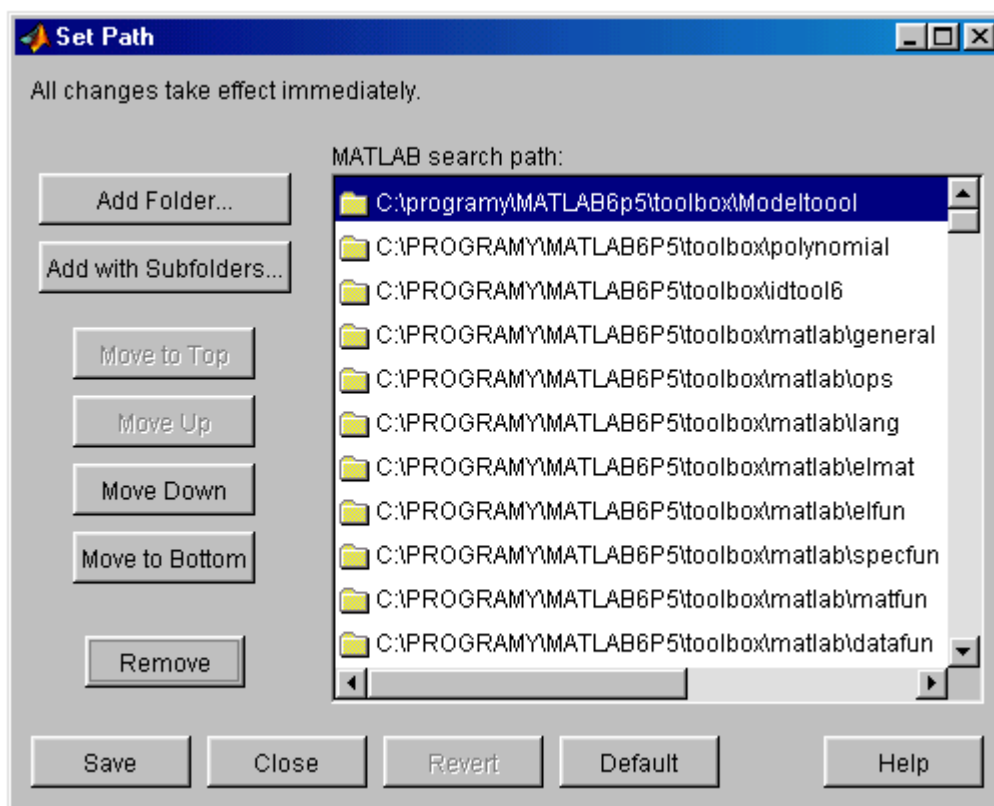
*Pomocou príkazov `simulink`, resp. `simulink3`*

Zapísaním hore uvedených príkazov v príkazovom riadku pracovného okna MATLAB sa nám otvoria simulinkové knižnice. Otvoríme položku *Blocksets&Toolboxes*, kde sa nám zobrazia jednotlivé bloky toolboxov, medzi ktorými sa nachádza aj blok MODELTOOL.

### 1.2.3 Odinštalovanie toolboxu MODELTOOL

Odinštalovanie sa robí opačným postupom ako inštalácia. Prvý spôsob spočíva vo vymazaní vyhledávací cesty v m-file *pathdef.m*.

Druhý spočíva z vybrania si voľby *Set Path...* z ponuky *File*. Po otvorení okna *Set Path* je treba označiť toolbox cestu (*C:\MATLAB6p5\toolbox\Modeltool*) a kliknúť na tlačidlo *Remove* (obr. 1.5).



Obr. 1.5 Okno pre odinštalovanie vyhľadávacej cesty

Ak sme odstránili cestu podľa predchádzajúcich pokynov v okne *Set Path* sa nenachádza cesta (*C:\MATLAB6p5\toolbox\Modeltool*).

Posledným krokom je vymazanie adresára *Modeltool* z podadresára *C:\MATLAB6p5\toolbox\*.

### 1.3 Zoznam použitých symbolov

- *VELIČINY*

<i>Symbol</i>	<i>Názov veličiny</i>	<i>Jednotka SI</i>
$cp$	- špecifická tepelná kapacita	$\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$F$	- teplovýmenná plocha	$\text{m}^2$
$\Delta_r H$	- reakčná entalpia chemickej reakcie	$\text{J.mol}^{-1}$
$m$	- hmotnosť	$\text{kg}$
$Q$	- teplo	$\text{J}$
$\dot{Q}$	- tepelný tok	$\text{W}$
$V$	- objem	$\text{m}^3$
$\alpha$	- koeficient prestupu tepla	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
$\vartheta$	- teplota	$\text{K}$
$\xi_V$	- rýchlosť chemickej reakcie na jednotku objemu reagujúcej zmesi	$\text{mol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$

- *HORNÉ INDEXY*

<i>Symbol</i>	<i>Názov veličiny</i>
$s$	- charakterizuje ustálený – rovnovážny stav



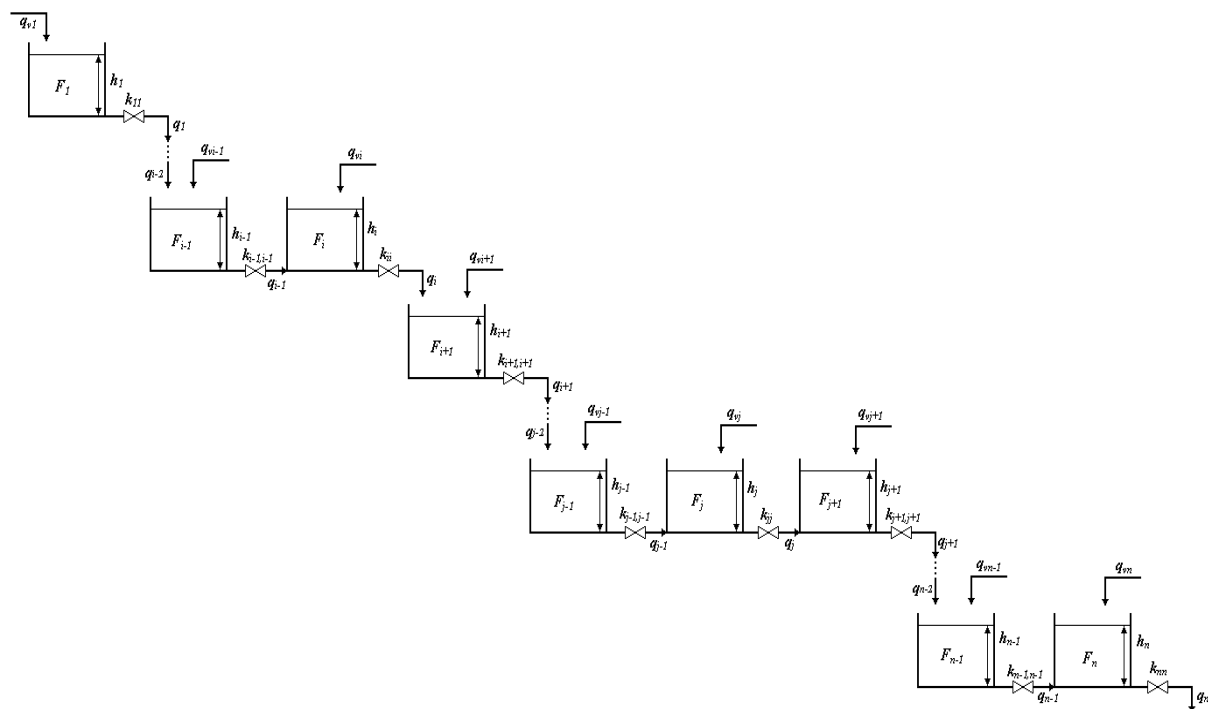
## 2 ZÁSObNÍKY KVAPALINY

Zásobníky kvapaliny sú prietochné procesy s jednoduchou akumuláciou hmoty. Patria medzi najrozšírenejšie zariadenia chemickej technológie. Zásobník kvapaliny je fyzikálne reprezentovaný nádržou, do ktorej priteká a vyteká kvapalina o určitom prietoku. Ako výstupná veličina systému sa najčastejšie uvažuje výška hladiny kvapaliny, ktorá je vo väčšine prípadov postavená do úlohy regulovanej veličiny s cieľom udržať ju na určitej žiadanej hodnote. Z hľadiska dynamických vlastností sa systém so sériovým zapojením  $n$ -zásobníkov kvapaliny, ktoré môžu byť zapojené do série s interakciou, alebo bez interakcie, je systémom  $n$ -tého rádu. Parametre, ktoré ovplyvňujú dynamické vlastnosti systému, sú plochy prierezov zásobníkov kvapaliny [2].

### 2.1 Zásobníky kvapaliny - nelineárny matematický model

#### 2.1.1 Teoretická časť

Uvažujme systém  $n$ -zásobníkov kvapaliny v zapojení (obr. 2.1) tak, že medzi niektorými dvojicami dochádza k interakcii.



Obr. 2.1 Systém  $n$ -zásobníkov kvapaliny

Úlohou je vytvoriť nelineárny a linearizovaný dynamický matematický model. Pri odvádzaní modelov zavedieme zjednodušujúce predpoklady:

- teplota kvapaliny je vo všetkých zásobníkoch rovnaká,
- hustota kvapaliny je vo všetkých zásobníkoch rovnaká ( $\rho = f(t)$ ).

Dynamický matematický model získame materiálovou bilanciou (kapitola 1.1), pre ktorú poznáme:

- hmotnosť kvapaliny v  $i$ -tom zásobníku kvapaliny -  $m_i(t)$
- hmotnostný tok kvapaliny na vstupe do  $i$ -teho zásobníka kvapaliny -  $\dot{m}_{vi}(t)$
- hmotnostný tok kvapaliny na výstupe z  $i$ -teho zásobníka kvapaliny -  $\dot{m}_i(t)$

Hmotnostný tok jednotlivých prúdov kvapaliny a hmotnosť kvapaliny v zásobníku môžeme vyjadriť pomocou vzťahov

$$\dot{m}_i(t) = q_i(t)\rho \quad (2.1)$$

$$m_i(t) = F_i h_i(t)\rho \quad (2.2)$$

Pre zjednodušenie zápisu nebudeme používať označenia  $q_i(t)$ ,  $q_{vi}(t)$ ,  $h_i(t)$ , ale  $q_i$ ,  $q_{vi}$ ,  $h_i$ . využitím rovnice materiálovej bilancie, s následným dosadením rovníc (2.1-2.2) a za predpokladov, že hustota kvapaliny a plochy prierezov zásobníkov kvapaliny sú konštantné, môžeme po jednoduchej úprave písať

$$q_{v1} = q_1 + F_1 \frac{dh_1}{dt} \quad h_1(0) = h_1^s \quad (2.3)$$

$$q_{vi-1} + q_{i-2} = q_{i-1} + F_{i-1} \frac{dh_{i-1}}{dt} \quad h_{i-1}(0) = h_{i-1}^s \quad (2.4)$$

$$q_{vi} + q_{i-1} = q_i + F_i \frac{dh_i}{dt} \quad h_i(0) = h_i^s \quad (2.5)$$

$$q_{vi+1} + q_i = q_{i+1} + F_{i+1} \frac{dh_{i+1}}{dt} \quad h_{i+1}(0) = h_{i+1}^s \quad (2.6)$$

$$q_{vj-1} + q_{j-2} = q_{j-1} + F_{j-1} \frac{dh_{j-1}}{dt} \quad h_{j-1}(0) = h_{j-1}^s \quad (2.7)$$

$$q_{vj} + q_{j-1} = q_j + F_j \frac{dh_j}{dt} \quad h_j(0) = h_j^s \quad (2.8)$$

$$q_{vj+1} + q_j = q_{j+1} + F_{j+1} \frac{dh_{j+1}}{dt} \quad h_{j+1}(0) = h_{j+1}^s \quad (2.9)$$

$$q_{vn-1} + q_{n-2} = q_{n-1} + F_{n-1} \frac{dh_{n-1}}{dt} \quad h_{n-1}(0) = h_{n-1}^s \quad (2.10)$$

$$q_{vn} + q_{n-1} = q_n + F_n \frac{dh_n}{dt} \quad h_n(0) = h_n^s \quad (2.11)$$

V týchto rovniciach vystupuje konštanta  $F_i$  (plocha prierezu  $i$ -teho zásobníka kvapaliny) a časovopremenné veličiny  $q_{vi}$ ,  $q_i$ ,  $h_i$ . Na to, aby rovnice (2.3-2.11) mali riešenie, potrebujeme niektoré časovopremenné veličiny určiť. Vstupné prietoky  $q_{vi}$  sú nezávislé od toho čo sa deje v jednotlivých zásobníkoch a predpokladáme, že ich poznáme. Z Bernouliho rovnice a rovnice kontinuity sa dá odvodiť vzťah pre výpočet prietoku výstupného prúdu zo zásobníka kvapaliny v závislosti od výšky hladiny. Pre zásobníky kvapaliny, medzi ktorými nenastáva interakcia, je prietok  $q_i$  funkciou výšky hladiny v príslušnom zásobníku a závisí od nej podľa vzťahu

$$q_i = \mu_i f_i \sqrt{2gh_i} \quad (2.12)$$

a pre zásobníky kvapaliny medzi ktorými nastáva interakcia je prietok  $q_i$  funkciou výšok hladín v príslušnom zásobníku a zásobníku nasledujúcom za ním t.j. platí

$$q_i = \mu_i f_i \sqrt{2g(h_i - h_{i+1})} \quad (2.13)$$

kde  $\mu_i$  je výtokový súčiniteľ,  $f_i$  je plocha prierezu výtokového otvoru a  $g$  je gravitačné zrýchlenie. Spojením konštánt dostaneme pre  $i$ -ty zásobník

$$\text{bez interakcie} \quad q_i = k_{ii} \sqrt{h_i} \quad (2.14)$$

$$\text{s interakciou} \quad q_i = k_{ii} \sqrt{h_i - h_{i+1}} \quad (2.15)$$

Po dosadení rovníc (2.14-2.15) do rovníc (2.3-2.11) zistíme, že jedinými neznámymi sú výšky hladín v jednotlivých zásobníkoch. Po vyjadrení derivácií výšok hladín v jednotlivých zásobníkoch podľa času dostaneme nelineárny stavový opis

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{F_1} q_{v1} - \frac{k_{11}}{F_1} \sqrt{h_1} \quad h_1(0) = h_1^s \quad (2.16)$$

$$\frac{dh_{i-1}}{dt} = \frac{1}{F_{i-1}} q_{vi-1} + \frac{k_{i-2,i-2}}{F_{i-1}} \sqrt{h_{i-2}} - \frac{k_{i-1,i-1}}{F_{i-1}} \sqrt{h_{i-1} - h_i} \quad h_{i-1}(0) = h_{i-1}^s \quad (2.17)$$

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{1}{F_i} q_{vi} + \frac{k_{i-1,i-1}}{F_i} \sqrt{h_{i-1} - h_i} - \frac{k_{ii}}{F_i} \sqrt{h_i} \quad h_i(0) = h_i^s \quad (2.18)$$

$$\frac{dh_{i+1}}{dt} = \frac{1}{F_{i+1}} q_{vi+1} + \frac{k_{ii}}{F_{i+1}} \sqrt{h_i} - \frac{k_{i+1,i+1}}{F_{i+1}} \sqrt{h_{i+1}} \quad h_{i+1}(0) = h_{i+1}^s \quad (2.19)$$

$$\frac{dh_{j-1}}{dt} = \frac{1}{F_{j-1}} q_{vj-1} + \frac{k_{j-2,j-2}}{F_{j-1}} \sqrt{h_{j-2}} - \frac{k_{j-1,j-1}}{F_{j-1}} \sqrt{h_{j-1} - h_j} \quad h_{j-1}(0) = h_{j-1}^s \quad (2.20)$$

$$\frac{dh_j}{dt} = \frac{1}{F_j} q_{vj} + \frac{k_{j-1,j-1}}{F_j} \sqrt{h_{j-1} - h_j} - \frac{k_{jj}}{F_j} \sqrt{h_j - h_{j+1}} \quad h_j(0) = h_j^s \quad (2.21)$$

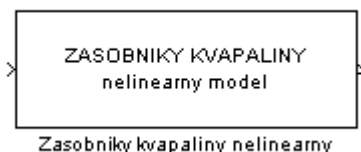
$$\frac{dh_{j+1}}{dt} = \frac{1}{F_{j+1}} q_{vj+1} + \frac{k_{jj}}{F_{j+1}} \sqrt{h_j - h_{j+1}} - \frac{k_{j+1,j+1}}{F_{j+1}} \sqrt{h_{j+1}} \quad h_{j+1}(0) = h_{j+1}^s \quad (2.22)$$

$$\frac{dh_{n-1}}{dt} = \frac{1}{F_{n-1}} q_{vn-1} + \frac{k_{n-2,n-2}}{F_{n-1}} \sqrt{h_{n-2}} - \frac{k_{n-1,n-1}}{F_{n-1}} \sqrt{h_{n-1} - h_n} \quad h_{n-1}(0) = h_{n-1}^s \quad (2.23)$$

$$\frac{dh_n}{dt} = \frac{1}{F_n} q_{vn} + \frac{k_{n-1,n-1}}{F_n} \sqrt{h_{n-1} - h_n} - \frac{k_{nn}}{F_n} \sqrt{h_n} \quad h_n(0) = h_n^s \quad (2.24)$$

### 2.1.2 Zásobníky kvapaliny nelineárny model - použitie bloku

**Zásobníky kvapaliny – nelineárny model** je simulinkový blok, ktorý je súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 2.2). Slúži na simuláciu dynamických vlastností systému  $n$ -zásobníkov kvapaliny, medzi ktorými môže, aj nemusí nastať interakcia. Blok je vytvorený tak, aby užívateľovi poskytoval čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.



Obr. 2.2 **Blok – zásobníky kvapaliny – nelineárny model**

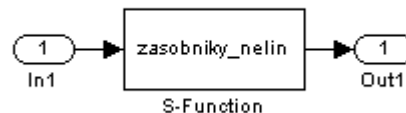
Táto časť práce je venovaná opisu daného bloku, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- opis bloku
- vyplnenie formulára daného bloku
- opis funkcií využívaných daným blokom

### 2.1.2.1 Opis bloku

Simulinkový blok Zásobníky kvapaliny - nelineárny model je subsystem, ktorý má jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do bloku (systému) je vektor riadiacich veličín, t.j. vstupné prietoky kvapaliny do jednotlivých zásobníkov. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z bloku (systému) sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená výšky hladín kvapaliny v jednotlivých zásobníkoch. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená výška hladiny v určitom zásobníku je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené blok zásobníky kvapaliny - nelineárny model je subsystem, ktorý v sebe zahŕňa s-funkciu *zasobniky\_nelin* (obr. 2.3), ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku zásobníkov kvapaliny v prostredí MATLAB.



Obr. 2.3 *Odmaskovaný subsystem zásobníkov kvapaliny*

Viac o s-funkcii a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 2.1.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Formulár bloku Zásobníky kvapaliny – nelineárny model má tvar, ktorý znázorňuje obrázok (obr. 2.4). Je tvorený z nasledujúcich častí

- *Názov masky bloku – ZASOBNIKY KVAPALINY*
- *Základný opis masky bloku – Zásobníky kvapaliny – nelineárny model*
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel – možnosti: OK, ...*

#### *Názov masky bloku*

Zahŕňa meno bloku a pre daný blok má tvar *ZASOBNIKY KVAPALINY*.

#### *Základný opis masky bloku*

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu.

**Block Parameters: Zásobníky kvapaliny nelinearny**

ZASOBNIKY KVAPALINY (mask)  
Zasobniky kvapaliny -nelinearny model

Parameters

Počet zásobníků  
[n]

Vektor riadiacich veličín 0 -nie 1 -ano [qvs1 .. qvsn]  
[1 0 .. ]

Vstupné prietoky [qvs1 qvs2 ... qvsn]  
[qvs1 qvs2 ... qvsn]

Vektor interakcií [1 0 0 .. 1 0 .. 0]  
[1 0 0 .. 1 0 .. 0]

Konštanty ventilov [k11 k22 .. knn]  
[k11 k22 .. knn]

Plochy prierezov zásobníkov [F1 F2 .. Fn]  
[F1 F2 .. Fn]

Vektor sledovaných výšok hladín [1 3 .. n]  
[h1 h2 .. hn]

OK Cancel Help Apply

Obr. 2.4 *Formulár bloku zásobníky kvapaliny – nelineárny model***Formulár – Parameters**

Je najhlavnejšia časť masky bloku. Pomocou neho sú zadávané jednotlivé parametre, ktoré sú potrebné pre správnu činnosť daného bloku. Ak sa zadávaný parameter skladá z viac ako jedného čísla, treba ho zadať vo vektorovom tvare, ktorý sa zapisuje v hranatých zátvorkách.

Formulár – Parameters bloku Zásobníky kvapaliny – nelineárny model (obr. 2.4) sa skladá z nasledujúcich položiek

- *Počet zásobníkov*
- *Vektor riadiacich veličín*
- *Vstupné prietoky*
- *Vektor interakcií*
- *Konštanty ventilov*
- *Plochy prierezov zásobníkov*
- *Vektor sledovaných výšok hladín*

Pri tvorbe návodu na vyplnenie daného formulára bol uvažovaný modelový príklad systém 3-zásobníkov kvapaliny (obr. 2.5) s interakciou medzi prvým a druhým zásobníkom. Riadiacimi veličinami sú vstupné prietoky do prvého a tretieho zásobníka kvapaliny a výstupnými veličinami sú výšky v prvom, druhom a treťom zásobníku kvapaliny. Zadané parametre:

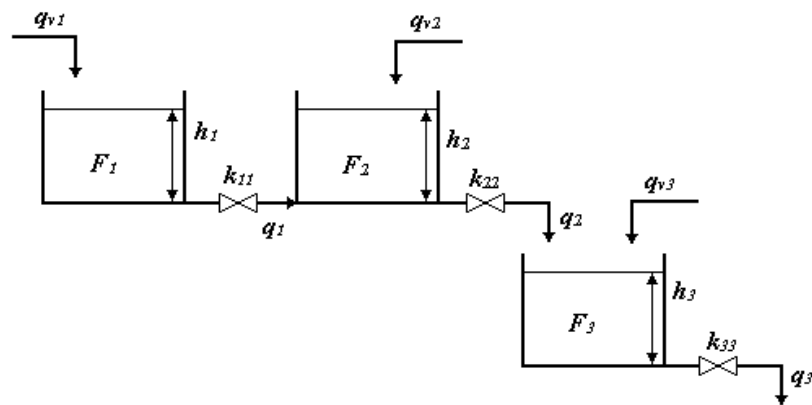
- vstupné prietoky v pôvodnom ustálenom stave do jednotlivých zásobníkov:

$$q_{v1} = 1,0 \text{ m}^3/\text{min} \quad q_{v2} = 0,5 \text{ m}^3/\text{min} \quad q_{v3} = 0,25 \text{ m}^3/\text{min}$$

- parametre zásobníkov konštanty ventilov  $k_{ii}$  a plochy prierezov zásobníkov  $F_i$

$$k_{11} = 1,4 \text{ m}^{2,5}/\text{min} \quad k_{22} = 1,4 \text{ m}^{2,5}/\text{min} \quad k_{33} = 1,4 \text{ m}^{2,5}/\text{min}$$

$$F_1 = 2,4 \text{ m}^2 \quad F_2 = 2,4 \text{ m}^2 \quad F_3 = 2,4 \text{ m}^2$$



Obr. 2.5 Modelový príklad - systém 3-zásobníkov kvapaliny

**Počet zásobníkov** – zadáva sa počet zásobníkov kvapaliny z ktorých sa systém skladá.

Pre modelový príklad:

Počet zásobníkov

3

**Vektor riadiacich veličín** 0-nie 1-ano  $[q_{v1}, q_{v2}, \dots, q_{vn}]$  – vektor, ktorý nadobúda hodnoty 0 a 1. Má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet zásobníkov kvapaliny. Riadiace veličiny pre daný systém sú vstupné prietoky do jednotlivých zásobníkov kvapaliny. Ak  $i$ -ty vstupný prietok (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude riadiaca veličina, prvok vektora na  $i$ -tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že  $j$ -ty vstupný prietok nebude riadiaca veličina, prvok vektora na  $j$ -tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

Vektor riadiacich veličín

$[1 \ 0 \ 1]$

**Vstupné prietoky [qvs1 qvs2 ... qvs $n$ ]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x n**, kde  $n$  je počet zásobníkov kvapaliny. Prvky vektora sú vstupné prietoky do jednotlivých zásobníkov kvapaliny, pričom  $i$ -ty vstupný prietok je  $i$ -tým prvkom vektora. V prípade, že je zadáný iba vstupný prietok do prvého zásobníka kvapaliny, alebo iba niektoré vstupné prietoky kvapaliny je treba vyplniť aj ostatné prvky vektora tak, že nadobudnú hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vstupné prietoky [qvs1 qvs2 ... qvs}_n] \quad [1 \ 0.5 \ 0.25]$$

**Vektor interakcií [0 1 .. 1 ..1 0]** – vektor, ktorý nadobúda hodnoty **0** a **1**. Má rozmer **1 x n**, kde  $n$  je počet zásobníkov kvapaliny. Ak nastáva interakcia medzi  $i$ -tým a  $i+1$  zásobníkom kvapaliny interakcia, nadobudne  $i$ -ty prvok vektora hodnotu 1. V opačnom prípade nadobudne hodnotu 0. Posledný prvok vektora má vždy hodnotu nula.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vektor interakcii} \quad [1 \ 0 \ 0]$$

**Konštanty ventilov [k11 k22 ... knn]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x n**, kde  $n$  je počet zásobníkov. Prvky vektora sú konštanty ventilov jednotlivých zásobníkov, pričom  $i$ -ta konštanta ventilu je  $i$ -tým prvkom vektora.

Pre modelový príklad:

$$\text{Konštanty ventilov [k11 k22 ... knn]} \quad [1.4 \ 1.4 \ 1.4]$$

**Plochy prierezov zásobníkov [F1 F2 ... Fn]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x n**, kde  $n$  je počet zásobníkov kvapaliny. Prvky vektora sú prislúchajúce plochy prierezov jednotlivých zásobníkov kvapaliny, pričom  $i$ -ta plocha prierezu je  $i$ -tým prvkom vektora.

Pre modelový príklad:

$$\text{Plochy prierezov zásobníkov [F1 F2 ... Fn]} \quad [2.4 \ 2.4 \ 2.4]$$

**Vektor sledovaných výšok hladín** – vektor, ktorý má rozmer **1 x r**, kde  $r$  je počet výšok, ktoré chce užívateľ sledovať - merať. Ak má byť výstupná, t.j. sledovaná veličina výška z  $i$ -teho zásobníka kvapaliny, tak jeden prvok vektora nadobudne hodnotu  $i$ . Tak isto sa volia aj ostatné výstupné veličiny, pričom čísla – prvky vektora musia byť zoradené od najmenšieho po najväčšie.

Pre modelový príklad

$$\text{Vektor sledovaných výšok hladín} \quad [1 \ 2 \ 3]$$



Správne vyplnený formulár pre uvažovaný modelový príklad, t.j. systém 3-zásobníkov kvapaliny je znázornený na obr. 2.6. a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMZN\_demo*.

**Block Parameters: Zásobníky kvapaliny nelineárny**

ZASOBNÍKY KVAPALINY (mask)  
 Zásobníky kvapaliny - nelineárny model

Parameters

Počet zásobníkov

Vektor radiacích veličín 0 -nie 1 -ano [qvs1 .. qvsn]

Vstupné prietoky [qvs1 qvs2 ... qvsn]

Vektor interakcií [1 0 0 .. 1 0 .. 0]

Konštanty ventilov [k11 k22 .. knn]

Plochy prierezov zásobníkov [F1 F2 .. Fn]

Vektor sledovaných výšok hladín [1 3 .. n - čísla zásobníkov]

OK Cancel Help Apply

Obr. 2.6 *Správne vyplnený formulár pre modelový príklad*

### *Ponukový panel*

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli, t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

### 2.1.2.3 Opis funkcii využívaných daným blokom

Simulinkový blok zásobníky kvapaliny – nelineárny model využíva nasledovné funkcie:

- *zasobniky1*                      *zasobniky2*
- *zasobniky4*                      *matica\_C*
- *zasobniky\_nelin*

*zasobniky1* – funkcia, ktorá generuje na základe zadaných vstupných parametrov vektor derivácií zmien výšok hladín kvapaliny v jednotlivých zásobníkoch kvapaliny od času a transponuje daný vektor do výstupnej premennej *k*. Funkcia je používaná vo funkcii *zasobniky2* a v s-funkcii *zasobniky\_nelin*.

*zasobniky2* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov, využitím funkcie *fsolve*, počíta hodnoty výšok hladín kvapaliny v jednotlivých zásobníkoch kvapaliny v ustálenom – rovnovážnom stave. Funkcia je používaná v s-funkcii *zasobniky\_nelin*.

*zasobniky4* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov vytvorí vektor výstupných parametrov tak, že určí ktoré vstupné parametre sú riadiace veličiny a priradí im príslušné číselné hodnoty. Funkcia je používaná v s-funkcii *zasobniky\_nelin*.

*matica\_C* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *C* – maticu výstupu. Funkcia je definovaná priamo v maske bloku a je využívaná s-funkciou *zasobniky\_nelin*.

*zasobniky\_nelin* – s-funkcia vytvorená pre simulinkový blok zásobníky kvapaliny – nelineárny model, ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku zásobníkov kvapaliny. Využíva funkcie:

- *zasobniky1*                      *zasobniky2*
- *zasobniky4*                      *matica\_C* – nepriamo

Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Zasobniky\_kvapaliny\nelin*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov – premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

## 2.2 Zásobníky kvapaliny linearizovaný matematický model

### 2.2.1 Teoretická časť

Pri odvádzaní linearizovaného matematického modelu uvažujeme ten istý systém zásobníkov kvapaliny (obr. 2.1) a vychádzame z predpokladov, ktoré platia pre nelineárny matematický model, pričom využijeme časť rovníc, ktoré boli už odvodené.

V ustálenom stave (ak vstupné prietoky sú dlhodobou konštantné), ktorý je počítaný kvôli pracovnému bodu pri linearizácii je výška hladiny kvapaliny v zásobníkoch ustálená a jej derivácia podľa času je nulová. Pre  $i$ -ty zásobník to môžeme matematicky vyjadriť v tvare

$$\frac{dh_i}{dt} = 0 \quad (2.25)$$

a model zásobníkov v ustálenom stave má tvar

$$\text{prvý zásobník} \quad q_{v1}^s = q_1^s \quad (2.26)$$

$$i\text{-ty zásobník} \quad q_{vi}^s + q_{i-1}^s = q_i^s \quad (2.27)$$

$$j\text{-ty zásobník} \quad q_{vj}^s + q_{j-1}^s = q_j^s \quad (2.28)$$

$$n\text{-tý zásobník} \quad q_{vn}^s + q_{n-1}^s = q_n^s \quad (2.29)$$

alebo

$$\text{prvý zásobník} \quad q_{v1}^s = k_{11} \sqrt{h_1^s} \quad (2.30)$$

$$i\text{-ty zásobník} \quad q_{vi}^s + q_{i-1}^s = k_{ii} \sqrt{h_i^s} \quad (2.31)$$

$$j\text{-ty zásobník} \quad q_{vj}^s + q_{j-1}^s = k_{jj} \sqrt{h_j^s - h_{j+1}^s} \quad (2.32)$$

$$n\text{-tý zásobník} \quad q_{vn}^s + q_{n-1}^s = k_{nn} \sqrt{h_n^s} \quad (2.33)$$

alebo

$$q_{v1}^s = k_{11} \sqrt{h_1^s} + F_1 \frac{dh_1^s}{dt} \quad (2.34)$$

$$q_{vi-1}^s + k_{i-2,i-2} \sqrt{h_{i-2}^s} = k_{i-1,i-1} \sqrt{h_{i-1}^s - h_i^s} + F_{i-1} \frac{dh_{i-1}^s}{dt} \quad (2.35)$$

$$q_{vi}^s + k_{i-1,i-1} \sqrt{h_{i-1}^s - h_i^s} = k_{ii} \sqrt{h_i^s} + F_i \frac{dh_i^s}{dt} \quad (2.36)$$

$$q_{vi+1}^s + k_{ii} \sqrt{h_i^s} = k_{i+1,i+1} \sqrt{h_{i+1}^s} + F_{i+1} \frac{dh_{i+1}^s}{dt} \quad (2.37)$$

$$q_{vj-1}^s + k_{j-2,j-2} \sqrt{h_{j-2}^s} = k_{j-1,j-1} \sqrt{h_{j-1}^s - h_j^s} + F_{j-1} \frac{dh_{j-1}^s}{dt} \quad (2.38)$$

$$q_{vj}^s + k_{j-1,j-1} \sqrt{h_{j-1}^s - h_j^s} = k_{jj} \sqrt{h_j^s - h_{j+1}^s} + F_j \frac{dh_j^s}{dt} \quad (2.39)$$

$$q_{vj+1}^s + k_{jj} \sqrt{h_j^s - h_{j+1}^s} = k_{j+1,j+1} \sqrt{h_{j+1}^s} + F_{j+1} \frac{dh_{j+1}^s}{dt} \quad (2.40)$$

$$q_{vn-1}^s + k_{n-2,n-2} \sqrt{h_{n-2}^s} = k_{n-1,n-1} \sqrt{h_{n-1}^s - h_n^s} + F_{n-1} \frac{dh_{n-1}^s}{dt} \quad (2.41)$$

$$q_{vn}^s + k_{n-1,n-1} \sqrt{h_{n-1}^s - h_n^s} = k_{nn} \sqrt{h_n^s} + F_n \frac{dh_n^s}{dt} \quad (2.42)$$

Predpokladajme, že sú dané vstupné prietoky do zásobníkov kvapaliny  $q_{v1}^s, q_{v2}^s, \dots, q_{vn}^s$  v ustálenom stave. Potom môžeme vypočítať výšky hladiny kvapaliny v jednotlivých zásobníkoch v ustálenom stave z rovníc (2.30-2.33)

$$n\text{-tý zásobník} \quad h_n^s = \left( \frac{q_{v1}^s + q_{v2}^s + \dots + q_n^s}{k_{nn}} \right)^2 \quad (2.43)$$

$$j\text{-ty zásobník} \quad h_j^s = \left( \frac{q_{v1}^s + q_{v2}^s + \dots + q_j^s}{k_{jj}} \right)^2 + h_{j+1}^s \quad (2.44)$$

$$i\text{-ty zásobník} \quad h_i^s = \left( \frac{q_{v1}^s + q_{v2}^s + \dots + q_i^s}{k_{ii}} \right)^2 + h_{i+1}^s \quad (2.45)$$

$$\text{prvý zásobník} \quad h_1^s = \left( \frac{q_{v1}^s}{k_{11}} \right)^2 \quad (2.46)$$

Kvôli linearizácii analyzujeme dynamický model zásobníkov kvapaliny (2.16-2.24). Vidíme, že v ňom vystupujú časovopremenné veličiny:  $q_{vi}, q_i, h_i$  a poznáme ustálený stav  $q_{vi}^s, q_i^s, h_i^s$ . Rovnice (2.34-2.42) sú nelineárne vzhľadom na  $h_i$ , pretože obsahujú odmocninu  $h_i$ .

Odčítaním (2.16) od (2.34) dostaneme pre prvý zásobník rovnicu v tvare

$$q_{v1} - q_{v1}^s = k_{11} \sqrt{h_1} - k_{11} \sqrt{h_1^s} + F_1 \frac{d(h_1 - h_1^s)}{dt} \quad (2.47)$$

Podobné rovnice dostaneme, ak odčítame rovnice (2.17-2.24) od rovníc (2.35-2.42).

Zadefinujeme odchýlkové veličiny a to:

$$\text{vstupné} \quad u_i(t) = q_{vi}(t) - q_{vi}^s \quad \text{pre } i = 1 \dots n \quad (2.48)$$

$$\text{stavové} \quad x_i(t) = h_i(t) - h_i^s \quad \text{pre } i = 1 \dots n \quad (2.49)$$

Nelineárny člen  $\sqrt{h_i}$  pre zásobníky kvapaliny medzi ktorými nenastala interakcie, resp. nelineárny člen  $\sqrt{h_j - h_{j+1}}$  pre zásobníky kvapaliny, medzi ktorými nastala interakcia upravíme využitím rozvoja do Taylorovho radu (1.1-1.2), pričom dostaneme výrazy

$$\sqrt{h_i} = \sqrt{h_i^s} + \frac{1}{2\sqrt{h_i^s}}(h_i - h_i^s) \quad (2.50)$$

$$\sqrt{h_j - h_{j+1}} = \sqrt{h_j^s - h_{j+1}^s} + \frac{1}{2\sqrt{h_j^s - h_{j+1}^s}}(h_j - h_j^s) + \frac{1}{2\sqrt{h_j^s - h_{j+1}^s}}(h_{j+1} - h_{j+1}^s) \quad (2.51)$$

Dosadením za  $\sqrt{h_1}$  z (2.50) do (2.47) dostaneme

$$q_{v1} - q_{v1}^s = k_{11}\sqrt{h_1^s} + k_{11}\frac{1}{2\sqrt{h_1^s}}(h_1 - h_1^s) - k_{11}\sqrt{h_1^s} + F_1\frac{d(h_1 - h_1^s)}{dt} \quad (2.52)$$

Zadefinujeme konštantu

$$k_1 = \frac{k_{11}}{2\sqrt{h_1^s}} \quad (2.53)$$

Dosadením do rovnice (2.52) a následnou úpravou dostaneme rovnicu pre prvý zásobník kvapaliny v ustálenom stave v tvare

$$q_{v1} - q_{v1}^s = k_1(h_1 - h_1^s) + F_1\frac{d(h_1 - h_1^s)}{dt} \quad (2.54)$$

Podobné rovnice pre ostatné zásobníky dostaneme rovnakým postupom ako sme získali rovnicu (2.54). Dosadením zadaných odchýlkových veličín do získaných rovníc a následnými úpravami dostaneme lineárny stavový opis v tvare

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{1}{F_1}u_1(t) - \frac{k_1}{F_1}x_1(t) \quad x_1(0) = 0 \quad (2.55)$$

$$\frac{dx_{i-1}(t)}{dt} = \frac{1}{F_{i-1}}u_{i-1}(t) + \frac{k_{i-2}}{F_{i-1}}x_{i-2}(t) - \frac{k_{i-1}}{F_{i-1}}x_{i-1}(t) \quad x_{i-1}(0) = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \frac{1}{F_i}u_i(t) + \frac{k_{i-1}}{F_i}x_{i-1}(t) - \left(\frac{k_{i-1} + k_i}{F_i}\right)x_i(t) \quad x_i(0) = 0 \quad (2.57)$$

$$\frac{dx_{i+1}(t)}{dt} = \frac{1}{F_{i+1}}u_{i+1}(t) + \frac{k_i}{F_{i+1}}x_i(t) - \frac{k_{i+1}}{F_{i+1}}x_{i+1}(t) \quad x_{i+1}(0) = 0 \quad (2.58)$$

$$\frac{dx_{j-1}(t)}{dt} = \frac{1}{F_{j-1}} u_{j-1}(t) + \frac{k_{j-2}}{F_{j-1}} x_{j-2}(t) - \frac{k_{j-1}}{F_{j-1}} x_{j-1}(t) + \frac{k_{j-1}}{F_{j-1}} x_j(t) \quad x_{j-1}(0) = 0 \quad (2.59)$$

$$\frac{dx_j(t)}{dt} = \frac{1}{F_j} u_j(t) + \frac{k_{j-1}}{F_j} x_{j-1}(t) - \left( \frac{k_{j-1} + k_j}{F_j} \right) x_j(t) + \frac{k_j}{F_j} x_{j+1}(t) \quad x_j(0) = 0 \quad (2.60)$$

$$\frac{dx_{j+1}(t)}{dt} = \frac{1}{F_{j+1}} u_{j+1}(t) + \frac{k_j}{F_{j+1}} x_j(t) - \left( \frac{k_j + k_{j+1}}{F_{j+1}} \right) x_{j+1}(t) \quad x_{j+1}(0) = 0 \quad (2.61)$$

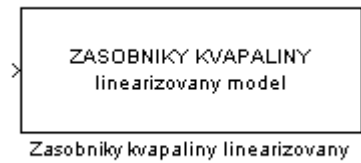
$$\frac{dx_{n-1}(t)}{dt} = \frac{1}{F_{n-1}} u_{n-1}(t) + \frac{k_{n-2}}{F_{n-1}} x_{n-2}(t) - \frac{k_{n-1}}{F_{n-1}} x_{n-1}(t) + \frac{k_{n-1}}{F_{n-1}} x_n(t) \quad x_{n-1}(0) = 0 \quad (2.62)$$

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = \frac{1}{F_n} u_n(t) + \frac{k_{n-1}}{F_n} x_{n-1}(t) - \left( \frac{k_{n-1} + k_n}{F_n} \right) x_n(t) \quad x_n(0) = 0 \quad (2.63)$$

Na základe linearizovaného stavového opisu môžeme vytvoriť matice  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . Matica  $A$  sa nazýva matica systému a má rozmer  $n \times n$ , kde  $n$  je počet stavových veličín t.j. počet výšok hladín kvapaliny pre jednotlivé zásobníky kvapaliny. Jednotlivé prvky matice sú tvorené výrazom, ktorý vystupuje pred premennou  $x_i$  v príslušnej rovnici linearizovaného stavového opisu. Ostatné prvky matice nadobúdajú nulovú hodnotu. Matica  $B$  sa nazýva matica riadenia a jej rozmery závisia od voľby počtu vstupov t.j. počtu vstupných prietokov. Ak označíme počet vstupných prietokov  $r$  tak jej rozmer má tvar  $n \times r$ . Jednotlivé prvky sú tvorené výrazom, ktorý vystupuje pred premennou  $u_i$  v príslušnej rovnici lineárneho stavového opisu. Ostatné prvky nadobúdajú nulovú hodnotu. Matica  $C$  je maticou výstupu. Je jednotková matica a jej rozmery závisia od voľby počtu sledovaných veličín (výšok hladín v jednotlivých zásobníkoch kvapaliny). Ak počet sledovaných veličín označíme  $m$  tak rozmer matice je  $m \times n$ . Matica  $D$  je nulová matica a jej rozmery závisia od rozmerov matice  $B$  a  $C$ . Jej rozmer je  $m \times r$ .

### 2.2.2 Zásobníky kvapaliny linearizovaný model - použitie bloku

**Zásobníky kvapaliny – linearizovaný model** je simulinkový blok, ktorý je súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 2.7). Slúži na simulovanie dynamických vlastností systému  $n$ -zásobníkov kvapaliny medzi ktorými môže, aj nemusí nastať interakcia. Blok je vytvorený tak, aby užívateľovi poskytoval čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.

Obr. 2.7 **Blok – zásobníky kvapaliny – linearizovaný model**

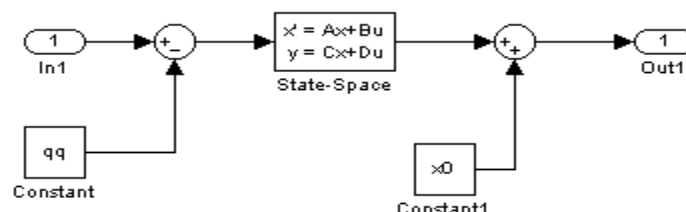
Táto časť práce je venovaná opisu daného bloku, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- opis bloku
- vyplnenie formulára daného bloku
- opis funkcií využívaných daným blokom

### 2.2.2.1 Opis bloku

Simulinkový blok Zásobníky kvapaliny - linearizovaný model je subsystém, ktorý má jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do bloku (systému) je vektor riadiacich veličín, t.j. vstupné prietoky kvapaliny do jednotlivých zásobníkov. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z bloku (systému) sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená výšky hladín kvapaliny v jednotlivých zásobníkoch. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená výška hladiny v určitom zásobníku je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené, blok zásobníky kvapaliny - linearizovaný model je subsystém, ktorý v sebe zahŕňa stavový opis maticového tvaru (obr. 2.8), ktorý je zápisom sústavy linearizovaných diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daných zásobníkov kvapaliny.

Obr. 2.8 **Odmaskovaný subsystém zásobníkov kvapaliny**

Viac o subsystéme a funkciách použitých v danom bloku je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 2.2.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Formulár bloku Zásobníky kvapaliny – linearizovaný model (obr. 2.9) má podobný tvar ako blok Zásobníky kvapaliny – nelineárny model. Odlišuje sa v názve bloku, základnom opise masky bloku a jednej položke formulára. Preto budú spomenuté len tie časti, ktoré sú odlišné. Obsahuje tieto časti

- *Názov masky bloku – ZASOBNIKY KVAPALINY*
- *Základný opis masky bloku – Zásobníky kvapaliny – linearizovaný model*
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel – možnosti: OK, ...*

#### **Názov masky bloku**

Zahrňa meno bloku a pre daný blok má tvar *ZASOBNIKY KVAPALINY*.

#### **Základný opis masky bloku**

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu. V tejto časti môžu byť uvedené rok vytvorenia, verzia, meno osôb – organizácie, ktorá daný blok vytvorila atď.

#### **Formulár – Parameters**

Je veľmi podobný systému zásobníky kvapaliny – nelineárny systém a odlišuje sa tým, že má navyše položku (obr. 2.9)

- *Check box – Vypísanie matíc  $A, B, C, D$*

Položky, ktoré majú rovnaký tvar sú popísané v podkapitole 2.1.2.2 *Vyplnenie formulára daného bloku* časti *Formulár –Parameters*.

**Vypísanie matíc  $A, B, C, D$**  – ak je zaškrtnutý check-box, tak sa po kliknutí na voľbu OK resp. APPLY vypíšu matice  $A, B, C, D$  v pracovnom okne MATLABu. V opačnom prípade sa blok „zatvorí“, nevypíšu sa matice a systém je pripravený na simuláciu. Ak chceme vypísať matice, tak pre modelový príklad

*Vypísanie matíc  $A, B, C, D$*





**Block Parameters: Zásobníky kvapaliny linearizovany**

ZASOBNIKY KVAPALINY (mask)  
Zásobníky kvapaliny - linearizovany model

Parameters

Počet zásobníků  
[1]

Vektor radiacích veličín 0 - nie 1 - ano [qvs1 .. qvsn]  
[1 0 .. 0]

Vstupné prietoky [qvs1 qvs2 ... qvsn]  
[qvs1 qvs2 ... qvsn]

Vektor interakcií [1 0 1 1 0 .. 0]  
[1 0 .. 10 .. 0]

Konštanty ventilov [k11 k22 .. knn]  
[k11 k22 .. knn]

Plochy prierezov zásobníkov [F1 F2 .. Fn]  
[F1 F2 .. Fn]

Vektor sledovaných výšok hladín [1 3 .. n - čísla zásobníkov]  
[h1 h2 .. hi .. hn]

☐ Vypísanie matic A,B,C,D

OK Cancel Help Apply

Obr. 2.9 Formulár bloku zásobníky kvapaliny – linearizovaný model

Pri tvorbe návodu na vyplnenie daného formulára bol uvažovaný ten istý modelový príklad ako pri tvorbe návodu pre blok Zásobníky kvapaliny – nelineárny model.

Správne vyplnený formulár pre uvažovaný modelový príklad, t.j. systém 3-zásobníkov kvapaliny je znázornený na obr. 2.10. a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMZL\_demo*.

### Ponukový panel

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

**Block Parameters: Zásobníky kvapaliny linearizovany**

ZASOBNIKY KVAPALINY (mask)  
Zásobníky kvapaliny - linearizovany model

Parameters

Počet zásobníkov  
3

Vektor riadiacich veličín 0 - nie 1 - ano [qvs1 .. qvsn]  
[1 0 1]

Vstupné prietoky [qvs1 qvs2 ... qvsn]  
[1.0 0.5 0.25]

Vektor interakcií [1 0 1 1 0 .. 0]  
[1 0 0]

Konštanty ventilov [k11 k22 .. knn]  
[1.4 1.4 1.4]

Plochy prierezov zásobníkov [F1 F2 .. Fn]  
[2.4 2.4 2.4]

Vektor sledovaných výšok hladín [1 3 .. n - čísla zásobníkov]  
[1 2 3]

☒ Vypísanie matic A,B,C,D

OK Cancel Help Apply

Obr. 2.10 Správne vyplnený formulár pre modelový príklad

### 2.2.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom

Simulinkový blok zásobníky kvapaliny – linearizovaný model využíva nasledovné funkcie:

- *matica*
- *matica\_A*                      *matica\_B*
- *matica\_C*                      *matica\_D*
- *zasobniky2*                      *zasobniky3*

*matica* – m-file, ktorý na základe zadaných vstupných parametrov pre jednotlivé funkcie vypočíta zodpovedajúce výstupy funkcií. Je definovaná priamo v maske daného bloku.

Využíva funkcie: *matica\_A*, *matica\_B*, *matica\_C*, *matica\_D*, *zasobniky2*, *zasobniky3*.

*matica\_A* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *A* – maticu systému.

*matica\_B* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *B* – maticu riadenia.

*matica\_C* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *C* – maticu výstupu.

*matica\_D* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *D*.

*zasobniky2* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov, využitím funkcie *fsolve*, počíta hodnoty výšok hladín kvapaliny v jednotlivých zásobníkoch kvapaliny v ustálenom – rovnovážnom stave. Funkcia je používaná v m-file *matica*.

*zasobniky3* – funkcia, ktorej úlohou je vytvoriť zo zadaných vstupných parametrov výstupný vektor sledovaných výšok hladín v systéme zásobníkov kvapaliny v ustálenom – rovnovážnom stave.

Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Zasobniky\_kvapaliny\lin*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov – premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

## 2.3 Zoznam použitých symbolov

- *VELIČINY*

<i>Symbol</i>	<i>- Názov veličiny</i>	<i>Jednotka SI</i>
$F_i$	- plocha prierezu i-teho zásobníka kvapaliny	$\text{m}^2$
$f_i$	- plocha prierezu výtokového otvoru pre i-ty zásobník	$\text{m}^2$
$g$	- gravitačné zrýchlenie	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$h_i$	- výška hladiny kvapaliny v i-tom zásobníku	$\text{m}$
$k_i$	- linearizačná konštanta pre i-ty zásobník kvapaliny	$\text{m}^2$
$k_{ii}$	- konštanta ventilu pre i-ty zásobník kvapaliny	$\text{m}^{2,5} \cdot \text{s}^{-1}$
$m_i$	- hmotnosť kvapaliny v i-tom zásobníku kvapaliny	$\text{kg}$
$\dot{m}_i$	- hmotnostný tok kvapaliny do i-teho zásobníka kvapaliny	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$q_i$	- objemový prietok kvapaliny do i-teho zásobníka kvapaliny	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$q_{vi}$	- vstupný objemový prietok kvapaliny do i-teho zásobníka	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$\mu_i$	- výtokový súčiniteľ	bezrozmerná
$\rho$	- hustota tekutiny	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

- *DOLNÉ INDEXY*

*Symbol - Názov veličiny*

---

- $i$  - poradové číslo zásobníka kvapaliny – i-ty zásobníky
- $j$  - poradové číslo zásobníka kvapaliny – j-ty zásobníky
- $n$  - poradové číslo zásobníka kvapaliny – n-ty zásobníky
- $n$  - počet zásobníkov kvapaliny
- $v$  - vstupná veličina

- *HORNÉ INDEXY*

*Symbol - Názov veličiny*

---

- $s$  - charakterizuje ustálený – rovnovážny stav

## 3 VÝMENNÍKY TEPLA

Z rozsiahlej skupiny systémov s výmenou tepla, ktoré sa často používajú v chemickom priemysle, sa budeme zaoberať len základnými typmi výmenníkov, a to takými, v ktorých dochádza k výmene tepla medzi dvoma kvapalinami, alebo kvapalinami a stenou výmenníka.

Ak sú kvapaliny, medzi ktorými dochádza k výmene tepla dokonale miešané, sú teploty kvapalín charakterizujúce stav systému nezávislé od priestorových nezávisle premenných, v dynamickom stave sú len funkciami času a tieto systémy sa nazývajú systémami so sústredenými parametrami. Ak sú teploty kvapalín aj funkciami jednej alebo viacerých priestorových premenných, ide o systémy s rozloženými parametrami [3].

Vo všetkých prípadoch budeme predpokladať, že vlastnosti kvapalín, medzi ktoré patrí hustota, špecifické tepelné kapacity, koeficienty prestupu a prechodu tepla sú v čase a priestore konštantné. Nebudeme brať do úvahy vedenie tepla v kvapalinách ani v materiáloch, z ktorých sú výmenníky vyrobené. Budeme zanedbávať aj tepelný odpor plôch, cez ktoré dochádza k prechodu tepla.

Práca sa zaoberá nasledujúcimi typmi výmenníkov tepla

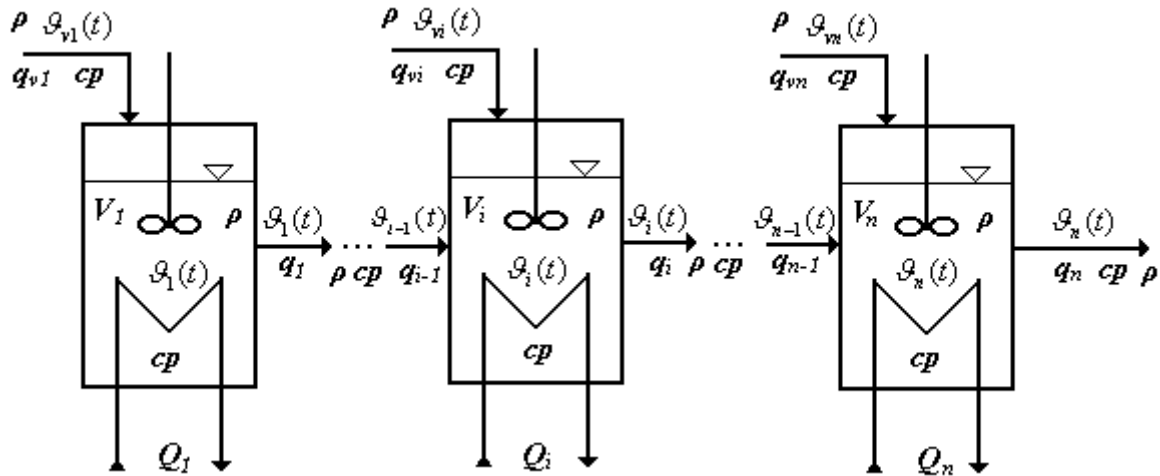
- *Prietokové ohrievače*
- *Plášťové výmenníky tepla*
- *Jednkapacitný výmenník tepla*
- *Trojkapacitný výmenník tepla – súprudový*

### 3.1 Prietokové ohrievače

Uvedené zariadenia sú najjednoduchším typom tepelných výmenníkov, kde ohrevným zariadením môže byť ohrevná špirála.

#### 3.1.1 Teoretická časť

Predpokladáme, že tepelné toky zo zdroja do ohrievanej kvapaliny nezávisia od teploty kvapaliny, ale závisia len od príkonu zdroja. Systém  $n$ -prietokových ohrievačov zapojených v sérii je znázornený na obr.3.1.

Obr. 3.1 Systém  $n$ -prietokových ohrievačov zapojených v sérii

Pri odvodení rovníc tepelnej bilancie predpokladáme dokonalé miešanie ohrievanej kvapaliny a nulové straty tepla do okolia. Pri týchto predpokladoch a predpokladoch uvedených vyššie je systém opísaný diferenciálnymi rovnicami prvého rádu s konštantnými koeficientmi:

pre prvý prietokový ohrievač

$$q_{v1}(t)\rho cp \vartheta_{v1}(t) + Q_1(t) = q_1(t)\rho cp \vartheta_1(t) + V_1\rho cp \frac{d\vartheta_1(t)}{dt} \quad (3.1)$$

a pre 2 až  $n$ -tý prietokový ohrievač

$$q_{vi}(t)\rho cp \vartheta_{vi}(t) + q_{i-1}(t)\rho cp \vartheta_{i-1}(t) + Q_i(t) = q_i(t)\rho cp \vartheta_i(t) + V_i\rho cp \frac{d\vartheta_i(t)}{dt} \quad (3.2)$$

so začiatočnými podmienkami  $\vartheta_i(0) = \vartheta_i^s$  pre  $i = 1, \dots, n$ . Vstupnými veličinami systému sú tepelné výkony ohrievača  $Q(t)$ , teploty kvapaliny na vstupoch do jednotlivých ohrievačov  $\vartheta_{vi}(t)$  a vstupné prietoky do jednotlivých prietokových ohrievačov. V rovnovážnom, (ustálenom) stave sa akumulčné členy v rovniciach (3.1-3.2) rovnajú nule. Potom matematický model rovnovážneho stavu má tvar

pre prvý prietokový ohrievač

$$q_{v1}^s \rho cp \vartheta_{v1}^s + Q_1^s = q_1^s \rho cp \vartheta_1^s \quad (3.3)$$

a pre 2 až  $n$ -tý prietokový ohrievač

$$q_{vi}^s \rho cp \vartheta_{vi}^s + q_{i-1}^s \rho cp \vartheta_{i-1}^s + Q_i^s = q_i^s \rho cp \vartheta_i^s \quad (3.4)$$

Riešením týchto rovníc získame pre zadané vstupné parametre teploty v jednotlivých prietokových ohrievačoch  $\mathcal{G}_i^s$ , ktoré sú začiatočnými podmienkami pre riešenie rovníc (3.1-3.2). Zároveň sú pracovným bodom, v okolí ktorého môžeme linearizovať daný matematický model [3].

### 3.1.2 Prietokové ohrievače – použitie bloku

**Prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie** je simulinkový blok, ktorý je súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr.3.1). Slúži na simuláciu dynamických vlastností systému  $n$ -prietokových ohrievačov zapojených v sérii. Blok je vytvorený tak, aby užívateľovi poskytoval čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.



Obr. 3.2 **Blok – prietokové ohrievače**

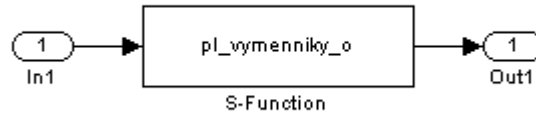
Táto časť práce je venovaná opisu daného bloku, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- opis bloku
- vyplnenie formulára daného bloku
- opis funkcií využívaných daným blokom

#### 3.1.2.1 Opis bloku

Simulinkový blok Prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie je subsystém, ktorý má jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do bloku (systému) je vektor riadiacich veličín t.j. vstupné prietoky a vstupné teploty ohrievaného média (kvapaliny) a tepelný výkon ohrevného zariadenia pre jednotlivé prietokové ohrievače. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z bloku sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená teploty kvapaliny v jednotlivých prietokových ohrievačoch. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená požadovaná výstupná veličina v určitom ohrievači je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené blok, prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie je subsystém, ktorý v sebe zahŕňa s-funkciu *pl\_vymenniky\_o* (obr. 3.3), ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému v prostredí MATLAB.



Obr. 3.3 *Odmaskovaný subsystém prietokových ohrievačov*

Viac o s-funkcii a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 3.1.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Formulár bloku Prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie má tvar, ktorý znázorňuje obrázok (obr. 3.4). Je tvorený z nasledujúcich častí

- *Názov masky bloku* – *PRIETOKOVE OHRIEVACE – ohrevne zariadenie*
- *Základný opis masky bloku* – *Prietokové ohrievače zapojené v sérii – ohrevné zariadenie*
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel* – možnosti: OK, ...

#### *Názov masky bloku*

Zahŕňa meno bloku a pre daný blok má tvar *PRIETOKOVE OHRIEVACE – ohrevné zariadenie*.

#### *Základný opis masky bloku*

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu.

#### *Formulár – Parameters*

Je najhlavnejšia časť masky bloku. Pomocou neho sú zadávané jednotlivé parametre, ktoré sú potrebné pre správnu činnosť daného bloku. Ak sa zadávaný parameter skladá z viac ako jedného čísla treba ho zadať vo vektorovom tvare, ktorý sa zapisuje v hranatých zátvorkách.



**Block Parameters: Prietokové ohrievače**

PRIETOKOVE OHREVACE (mask)

Prietokové ohrievače zapojené v sérii - ohrevné zariadenie vytvorené pre systém, kde ohrevné médium je zariadenie - zdroj, ktorý dodá teplo. Ohrevný zdroj môže byť elektrická špirála, ponorný had...

Parameters

Počet prietokových ohrievačov

Vektor riadiacich veličín 0-nie 1-ano [Q1 .. Qn qv1.. qvn Tv1..Tvn]

Vektor poruchových veličín 0-nie 1-ano [Q1 Qn qv1.. qvn Tv1..Tvn]

Vstupné prietoky ohrievaného média [qv1 qv2 ... qvn]

Vstupné teploty ohrievaného média [Tv1 Tv2 ... Tvn]

Tepelný výkon ohrevných zariadení pre jednotlivé prietokové ohrievače

Objemy jednotlivých ohrievačov

Parametre ohrievaného média [cp hustota]

Vektor sledovaných veličín ano-1 nie-0 [T1 .. Ti .. Tn]

OK Cancel Help Apply

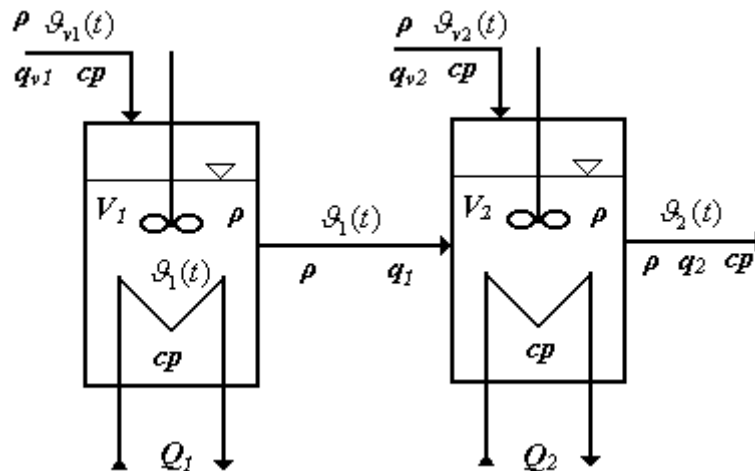
Obr. 3.4 *Formulár bloku prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie*

Formulár – Parameters bloku prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie (obr. 3.4) sa skladá z nasledujúcich položiek:

- *Počet prietokových ohrievačov*
- *Vektor riadiacich veličín*
- *Vektor poruchových veličín*
- *Vstupné prietoky ohrievaného média*
- *Vstupné teploty ohrievaného média*
- *Tepelný výkon ohrevných zariadení pre jednotlivé prietokové ohrievače*
- *Objemy jednotlivých ohrievačov*
- *Parametre ohrievaného média [cp hustota]*

- Úhrnný koeficient prechodu tepla
- Vektor sledovaných veličín

Pri tvorbe návodu na vyplnenie daného formulára bol uvažovaný modelový príklad systém dvoch prietokových ohrievačov zapojených v sérii (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Systém 2 prietokových ohrievačov zapojených v sérii

Zadané sú parametre ohrievačov: objemy  $V_1 = 1,2 \text{ m}^3$ ,  $V_2 = 2,7 \text{ m}^3$ , objemové prietoky  $q_1 = 1,7 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $q_2 = 1,5 \text{ m}^3/\text{min}$ , hustota  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , špecifická tepelná kapacita  $c_p = 4,2 \text{ kJ/(kg.K)}$ , teploty vstupných prúdov do ohrievačov v pôvodnom ustálenom stave  $\theta_{v1} = 300 \text{ K}$ ,  $\theta_{v2} = 320 \text{ K}$  a tepelný výkon ohrevných zariadení do jednotlivých ohrievačov  $Q_1 = 30\,000 \text{ kJ/min}$ ,  $Q_2 = 35\,000 \text{ kJ/min}$ . Riadiacou veličinou je tepelný výkon ohrevného zariadenia v druhom ohrievači a poruchovou veličinou je vstupný objemový prietok do prvého ohrievača. Výstupnou veličinou je teplota v druhom prietokovom ohrievači.

**Počet prietokových ohrievačov** – číslo, ktoré vyjadruje počet prietokových ohrievačov zapojených v sérii.

Pre modelový príklad:

*Počet prietokových ohrievačov*

2

**Vektor riadiacich veličín** **ano-1 nie-0**  $[Q_1 \dots Q_n \ q_{v1} \dots q_{vn} \ T_{v1} \dots T_{vn}]$  – vektor, ktorý nadobúda hodnoty **0** a **1**. Má rozmer **1 x 3n**, kde  $n$  je počet prietokových ohrievačov. Riadiace veličiny pre daný systém môžu byť tepelné výkony ohrevných zariadení zapojených do jednotlivých prietokových ohrievačov, vstupné prietoky

a vstupné teploty ohrievaného média do jednotlivých ohrievačov. Ak  $i$ -ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude riadiaca, prvok vektora na  $i$ -tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že  $j$ -ta vstupná veličina nebude riadiaca, prvok vektora na  $j$ -tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Vektor riadiacich veličín ano-1 nie-0 [Q1 .. Qn qv1 .. qvn Tv1 .. Tvn] [0 1 0 0 0 0]*

**Vektor poruchových veličín ano-1 nie-0 [Q1 .. Qn qv1 .. qvn Tv1 .. Tvn]** – vektor, ktorý nadobúda hodnoty 0 a 1. Má rozmer  $1 \times 3n$ , kde  $n$  je počet prietokových ohrievačov. Poruchové veličiny pre daný systém môžu byť tepelné výkony ohrevných zariadení zapojených do jednotlivých prietokových ohrievačov, vstupné prietoky a vstupné teploty ohrievaného média do jednotlivých ohrievačov. Ak  $i$ -ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude poruchová, prvok vektora na  $i$ -tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že  $j$ -ta vstupná veličina nebude poruchová, prvok vektora na  $j$ -tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Vektor poruchových veličín ano-1 nie-0 [Q1 .. Qn qv1 .. qvn Tv1 .. Tvn]*

*[0 0 0 0 1 0]*

**Vstupné prietoky ohrievaného média [qvs1 qvs2 ... qvs $n$ ]** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet prietokových ohrievačov zapojených v sérii. Prvky vektora sú vstupné prietoky ohrievaného média do jednotlivých prietokových ohrievačov, pričom  $i$ -ty vstupný prietok je  $i$ -tým prvkom vektora. V prípade, že je zadán iba vstupný prietok do prvého prietokového ohrievača, alebo iba niektoré vstupné prietoky ohrievaného média, je treba vyplniť aj ostatné prvky vektora tak, že nadobudnú hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Vstupné prietoky ohrievaného média [qvs1 qvs2 ... qvs $n$ ]*

*[1.7 1.5]*

**Vstupné teploty ohrievaného média [Tv1 Tv2 ... Tv $n$ ]** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet o prietokových ohrievačov. Prvky vektora sú vstupné teploty ohrievaného média do jednotlivých prietokových ohrievačov, pričom  $i$ -ta vstupná teplota je  $i$ -tým prvkom vektora. V prípade, že je zadaná iba vstupná teplota do prvého prietokového ohrievača, alebo iba niektoré vstupné teploty ohrievaného média je treba vyplniť aj ostatné prvky vektora tak, že nadobudnú hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Vstupné teploty ohrievaného média [Tv1 Tv2 ... Tv $n$ ]*

*[300 320]*

**Tepelný výkon ohrevných zariadení pre jednotlivé prietokové ohrievače** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet prietokových ohrievačov zapojených v sérii. Prvky vektora sú tepelné výkony ohrevných zariadení pre jednotlivé prietokové ohrievače, pričom tepelný výkon pre  $i$ -ty prietokový ohrievač je  $i$ -tým prvkom vektora. V prípade, že je zadáný iba tepelný výkon ohrevného zariadenia pre prvý prietokový ohrievač, alebo iba niektoré tepelné výkony, je treba vyplniť aj ostatné prvky vektora tak, že nadobudnú hodnotu 0. V prípade, že všetky tepelné výkony ohrevných zariadení pre jednotlivé ohrievače sú rovnaké, stačí zadať iba jedno číslo.

Pre modelový príklad:

*Tepelný výkon ohrevných zariadení pre jednotlivé prietokové ohrievače*  
[30000 35000]

**Objemy jednotlivých ohrievačov** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ . Prvky vektora sú objemy jednotlivých prietokových ohrievačov, pričom  $i$ -ty objem ohrievača je  $i$ -tým prvkom vektora.

Pre modelový príklad:

*Objemy jednotlivých ohrievačov* [1.2 2.7]

**Parametre ohrievaného média [cp hustota]** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 2$ , pričom prvý prvok vektora je hodnota špecifickej tepelnej kapacity ohrievaného média a druhý prvok vektora je hodnota hustoty ohrievaného média.

Pre modelový príklad:

*Parametre ohrievaného média [cp hustota]* [4.2 1000]

**Vektor sledovaných veličín 1-ano 0-nie [T1 .. Ti .. Tn]** – vektor, ktorý nadobúda hodnoty 0 a 1. Má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet prietokových ohrievačov. Ak má byť výstupná - sledovaná veličina teplota ohrievaného média v  $i$ -tom prietokovom ohrievači, tak  $i$  prvok vektora nadobudne hodnotu 1, v opačnom prípade nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Vektor sledovaných veličín 1-ano 0-nie [T1 .. Ti .. Tn]* [0 1]

Správne vyplnený formulár pre modelový príklad prietokové ohrievače je na obr. 3.6. a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMVTZ\_demo*.

**Block Parameters: Prietokové ohrievače**

PRIETOKOVE OHREVACE (mask)

Prietokové ohrievače zapojené v sérii - ohrevné zariadenie vytvorené pre systém, kde ohrevné médium je zariadenie - zdroj, ktorý dodá teplo. Ohrevný zdroj môže byť elektrická špirála, ponorný had...

Parameters

Počet prietokových ohrievačov  
2

Vektor riadiacich veličín 0-nie 1-ano [Q1 .. Qn qv1.. qvn Tv1..Tvn]  
[0 1 0 0 0 0]

Vektor poruchových veličín 0-nie 1-ano [Q1 Qn qv1.. qvn Tv1..Tvn]  
[0 0 1 0 0 0]

Vstupné prietoky ohrievaného média [qv1 qv2 ... qvn]  
[1.7 1.5]

Vstupné teploty ohrievaného média [Tv1 Tv2 ... Tvn]  
[300 320]

Tepelný výkon ohrevných zariadení pre jednotlivé prietokové ohrievače  
[30000 35000]

Objemy jednotlivých ohrievačov  
[1.2 2.7]

Parametre ohrievaného média [cp hustota]  
[4.2 1000]

Vektor sledovaných veličín ano-1 nie-0 [T1 .. Ti .. Tn]  
[0 1]

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.6 *Správne vyplnený formulár pre modelový príklad***Ponukový panel**

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli, t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

### 3.1.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom

Simulinkový blok prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie využíva nasledovné funkcie:

- *pl\_vymenniky4* *pl\_vymenniky5*
- *pl\_vymenniky6* *pl\_vymenniky7*
- *pl\_vymenniky\_o*

*pl\_vymenniky4* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *C* – maticu výstupu. Funkcia je priamo definovaná v maske bloku a je využívaná s-funkciou *pl\_vymenniky\_o*.

*pl\_vymenniky5* – funkcia, ktorá generuje na základe zadaných vstupných parametrov vektor derivácii zmien teplôt ohrievaného média v jednotlivých prietokových ohrievačoch od času a transponuje daný vektor do výstupnej premennej *K*. Funkcia je používaná vo funkcii *pl\_vymenniky6* a v s-funkcii *pl\_vymenniky\_o*.

*pl\_vymenniky6* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov, využitím funkcie *fsolve*, počíta hodnoty teplôt ohrievaného média v jednotlivých prietokových ohrievačoch v ustálenom – rovnovážnom stave. Funkcia je používaná v s-funkcii *pl\_vymenniky\_o*.

*pl\_vymenniky7* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov vytvorí vektor výstupných parametrov tak, že určí ktoré sú riadiace, resp. poruchové a priradí im príslušnú číselnú hodnotu. Funkcia je používaná v s-funkcii *pl\_vymenniky\_o*.

*pl\_vymenniky\_o* – s-funkcia vytvorená pre simulinkový blok prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie, ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému v prostredí MATLAB. Využíva funkcie:

- *pl\_vymenniky4* – nepriamo *pl\_vymenniky5*
- *pl\_vymenniky6* *pl\_vymenniky7*

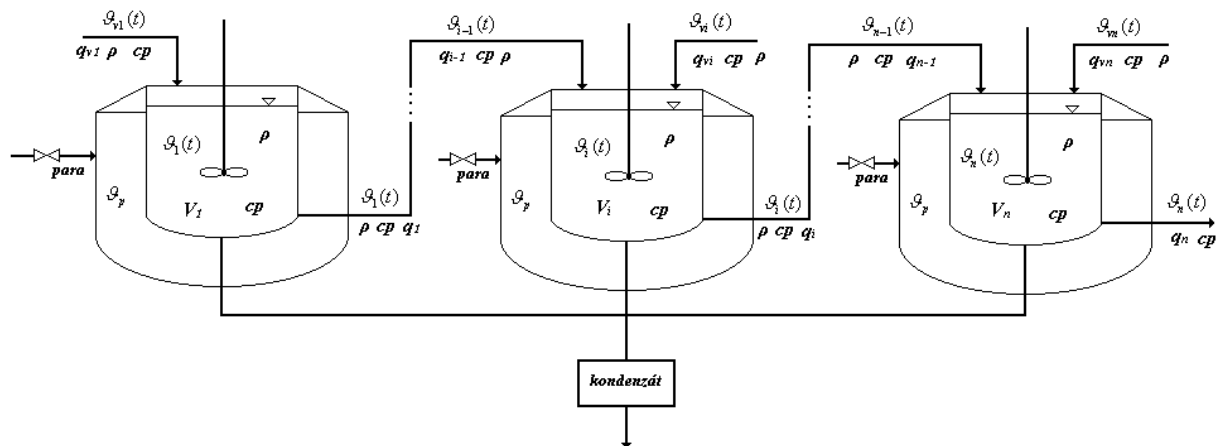
Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Vymenniky\_tepla\Prietokove\_ohrievace*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

### 3.2 Plášťové výmenníky tepla

V plášťových výmenníkoch tepla sa vymieňa teplo medzi ohrievanou kvapalinou a ohrevnou parou, ktoré sú oddelené stenou plášťového výmenníka tepla.

### 3.2.1 Teoretická časť

Uvažujme systém  $n$ -plášťových výmenníkov tepla zapojených v sérii, ktorý zobrazuje obr. 3.7



Obr. 3.7 *Systém  $n$ -plášťových výmenníkov tepla zapojených v sérii*

Pri odvádzaní rovníc matematického modelu budeme uvažovať tie isté zjednodušujúce predpoklady, ktoré platia pre systém  $n$ -prietokových ohrievačov s ohrevným zariadením. Matematický model daného systému získame entalpickými bilanciami v tvare nelineárnych diferenciálnych rovníc prvého rádu v tvare:

pre prvý plášťový výmenník

$$q_{v1}(t)\rho c p \mathcal{G}_{v1}(t) + A_1.k_1[\mathcal{G}_p(t) - \mathcal{G}_1(t)] = q_1(t)\rho c p \mathcal{G}_1(t) + V_1\rho c p \frac{d\mathcal{G}_1(t)}{dt} \quad (3.5)$$

a pre 2 až  $n$ -tý plášťový výmenník

$$q_{vi}(t)\rho cp\mathcal{G}_{vi}(t) + q_{i-1}(t)\rho cp\mathcal{G}_{i-1}(t) + A_i k_i [\mathcal{G}_p(t) - \mathcal{G}_i(t)] = q_i(t)\rho cp\mathcal{G}_i(t) + V_i \rho cp \frac{d\mathcal{G}_i(t)}{dt} \quad (3.6)$$

so začiatočnými podmienkami  $\mathcal{G}_i(0) = \mathcal{G}_i^s$  pre  $i = 1, \dots, n$ . Vstupnými veličinami systému sú teplota pary v plášti  $\mathcal{G}_p(t)$ , teploty kvapaliny na vstupoch do jednotlivých výmenníkov  $\mathcal{G}_{vi}(t)$  a vstupné prietoky do jednotlivých plášťových výmenníkov. V rovnovážnom – ustálenom

stave sú akumulčné členy v rovniciach (3.5-3.6) rovné nule. Potom matematický model rovnovážneho stavu má tvar

pre prvý plášťový výmenník

$$q_{v1}^s \rho c p \mathcal{G}_{v1}^s + A_1 k_1 [\mathcal{G}_p^s - \mathcal{G}_1^s] = q_1^s \rho c p \mathcal{G}_1^s \quad (3.7)$$

a pre 2 až  $n$ -tý plášťový výmenník

$$q_{vi}^s \rho c p \mathcal{G}_{vi}^s + q_{i-1}^s \rho c p \mathcal{G}_{i-1}^s + A_i k_i [\mathcal{G}_p^s - \mathcal{G}_i^s] = q_i^s \rho c p \mathcal{G}_i^s \quad (3.8)$$

Riešením týchto rovníc získame pre zadané vstupné parametre teploty v jednotlivých prietokových ohrievačoch  $\mathcal{G}_i^s$ , ktoré sú začiatočnými podmienkami pre riešenie rovníc (3.5-3.6). Zároveň sú pracovným bodom, v okolí ktorého môžeme linearizovať daný matematický model [3].

### 3.2.2 Plášťové výmenníky tepla – použitie bloku

**Plášťové výmenníky tepla** je simulinkový blok, ktorý je súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 3.8). Slúži na simuláciu dynamických vlastností systému  $n$ -plášťových výmenníkov tepla zapojených v sérii. Blok je vytvorený tak, aby užívateľovi poskytoval čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.



Obr. 3.8 **Blok – plášťové výmenníky tepla**

Táto časť práce je venovaná opisu daného bloku, pričom je členená do nasledujúcich častí:

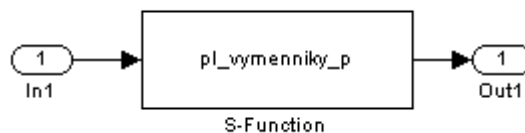
- opis bloku
- vyplnenie formulára daného bloku
- opis funkcií využívaných daným blokom



### 3.2.2.1 Opis bloku

Simulinkový blok Plášťové výmenníky tepla je subsystém, ktorý má jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do bloku je vektor riadiacich veličín, t.j. vstupné prietoky a vstupné teploty ohrievaného média (kvapaliny) a teploty pary pre jednotlivé plášťové výmenníky tepla. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z bloku (systému) sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená teploty kvapaliny v jednotlivých plášťových výmenníkoch tepla. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená požadovaná výstupná veličina v určitom výmenníku, je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené blok plášťové výmenníky tepla je subsystém, ktorý v sebe zahŕňa s-funkciu *pl\_vymenniky\_p* (obr. 3.9), ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému v prostredí MATLAB.



Obr. 3.9 *Odmaskovaný subsystém plášťové výmenníky tepla*

Viac o s-funkcii a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 3.2.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Formulár bloku Prietokové ohrievače – ohrevné zariadenie má tvar, ktorý znázorňuje obrázok (obr. 3.10). Je tvorený z nasledujúcich častí

- *Názov masky bloku – PLASTOVE VYMENNIKY TEPLA*
- *Základný opis masky bloku – Plášťové výmenníky tepla zapojené v sérii*
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel – možnosti: OK, ...*

#### *Názov masky bloku*

Zahŕňa meno bloku a pre daný blok má tvar *PLASTOVE VYMENNIKY TEPLA*

### Základný opis masky bloku

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu.

**Block Parameters: Plášťové výmenníky tepla**

PLASTOVE VYMENNIKY TEPLA (mask)

Plášťové výmenníky tepla zapojené v sérii.  
vytvorené pre systém, ktorý predpokladá, že privádzané ohrevné médium  
je nasýtená para, ktorá skondenzuje a odovzdá iba kondenzačné teplo.

Parameters

Počet výmenníkov  
[n]

Vektor riadiacich veličín 0-nie 1-ano [Tp1..Tpn qv1..qvn Tv1..Tvn]  
[0 1 .. 0 0 .. 0 1]

Vektor poruchových veličín 0-nie 1-ano [Tp1..Tpn qv1..qvn Tv1..Tvn]  
[0 0 .. 0 0 .. 0 0]

Vstupné prietoky ohrievaného média [qv1 qv2 ... qvn]  
[qvs1 qvs2 ... qvsn]

Vstupné teploty ohrievaného média [Tv1 Tv2 ... Tvn]  
[Tv1 Tv2 ... Tvn]

Vstupná teplota pary do jednotlivých výmenníkov [Tp1 .. Tpn]  
[Tp]

Objemy jednotlivých výmenníkov  
[V1 .. Vi .. Vn]

Teplovýmenné plochy jednotlivých výmenníkov  
[A1 .. Ai .. An]

Parametre ohrievaného média [cp hustota]  
[cp ro]

Koeficient prestupu tepla [.. alfa] alebo alfa  
[.. alfa ..]

Vektor sledovaných veličín ano-1 nie-0 [T1 .. Ti .. Tn]  
[0 0 .. 1 0 ..]

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.10 *Formulár bloku plášťové výmenníky tepla*

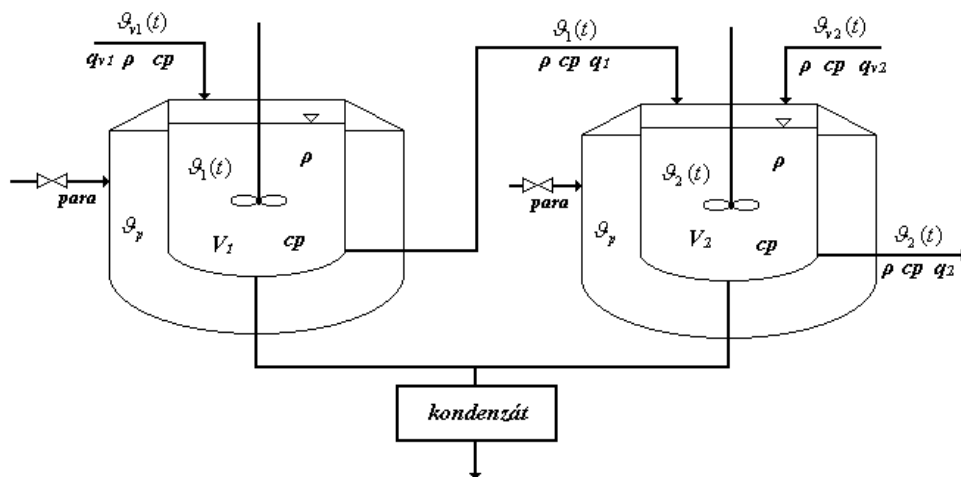
### Formulár – Parameters

Vzhľadom nato, že formulár bloku Plášťové výmenníky tepla a Prietokové ohrievače sa veľmi podobajú, sú v tejto časti práce vysvetlené len tie položky, ktoré sa výraznou mierou odlišujú, resp. chýbajú v bloku Prietokové ohrievače. Hlavnou odlišnosťou týchto dvoch blokov je, že pri prietokových ohrievačoch vystupuje premenná tepelný výkon

ohrevného zariadenia a pri plášťových výmenníkoch tepla vystupuje teplota pary. Postup pri vyplňaní bloku je ale ten istý. Položky, ktoré obsahuje blok navyše sú

- *Teplovýmenné plochy jednotlivých výmenníkov*
- *Koeficient prestupu tepla  $\alpha$*

Pri vyplňaní daného formulára bol uvažovaný modelový príklad systém dvoch plášťových výmenníkov tepla v zapojení v sérii (obr. 3.11).



Obr. 3.11 *Systém 2 plášťových výmenníkov tepla zapojených v sérii*

Zadané sú parametre výmenníkov objemy  $V_1 = 1,2 \text{ m}^3$ ,  $V_2 = 2,7 \text{ m}^3$ , plochy prestupu tepla  $F_1 = 100 \text{ m}^2$ ,  $F_2 = 200 \text{ m}^2$ , koeficienty prestupu tepla  $\alpha_1 = \alpha_2 = 9,3 \text{ kJ.m}^{-2}\text{min}^{-1}\text{K}^{-1}$ , objemový prietok do prvého výmenníka tepla  $q_1 = 1,7 \text{ m}^3/\text{min}$ , hustota  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , špecifická tepelná kapacita  $c_p = 4,2 \text{ kJ/kgK}$ , teplota vstupného prúdu do prvého výmenníka v pôvodnom ustálenom stave  $\vartheta_{v1} = 300 \text{ K}$  a teplota ohrevnej pary  $\vartheta_p = 400 \text{ K}$ . Vstupnou riadiacou veličinou je teplota pary do prvého a druhého výmenníka tepla a výstupnou veličinou je teplota v druhom plášťovom výmenníku tepla.

**Koeficient prestupu tepla  $[\alpha_1 \dots \alpha_n]$  alebo  $\alpha$**  - vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet plášťových výmenníkov zapojených v sérii. Prvky vektora sú koeficienty prestupu tepla pre jednotlivé plášťové výmenníky, pričom koeficient prestupu tepla pre  $i$ -ty výmenník tepla je  $i$ -tým prvkom vektora. V prípade, že všetky koeficienty prestupu tepla pre jednotlivé výmenníky sú rovnaké stačí zadať iba jedno číslo.

Pre modelový príklad:

*Koeficient prestupu tepla  $[\alpha_1 \dots \alpha_n]$  alebo  $\alpha$*

9.3

**Teplovýmenné plochy jednotlivých výmenníkov** – vektor, ktorý má rozmer **1 x n**, kde **n** je počet výmenníkov tepla. Prvky vektora sú teplovýmenné plochy jednotlivých plášťových výmenníkov tepla, pričom *i*-ta teplovýmenná plocha výmenníka je *i*-tým prvkom vektora.

Pre modelový príklad:

*Koeficient prestupu tepla [α1 .. αn] alebo α*

*[100 200]*

Správne vyplnený formulár pre modelový príklad plášťových výmenníkov tepla je na obr. 3.12. a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMPVT\_demo*.

**Block Parameters: Plášťové výmenníky tepla**

PLASTOVE VYMENNIKY TEPLA (mask)

Plášťové výmenníky tepla zapojené v sérii.  
vytvorené pre systém, ktorý predpokladá, že privádzané ohrevné médium  
je nasýtená para, ktorá skondenzuje a odovzdá iba kondenzačné teplo.

Parameters

Počet výmenníkov  
[2]

Vektor riadiacich veličín 0-nie 1-ano [Tp1..Tpn qv1..qvn Tv1..Tvn]  
[1 1 0 0 0 0]

Vektor poruchových veličín 0-nie 1-ano [Tp1..Tpn qv1..qvn]  
[0 0 0 0 0 0]

Vstupné prietoky ohrievaného média [qv1 qv2 ... qvn]  
[1.7 0]

Vstupné teploty ohrievaného média [Tv1 Tv2 ... Tvn]  
[300 0]

Vstupná teplota pary do jednotlivých výmenníkov [Tp1 .. Tpn]  
[400]

Objemy jednotlivých výmenníkov  
[2.7 1.7]

Teplovýmenné plochy jednotlivých výmenníkov  
[100 200]

Parametre ohrievaného média [cp hustota]  
[4.2 1000]

Koeficient prestupu tepla [.. alfa1 ..] alebo alfa  
[9.3]

Vektor sledovaných veličín ano-1 nie-0 [T1 .. Ti .. Tn]  
[0 1]

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.12 *Správne vyplnený formulár pre daný modelový príklad*

**Ponukový panel**

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli, t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

**3.2.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom**

Simulinkový blok plášťové výmenníky tepla využíva nasledovné funkcie:

- *pl\_vymenniky1*                      *pl\_vymenniky2*
- *pl\_vymenniky3*                      *pl\_vymenniky4*
- *pl\_vymenniky\_p*

Činnosť jednotlivých funkcií je rovnaká ako pri prietokových ohrievačoch s ohrevným zariadením, len sú odlišne zapísané rovnice vyjadrujúce dynamiku systému a funkcie pracujú s inými parametrami.

Funkcie, ktoré majú rovnakú činnosť

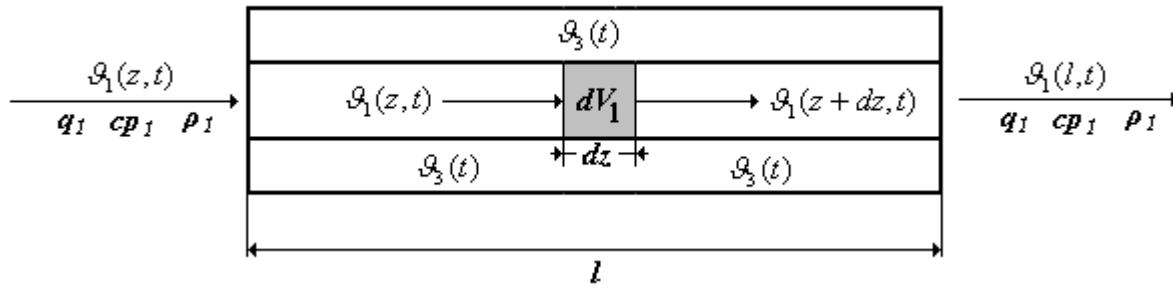
- *pl\_výmenníky1* ↔ *pl\_výmenníky5*,
- *pl\_výmenníky2* ↔ *pl\_výmenníky6*,
- *pl\_výmenníky3* ↔ *pl\_výmenníky7*,
- *pl\_výmenníky4* ↔ *pl\_výmenníky4*
- *pl\_vymenniky\_p* ↔ *pl\_vymenniky\_o*.

Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Vymenniky\_tepla\Plastove\_vymenniky*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

**3.3 Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla****3.3.1 Teoretická časť**

Uvažujme rúrkový výmenník (obr. 3.13), v ktorom sa chladí kvapalina prúdiaca v rúrke výmenníka. Matematický opis uvedieme za predpokladu, že v rúrke existuje ideálny piestový tok kvapaliny bez premiešania a vedenie tepla v smere pozdĺžnom, alebo kolmom na smer

prúdenia. Zanedbáme tepelnú kapacitu steny rúrky výmenníka a teplotu chladiaceho média považujeme za nezávislú od priestorovej súradnice [3].



Obr. 3.13 *Jednkapacitný rúrkový výmenník tepla*

Z entalpickej bilancie objemu kvapaliny  $dV$  na dĺžkovom elemente rúrky  $dz$  (obr. 3.13) dostaneme matematický model v tvare parciálnej diferenciálnej rovnice s konštantnými koeficientmi

$$dV_1 \rho_1 c_{p1} \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t} = q_1 \rho_1 c_{p1} \theta_1(z, t) - \alpha_{13} dA_{13} [\theta_1(z, t) - \theta_3(t)] - q_1 \rho_1 c_{p1} \left[ \theta_1(z, t) + \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial z} dz \right] \quad (3.9)$$

Začiatočná podmienka je  $\theta_1(z, 0) = \theta_1^s(z)$  a okrajová podmienka  $\theta_1(0, t) = \theta_{1,0}^s(t)$ . Vstupnými veličinami sú teplota kvapaliny na vstupe do rúrky výmenníka  $\theta_1(1, t)$  a okrajová podmienka  $\theta_{1,0}(t)$ . Výstupnou veličinou je teplota  $\theta_1(z, t)$ . Po zavedení časových konštánt a rýchlosti prúdenia v tvare

$$T_1 = \frac{dV_1 \rho_1 c_{p1}}{\alpha_{13} dA_{13}} \quad w_1 = \frac{q_1 dz}{dV_1} \quad (3.10)$$

a po matematických úpravách dostaneme z rovnice (3.9) model jednkapacitného rúrkového výmenníka tepla v tvare

$$T_1 \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t} + T_1 w_1 \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial z} = -\theta_1(z, t) + \theta_3(t) \quad (3.11)$$

kde jednou vstupnou veličinou je teplota vo vonkajšej rúrke  $\theta_3(t)$  a druhou vstupnou veličinou je okrajová podmienka  $\theta_{1,0}(t)$ . Výstupnou veličinou je teplota  $\theta_1(z, t)$ .

Teplotu  $\theta_1^s(z)$  dostaneme pre konštantnú teplotu  $\theta_3(t)$  riešením rovnovážneho stavu, ktorú získame z rovnice (3.11) tak, že akumulčný člen, t.j. deriváciu teploty podľa času

budeme považovať za rovnú nule. Potom rovnica, ktorá opisuje rovnovážny stav rúrkového výmenníka tepla, je obyčajná diferenciálna rovnica

$$T_1 w_1 \frac{\partial \mathcal{G}_1^s(z)}{\partial z} = -\mathcal{G}_1^s(z) + \mathcal{G}_3^s \quad (3.12)$$

s okrajovou podmienkou  $\mathcal{G}_{1,0}^s$ .

Po diskretizácii akumuláčného člena z rovnice (3.12) na  $n$ -úsekov a zavedením konštánt  $a_1, b_1$  v tvare

$$a_1 = \frac{T_1 w_1}{\Delta z} \quad b_1 = \left( \frac{T_1 w_1}{\Delta z} + 1 \right) \quad (3.13)$$

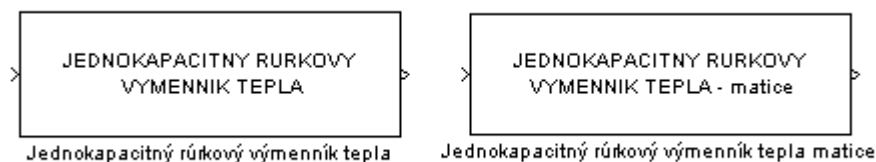
dostaneme rovnice, pomocou ktorých môžeme vypočítať teplotu kvapaliny vo vnútornej rúrke a po dosadení do rovnice (3.11) získame dynamický matematický model v tvare obyčajných diferenciálnych rovníc

$$\frac{d\mathcal{G}_{1,i}(t)}{dt} = -\frac{b_1}{T_1} \mathcal{G}_{1,i}(t) + \frac{a_1}{T_1} \mathcal{G}_{1,i-1}(t) + \frac{1}{T_1} \mathcal{G}_3(t) \quad \text{pre } i = 1, \dots, n \quad (3.14)$$

so začiatočnými podmienkami  $\mathcal{G}_{1,i}(0) = \mathcal{G}_{1,i}^s$ .

### 3.3.2 Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla – použitie bloku

Pre daný systém sú vytvorené dva simulinkové bloky - Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla a Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla – matice. Obidva sú súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 3.14). Slúžia na simuláciu dynamických vlastností systému jednokapacitný rúrkový výmenník tepla a sú vytvorené tak, aby užívateľovi poskytli čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.



Obr. 3.14 Bloky – jednokapacitné rúrkové výmenníky tepla

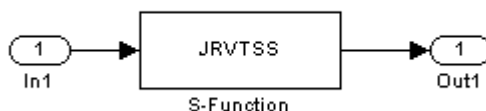
Táto časť práce je venovaná opisom daných blokov, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- *opis bloku*
- *vyplnenie formulára daného bloku*
- *opis funkcií využívaných daným blokom*

### 3.3.2.1 Opis bloku

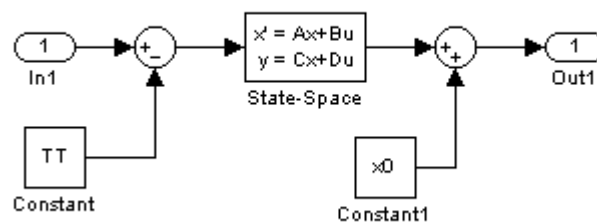
Simulinkové bloky Jednkapacitný rúrkový výmenník tepla (prvý) a Jednkapacitný rúrkový výmenník tepla – matice (druhý) sú subsystemy, ktoré majú jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do blokov je vektor riadiacich veličín, čo pre prvý blok znamená vstupný prietok kvapaliny do vnútornej rúrky a vstupné teploty kvapaliny do vnútornej a vonkajšej rúrky. Pre druhý blok sú riadiace veličiny iba spomínané teploty. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z blokov sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená teploty kvapaliny v jednotlivých úsekoch výmenníka tepla. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená požadovaná výstupná veličina v určitom výmenníku, je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené dané bloky sú subsystemy. Prvý blok v sebe zahŕňa s-funkciu *JRVTS* (obr. 3.15), ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému v prostredí MATLAB a je nelineárnym modelom. Nelinearita systému spočíva v súčine časovo premenných veličín (teplota na vstupe a vstupný prietok média vo vnútornej rúrke). Druhý blok je stavový opis diferenciálnych rovníc v maticovom tvare (obr. 3.16) a je lineárnym modelom.



Obr. 3.15 *Odmaskovaný subsystem jednkapacitný rúrkový výmenník tepla*





Obr. 3.16 *Odmaskovaný subsystém jednodukapacitný rúrkový výmenník - matice*

Viacej o s-funkcii a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 3.3.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Návod na vyplnenie formulára bloku je napísaný pre simulinkový blok Jednodukapacitný rúrkový výmenník tepla, ktorý má tvar znázornený na obr. 3.17. Je tvorený z nasledujúcich častí.

- *Názov masky bloku* – JEDNOKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA
- *Základný opis masky bloky* – Jednodukapacitný rúrkový výmenník tepla
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel* – možnosti: OK, ...

Návod na vyplnenie bloku Jednodukapacitný výmenník tepla - matice je rovnaký pre väčšinu položiek a chýbajúce položky sú dodatočne vysvetlené.

#### *Názov masky bloku*

Zahrňa meno bloku a má tvar JEDNOKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA

#### *Základný opis masky bloku*

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu bloku.

#### *Formulár – Parameters*

Je najhlavnejšia časť masky bloku. Pomocou neho sú zadávané jednotlivé parametre, ktoré sú potrebné pre správnu činnosť daného bloku. Ak sa zadávaný parameter skladá

z viac ako jedného čísla treba ho zadať vo vektorovom tvare, ktorý sa zapisuje v hranatých zátvorkách.

Formulár – Parameters bloku Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla (obr. 3.17) sa skladá z nasledujúcich položiek:

- *Vstupné - radiace veličiny*
- *Poruchové veličiny*
- *Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka*
- *Vstupný hmotnostný tok – vnútorná rúrka*
- *Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]*
- *Priemery rúrok [d1 d3]*
- *Dĺžka výmenníka tepla*
- *Počet úsekov pri diskretizácii*
- *Vektor sledovaných veličín*

**Block Parameters: Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla**

JEDNOKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA (mask)

Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla - nelineárny model umožňuje voľby radiacích veličín - hmotnostný tok média vo vnútornej rúrke a vstupné teploty jednotlivých médií.

Parameters

Vstupné - radiace veličiny 1-áno 0-nie [m1 T1 T3]  
[ 0 1 0 ]

Poruchové veličiny 1-áno 0-nie [m1 T1 T3]  
[ 0 0 0 ]

Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3]  
[ T1 T3 ]

Vstupný hmotnostný tok - vnútorná rúrka m1  
m1

Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]  
[rho1 cp1 alfa13]

Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej]  
[d1 d3]

Dĺžka výmenníka tepla  
L

Počet úsekov pri diskretizácii  
n

Vektor sledovaných veličín [ T(1,1) .. T(1,i) .. T(1,n) ]  
[ 0 1 .. 1 1.. 1 ]

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.17 Formulár bloku jednokapacitný rúrkový výmenník tepla

Pri tvorbe návodu na vyplnenie daného formulára bol uvažovaný modelový príklad, jednokapacitný rúrkový výmenník tepla (obr. 3.13), v ktorom sa chladí 400 kg/h vody so špecifickou tepelnou kapacitou 4200 J/kgK a vstupnou teplotou 75 °C. Vnútoraná medená rúrka má vnútorný priemer 25 mm, vonkajšia rúrka má vnútorný priemer 50 mm. Koeficient prestupu tepla prúdením z vody do steny je 1480 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>. Výmenník je dokonale izolovaný. Výmenník má dĺžku 10 m. Chladiace médium má konštantnú teplotu 20 °C. Pri diskretizácii predpokladajte, že výmenník máte deliť na 5 úsekov. Riadiacou veličinou je teplota na vstupe do vonkajšej rúrky výmenníka a poruchovou teplota vody na vstupe do výmenníka tepla. Výstupnou veličinou je teplota v druhom a piatom úseku.

**Vstupné riadiace veličiny ano-1 nie-0 [m1 Tv1 Tv3]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 3** a nadobúda hodnoty **0** a **1**. Riadiace veličiny pre daný systém môžu byť hmotnostný tok kvapaliny do vnútornej rúrky a teploty kvapaliny na vstupe do vnútornej, resp. vonkajšej rúrky. Ak *i*-ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude riadiaca, prvok vektora na *i*-tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že *j*-ta vstupná veličina nebude riadiaca, prvok vektora na *j*-tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vstupné riadiace veličiny ano-1 nie-0 [m1 Tv1 Tv3]} \quad [0 \ 0 \ 1]$$

**Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [m1 Tv1 Tv3]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 3** a nadobúda hodnoty **0** a **1**. Poruchové veličiny pre daný systém môžu byť hmotnostný tok kvapaliny do vnútornej rúrky a teploty kvapaliny na vstupe do vnútornej, resp. vonkajšej rúrky. Ak *i*-ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude poruchová, prvok vektora na *i*-tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že *j*-ta vstupná veličina nebude poruchová, prvok vektora na *j*-tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

$$\text{Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [m1 Tv1 Tv3]} \quad [0 \ 1 \ 0]$$

**Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 2**. Prvý prvok vektora je kvapalina vstupujúca do vnútornej rúrky výmenníka a druhý prvok vektora je teplota chladiaceho média do vonkajšej rúrky, ktorá je konštantná.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka} \quad [75 \ 25]$$

**Vstupný hmotnostný tok – vnútorná rúrka  $m1$**  – hmotnostný tok kvapaliny na vstupe do vnútornej rúrky výmenníka tepla.

Pre modelový príklad:

*Vstupný hmotnostný tok – vnútorná rúrka  $m1$*  400/3600

**Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]** – vektor, ktorý má rozmer **1x 3**, kde prvý prvok vektora predstavuje hustotu kvapaliny vo vnútornej rúrke, druhý prvok špecifickú tepelnú kapacitu kvapaliny a tretí prvok je koeficient prestupu tepla prúdením z kvapaliny do steny rúrky, alebo opačne.

Pre modelový príklad:

*Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]* [1000 4.2e3 1480]

**Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej]** – vektor, ktorý má rozmer **1x 2**, kde prvý prvok vektora predstavuje priemer vnútornej rúrky a druhý prvok predstavuje priemer vonkajšej rúrky jednokapacitného rúrkového výmenníka tepla.

Pre modelový príklad:

*Priemery rúrok [d1 d3]* [25e-3 50e-3]

**Dĺžka výmenníka tepla** – číslo, ktoré zodpovedá dĺžke výmenníka tepla.

Pre modelový príklad:

*Dĺžka výmenníka tepla* 10

**Počet úsekov pri diskretizácii** – číslo, ktoré zodpovedá počtu dielov na ktoré sa má výmenník rozdeliť.

Pre modelový príklad:

*Počet úsekov pri diskretizácii* 5

**Vektor sledovaných veličín 1-ano 0-nie [T1,1 .. T1,i .. T1,n]** – vektor, ktorý nadobúda hodnoty **0** a **1**. Má rozmer **1 x n**, kde  $n$  je počet úsekov pri diskretizácii a . Ak má byť výstupná, sledovaná veličina, t.j. teplota kvapaliny v  $i$ -tom úseku rúrkového výmenníka tepla zobrazená, tak  $i$  prvok vektora nadobudne hodnotu 1, v opačnom prípade nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Vektor sledovaných veličín 1-ano 0-nie [T1,1 .. T1,i .. T1,n]* [ 0 1 0 0 1]

Správne vyplnený formulár pre uvažovaný modelový príklad, t.j. jednokapacitný rúrkový výmenník tepla je na obr. 3.18 a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMJRVTS\_demo*

**Block Parameters: Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla**

JEDNOKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA (mask)

Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla - nelineárny model umožňuje voľby riadiacich veličín - hmotnostný tok média vo vnútornej rúrke a vstupné teploty jednotlivých médií.

**Parameters**

Vstupné - riadiace veličiny 1-áno 0-nie [m1 T1 T3]  
[ 0 1 0 ]

Poruchové veličiny 1-áno 0-nie [m1 T1 T3]  
[ 0 0 0 ]

Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3]  
[ 75 20 ]

Vstupný hmotnostný tok - vnútorná rúrka m1  
[ 400/3600 ]

Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]  
[ 1000 4.2e3 1480 ]

Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej]  
[ 25e-3 50e-3 ]

Dĺžka výmenníka tepla  
10

Počet úsekov pri diskretizácii  
5

Vektor sledovaných veličín [ T(1,1) .. T(1,i) .. T(1,n) ]  
[ 0 1 0 0 1 ]

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.18 Správne vyplnený formulár pre modelový príklad

Blok Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla – matice má navyše položku vypísanie matíc  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ .

**Vypísanie matíc  $A, B, C, D$**  – ak je zaškrtnutý check-box, tak sa po kliknutí na voľbu OK resp. APPLY vypíšu matice  $A, B, C, D$  v pracovnom okne MATLABu. V opačnom prípade sa blok „zatvorí“, nevypíšu sa matice a systém je pripravený na simuláciu. Ak chceme vypísať matice, tak pre modelový príklad

*Vypísanie matíc  $A, B, C, D$*



#### **Poznámka**

Malá odlišnosť je aj v položkách vstupné riadiace veličiny a poruchové veličiny, a to taká, že pri bloku jednokapacitný rúrkový výmenník tepla – matice, nemôžeme riadiť

vstupných hmotnostným tokom kvapaliny do vnútornej rúrky. Správne vyplnenie daného bloku znázorňuje obr. 3.19 a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMJRVTSM\_demo*.

**Block Parameters: Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla**

JEDNOKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA - matice (mask)  
 Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla - matice - lineárny model  
 umožňuje voľbu radiacích veličín - vstupné teploty vstupujúcich médií

Parameters

Vstupné - radiace veličiny 1-áno 0-nie [T1 T3]

Poruchové veličiny 1-áno 0-nie [T1 T3]

Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3]

Vstupný hmotnostný tok vnútornej rúrky m1

Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]

Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej]

Dĺžka výmenníka tepla

Počet úsekov pri diskretizácii

Vektor sledovaných veličín [ T(1,1) .. T(1,i) .. T(1,n)]

☒ Vypísanie matíc A,B,C,D

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.19 *Správne vyplnený formulár pre modelový príklad*

### Ponukový panel

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli, t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

### 3.3.2.3 Opis funkcií využívaných danými blokmi

Simulinkové bloky Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla a Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla využívajú nasledovné funkcie:

- *JRVTS\_M* *JRVTS1*
- *JRVTS\_A* *JRVTS2*
- *JRVTS\_B* *JRVTS3*
- *JRVTS\_C* *JRVTS4*
- *JRVTS\_D* *JRVTS5*
- *JRVTS*

*JRVTS\_M* – m-file, ktorý na základe zadaných vstupných parametrov pre jednotlivé funkcie vypočíta zodpovedajúce výstupy funkcií. Je definovaná priamo v maske daného bloku.

Využíva funkcie: *JRVTS A*, *JRVTS B*, *JRVTS C*, *JRVTS D*, *JRVTS1*, *JRVTS3*.

*JRVTS*  $A$  – funkcia, ktorá vypočíta maticu  $A$  – maticu systému.

*JRVTS*  $B$  – funkcia, ktorá vypočíta maticu  $B$  – maticu riadenia.

*JRVTS*  $C$  – funkcia, ktorá vypočíta maticu  $C$  – maticu výstupu.

*JRVTS*  $D$  – funkcia, ktorá vypočíta maticu  $D$ .

*JRVTSI* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov vypočíta teploty kvapaliny vo vnútornej rúrke výmenníka tepla v ustálenom – rovnovážnom stave.

Funkcia je používaná v m-file *JVRTS* *M* a v s-funkcii *JVRTSS*.

*JRVTS2* – funkcia, ktorá generuje na základe zadaných vstupných parametrov vektor derivácií zmien teploty kvapaliny v jednotlivých úsekoch výmenníka tepla od času a transponuje daný vektor do výstupnej premennej *F*. Funkcia je používaná v s-funkcii *JRVTS5*.

*JRVTS3* – funkcia, ktorej úlohou je vytvoriť zo zadaných vstupných parametrov výstupný vektor sledovaných výšok hladín v systéme zásobníkoch kvapaliny v ustálenom - rovnovážnom stave.

*JRVTS4* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov vytvorí vektor výstupných parametrov tak, že určí ktoré vstupné parametre sú riadiace veličiny a priradí im príslušné číselné hodnoty. Funkcia je používaná v s-funkcii *JRVTS5*.

*JRVTS5* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *C* – maticu výstupu. Funkcia je priamo definovaná v maske bloku a je využívaná s-funkciou *JRVTS5*.

*JRVTSS* – s-funkcia, vytvorená pre simulinkový blok jednodukapacitný rúrkový výmenník tepla, ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku

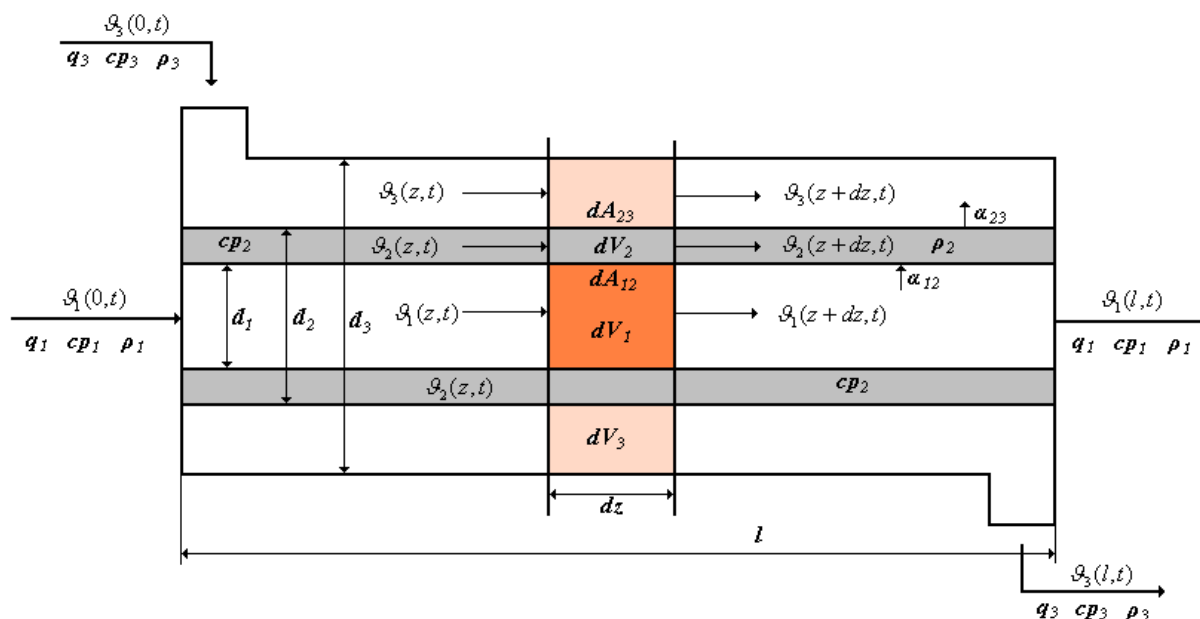
daného systému v prostredí MATLAB. Využíva funkcie – *JRVTS1*, *JRVTS2*, *JRVTS4*, *JRVTS5*.

Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Vymenniky\_tepla\JRVTS*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

### 3.4 Trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla

#### 3.4.1 Teoretická časť

Uvažujme súprudový rúrkový výmenník, v ktorom sa ochladzuje kvapalina prúdiaca v rúrkach výmenníka, kvapalinou prúdiacou v jeho plášti. Teplota kvapaliny prúdiacej v plášti sa pritom mení v závislosti od priestorovej premennej. Súčasne berieme do úvahy aj tepelnú kapacitu rúrok výmenníka. Zjednodušená predstava vzniká, ak bude výmenník rúrka v rúrke, kde vonkajšia rúrka tvorí plášť výmenníka, ako je to na obr. 3.20 [3].



Obr. 3.20 Trojkapacitný súprudový výmenník tepla

Matematický opis je odvodený za predpokladu, že sa zanedbáva tepelná kapacita vonkajšej rúrky a tepelný výmenník je tepelne izolovaný, čo znamená, že straty tepla do okolia sú nulové. Pritom platia pre obidve kvapaliny aj stenu rúrky všetky zjednodušujúce



predpoklady, na základe ktorých bol zostavený matematický model v jednodukapacitnom výmenníku.

Objemový element kvapaliny  $dV_1$  s dĺžkou  $dz$  je podobne ako v prípade jednodukapacitného výmenníka opísaný bilančnou rovnicou

$$q_1 \rho_1 c p_1 \vartheta_1(z, t) = q_1 \rho_1 c p_1 \left[ \vartheta_1(z, t) + \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial z} dz \right] + \alpha_{12} dA_{12} [\vartheta_1(z, t) - \vartheta_2(z, t)] + dV_1 \rho_1 c p_1 \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial t} \quad (3.15)$$

pre entalpickú bilanciu objemového elementu steny  $dV_2$  s dĺžkou  $dz$  platí

$$\alpha_{12} dA_{12} [\vartheta_1(z, t) - \vartheta_2(z, t)] = \alpha_{23} dA_{23} [\vartheta_2(z, t) - \vartheta_3(z, t)] + dV_2 \rho_2 c p_2 \frac{\partial \vartheta_2(z, t)}{\partial t} \quad (3.16)$$

a pre entalpickú bilanciu objemového elementu kvapaliny  $dV_3$  s dĺžkou  $dz$  platí

$$q_3 \rho_3 c p_3 \vartheta_3(z, t) + \alpha_{23} dA_{23} [\vartheta_2(z, t) - \vartheta_3(z, t)] = q_3 \rho_3 c p_3 \left[ \vartheta_3(z, t) + \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial z} dz \right] + dV_3 \rho_3 c p_3 \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial t} \quad (3.17)$$

Začiatkové podmienky sú  $\vartheta_1(z, 0) = \vartheta_1^s(z)$ ,  $\vartheta_2(z, 0) = \vartheta_2^s(z)$  a  $\vartheta_3(z, 0) = \vartheta_3^s(z)$ , ktoré sa získajú riešením rovnovážneho stavu a dve okrajové podmienky  $\vartheta_1(0, t) = \vartheta_{1,0}^s(t)$ ,  $\vartheta_3(0, t) = \vartheta_{3,0}^s(t)$ . Vstupnými veličinami sú okrajové podmienky  $\vartheta_{1,0}(t)$   $\vartheta_{3,0}(t)$ . Výstupnými veličinami sú teploty  $\vartheta_1(z, t)$ ,  $\vartheta_2(z, t)$  a  $\vartheta_3(z, t)$ . Po zavedení časových konštánt a rýchlostí prúdenia a po matematických úpravách dostaneme z rovníc (3.15-3.17) model trojkapacitného rúrkového výmenníka tepla v tvare

$$T_1 \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial t} + T_1 w_1 \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial z} = -\vartheta_1(z, t) + \vartheta_2(z, t) \quad (3.18)$$

$$T_2 \frac{\partial \vartheta_2(z, t)}{\partial t} = Z_{21} \vartheta_1(z, t) - \vartheta_2(z, t) + Z_{23} \vartheta_3(z, t) \quad (3.19)$$

$$T_3 \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial t} + T_3 w_3 \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial z} = -\vartheta_3(z, t) + \vartheta_2(z, t) \quad (3.20)$$

Teplotu  $\vartheta_1^s(z)$ ,  $\vartheta_2(z)$  a  $\vartheta_3(z)$  získame riešením rovnovážneho stavu, ktorý získame z rovníc (3.18-3.20) tak, že akumulčné členy t.j. parciálne derivácie teploty podľa času budeme považovať za rovné nule.

Rovnice, ktoré opisujú rovnovážny stav trojkapacitného rúrkového výmenníka tepla sú obyčajné diferenciálne rovnice v tvare

$$T_1 w_1 \frac{\partial \vartheta_1(z, t)}{\partial z} = -\vartheta_1(z, t) + \vartheta_2(z, t) \quad (3.21)$$

$$0 = Z_{21} \vartheta_1(z, t) - \vartheta_2(z, t) + Z_{23} \vartheta_3(z, t) \quad (3.22)$$

$$T_3 w_3 \frac{\partial \vartheta_3(z, t)}{\partial z} = -\vartheta_3(z, t) + \vartheta_2(z, t) \quad (3.23)$$

s okrajovými podmienkami  $\vartheta_{1,0}^s$ ,  $\vartheta_{3,0}^s$  a  $\vartheta_{2,0}^s$ , ktoré určíme riešením rovníc (3.21-3.23) [3].

Po diskretizácii akumulčných členov z rovníc (3.21-3.23) na  $n$ -úsekov a zavedením konštánt  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_3$ ,  $b_3$  v tvare

$$a_1 = \frac{T_1 w_1}{\Delta z} \quad b_1 = \left( \frac{T_1 w_1}{\Delta z} + 1 \right) \quad (3.24)$$

$$a_3 = \frac{T_3 w_3}{\Delta z} \quad b_3 = \left( \frac{T_3 w_3}{\Delta z} + 1 \right) \quad (3.25)$$

dostaneme rovnice pomocou, ktorých môžeme vypočítať teploty kvapaliny vo vnútornej rúrke, vonkajšej rúrke a teplotu steny rúrky v daných zvolených úsekoch a po dosadení do rovníc (3.18-3.20) získame dynamický matematický model v tvare obyčajných diferenciálnych rovníc

$$\frac{d\vartheta_{1,i}(t)}{dt} = -\frac{b_1}{T_1} \vartheta_{1,i}(t) + \frac{a_1}{T_1} \vartheta_{1,i-1}(t) + \frac{1}{T_1} \vartheta_{2,i}(t) \quad \text{pre } i = 1, \dots, n \quad (3.26)$$

$$\frac{d\vartheta_{2,i}(t)}{dt} = \frac{Z_{21}}{T_2} \vartheta_{1,i}(t) - \frac{1}{T_2} \vartheta_{2,i}(t) + \frac{Z_{23}}{T_2} \vartheta_{3,i}(t) \quad \text{pre } i = 1, \dots, n \quad (3.27)$$

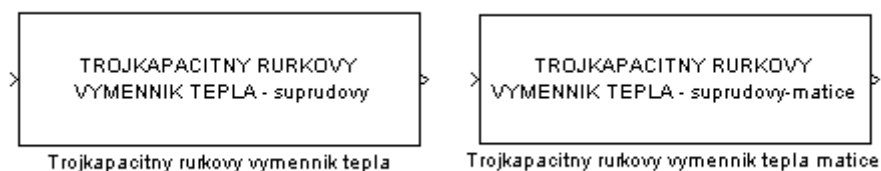
$$\frac{d\vartheta_{3,i}(t)}{dt} = -\frac{b_3}{T_3} \vartheta_{3,i}(t) + \frac{a_3}{T_3} \vartheta_{3,i-1}(t) + \frac{1}{T_3} \vartheta_{2,i}(t) \quad \text{pre } i = 1, \dots, n \quad (3.28)$$

so začiatočnými podmienkami  $\vartheta_{1,i}(0) = \vartheta_{1,i}^s$ ,  $\vartheta_{2,i}(0) = \vartheta_{2,i}^s$  a  $\vartheta_{3,i}(0) = \vartheta_{3,i}^s$ .

Na základe týchto rovníc môžeme vytvoriť stavový opis s maticami  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . Matica  $A$  sa nazýva matica systému a má rozmer  $3n \times 3n$ , kde  $n$  je počet úsekov pri diskretizácii. Jednotlivé prvky matice sú tvorené výrazom, ktoré vystupujú pred premennými  $\vartheta_{1,i}(t)$ ,  $\vartheta_{2,i}(t)$ ,  $\vartheta_{3,i}(t)$  v príslušnej rovnici dynamického matematického opisu. Ostatné prvky matice nadobúdajú nulovú hodnotu. Matica  $B$  sa nazýva matica riadenia a jej rozmer závisí od voľby riadiacich veličín, pričom ak riadime jednou z okrajových podmienok má rozmer  $3n \times 1$  a keď obidvomi tak má rozmer  $3n \times 2$ . Prvky matice sú výrazy ktoré vystupujú v rovniciach pred premennými  $\vartheta_{1,0}(t)$ , resp.  $\vartheta_{3,0}(t)$ . Ostatné prvky nadobúdajú nulovú hodnotu. Matica  $C$  je maticou výstupu. Je jednotková matica a jej rozmery závisia od voľby počtu sledovaných veličín. Ak  $r$  je počet sledovaných veličín, tak matica  $C$  má rozmer  $r \times n$ . Matica  $D$  je nulová matica a jej rozmery závisia od rozmerov matice  $B$  a  $C$ . Jej rozmer je  $m \times r$ , kde  $m$  je rozmer matice  $B$ .

### 3.4.2 Trojkapacitný rúrkový výmenník tepla – použitie bloku

Pre daný systém sú vytvorené dva simulinkové bloky, a to Trojkapacitný rúrkový výmenník tepla a Trojkapacitný rúrkový výmenník tepla – matice. Obidva sú súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 3.21). Slúžia na simulovanie dynamických vlastností systému trojkapacitný súprúdový rúrkový výmenník tepla, a sú vytvorené tak, aby užívateľovi poskytli čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.



Obr. 3.21 *Bloky – Trojkapacitné súprúdové rúrkové výmenníky tepla*

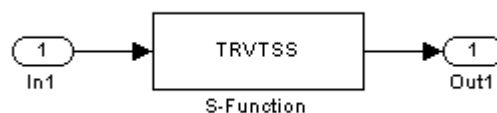
Táto časť práce je venovaná opisom daných blokov, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- *opis bloku*
- *vyplnenie formulára daného bloku*
- *opis funkcií využívaných daným blokom*

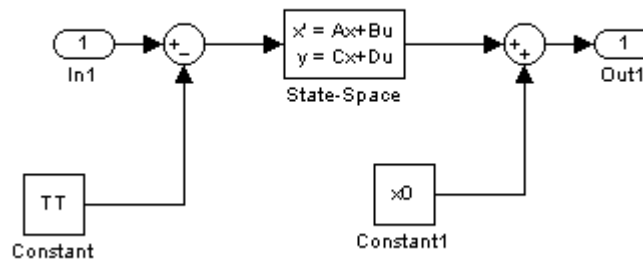
### 3.4.2.1 Opis bloku

Simulinkové bloky Trojkapacitný rúrkový výmenník tepla (prvý) a Trojkapacitný rúrkový výmenník tepla – matice (druhý) sú subsystemy, ktoré majú jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do bloku (systému) je vektor riadiacich veličín, čo pre prvý blok znamená vstupné prietoky kvapaliny do vnútornej a vonkajšej rúrky a teploty kvapaliny na vstupe do vnútornej a vonkajšej rúrky. Pre druhý blok sú riadiace veličiny iba spomínané teploty. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z bloku sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená teploty kvapaliny vo vnútornej a vonkajšej rúrke a teploty steny rúrky pre určité úseky výmenníka tepla. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená požadovaná výstupná veličina v určitom výmenníku, je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené, dané bloky sú subsystemy. Prvý blok v sebe zahŕňa s-funkciu *TRVTSS* (obr. 3.22), ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému pracovnom prostredí MATLAB. Nelinearita systému spočíva v súčine časovo premenných veličín (teploty na vstupe a vstupné prietoky médií vo vnútornej resp. vonkajšej rúrke). Druhý blok je stavový opis diferenciálnych rovníc v maticovom tvare (obr. 3.23).



Obr. 3.22 *Odmaskovaný subsystem trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla*



Obr. 3.23 **Odmaskovaný subsystém trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla - matice**

Viaccej o s-funkcii a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 3.4.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Návod na vyplnenie formulára bloku je napísaný pre simulinkový blok Trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla, ktorý má tvar znázornený na obr. 3.24. Je tvorený z nasledujúcich častí.

- *Názov masky bloku* – TROJKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA
- *Základný opis masky bloku* – Trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla – nelineárny model
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel* – možnosti: OK, ...

Návod na vyplnenie druhého bloku je rovnaký pre väčšinu položiek a chýbajúce položky sú dodatočne vysvetlené.

#### **Názov masky bloku**

Zahŕňa meno bloku a pre daný blok má tvar *TROJKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA – súprudový*

#### **Základný opis masky bloku**

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu.

**Formulár – Parameters**

Je najhlavnejšia časť masky bloku. Pomocou neho sú zadávané jednotlivé parametre, ktoré sú potrebné pre správnu činnosť daného bloku. Ak sa zadávaný parameter skladá z viac ako jedného čísla treba ho zadať vo vektorovom tvare, ktorý sa zapisuje v hranatých zátvorkách.

Formulár – Parameters bloku Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla (obr. 3.24) sa skladá z nasledujúcich položiek:

- *Vstupné - riadiace veličiny*
- *Poruchové veličiny*
- *Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka*
- *Vstupné hmotnostné toky [vnútorná vonkajšia] rúrka*
- *Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]*
- *Priemery rúrok [d1 d3]*
- *Dĺžka výmenníka tepla*
- *Počet úsekov pri diskretizácii*
- *Vektor sledovaných veličín*

Pri tvorbe návodu na vyplnenie formulára bloku bol uvažovaný systém súprudového trojkapacitného rúrkového výmenníka tepla (obr. 3.20), v ktorom sa vo vnútornej rúrke ohrieva  $1100 \text{ kg.h}^{-1}$  petroleja so vstupujúcou teplotou  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , hustotou  $810 \text{ kg.m}^{-3}$  a špecifickou tepelnou kapacitou  $2,1 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Petrolej je zohrievaný  $400 \text{ kg.h}^{-1}$  horúcej vody, ktorá má na vstupe do výmenníka teplotu  $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vnútorná medená rúrka má vnútorný priemer 25 mm, hrúbku steny 1.5mm, tepelnú vodivosť  $395 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , hustotu  $8930 \text{ kg.m}^{-3}$  a špecifickú tepelnú kapacitu  $385 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Vonkajšia rúrka má vnútorný priemer 50 mm. Koeficient prestupu tepla prúdením zo steny do petroleja je  $750 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  a z vody do steny  $1480 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . Výmenník je dokonale izolovaný. Výmenník má dĺžku 10 m. Pri diskretizácii predpokladajte, že výmenník máte deliť na 5 úsekov. Riadiacou veličinou je hmotnostný tok ohrevnej vody. Výstupnou veličinou je teplota vody na konci výmenníka tepla a teplota petroleja v treťom úseku a na konci výmenníka.

**Block Parameters: Trojkapacitny rúrkovy vymennik tepla** [X]

TROJKAPACITNY RÚRKOVY VYMENNIK TEPLA - súprudový (mask)  
Trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla - nelineárny model  
možnosť voľby riadiacich veličín - hmotnostné toky v jednotlivých rúrkach  
a teploty vstupujúcich médií.

Parameters

Vstupné - riadiace veličiny 1-áno 0-nie [m1 m3 T1 T3]  
[ 0 0 1 0 ]

Poruchové veličiny 1-áno 0-nie [m1 m3 T1 T3]  
[ 0 0 0 0 ]

Vstupné teploty [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3]  
[ T1 T3 ]

Vstupné hmotnostné toky [vnútorná vonkajšia] rúrka [m1 m3]  
[ m1 m3 ]

Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]  
[ ro1 cp1 alfa12 ]

Parametre média vo vonkajšej rúrke [hustota cp alfa]  
[ ro3 cp3 alfa23 ]

Parametre rúrky [hustota cp]  
[ ro2 cp2 ]

Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej hrúbka steny]  
[ d1 d3 h ]

Dĺžka výmenníka tepla  
[ L ]

Počet úsekov pri diskretizácii  
[ n ]

Vektor sledovaných veličín [ .. T(1,i) T(2,i) T(3,i) .. ]  
[ 1 0 0, .. 0 0 0, 0 0 0, .. 0 0 0, 1 0 0 ]

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.24 Formulár bloku Trojkapacitný súprudový rúrkový výmenník tepla

**Vstupné riadiace veličiny** ano-1 nie-0 [m1 m3 Tv1 Tv3] – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 4$ , a nadobúda hodnoty 0 a 1. Riadiace veličiny pre daný systém môžu byť hmotnostné toky kvapaliny do vnútornej, vonkajšej rúrky a teploty kvapaliny na vstupe do vnútornej, resp. vonkajšej rúrky výmenníka. Ak  $i$ -ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude riadiaca, prvok vektora na  $i$ -tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že  $j$ -ta vstupná veličina nebude riadiaca, prvok vektora na  $j$ -tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Vstupné radiace veličiny ano-1 nie-0 [m1 m3 Tv1 Tv3] [0 1 0 0]*

**Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [m1 m3 Tv1 Tv3]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 4**, a nadobúda hodnoty **0** a **1**. Poruchové veličiny pre daný systém môžu byť hmotnostné toky kvapaliny do vnútornej, vonkajšej rúrky a teploty kvapaliny na vstupe do vnútornej resp. vonkajšej rúrky výmenníka tepla. Ak *i-ta* vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude poruchová, prvok vektora na *i-tom* mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že *j-ta* vstupná veličina nebude poruchová, prvok vektora na *j-tom* mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

*Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [m1 m3 Tv1 Tv3] [0 0 0 0]*

**Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 2**. Prvý prvok vektora je teplota kvapaliny vstupujúca do vnútornej rúrky výmenníka a druhý prvok vektora je teplota kvapaliny vstupujúca do vonkajšej rúrky v ustálenom stave.

Pre modelový príklad:

*Vstupné teploty kvapaliny [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3] [20 75]*

**Vstupné hmotnostné toky [vnútorná vonkajšia] rúrka [m1 m3]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 2**. Prvý prvok vektora je hmotnostný tok kvapaliny na vstupe do vnútornej rúrky a druhý prvok vektora je hmotnostný tok kvapaliny do vonkajšej rúrky výmenníka tepla.

Pre modelový príklad:

*Vstupné hmotnostné toky [vnútorná vonkajšia] rúrka [m1 m3] [1100/3600 400/3600]*

**Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]** – vektor, ktorý má rozmer **1x 3**, kde prvý prvok vektora predstavuje hustotu kvapaliny vo vnútornej rúrke, druhý prvok špecifickú tepelnú kapacitu kvapaliny a tretí prvok je koeficient prestupu tepla prúdením z kvapaliny do steny rúrky, alebo opačne.

Pre modelový príklad:

*Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa] [810 2.1e3 750]*

**Parametre média vo vonkajšej rúrke [hustota cp alfa]** – vektor, ktorý má rozmer **1x 3**, kde prvý prvok vektora predstavuje hustotu kvapaliny vo vonkajšej rúrke, druhý prvok špecifickú tepelnú kapacitu kvapaliny a tretí prvok je koeficient prestupu tepla prúdením z kvapaliny do steny rúrky, alebo opačne.



Pre modelový príklad:

*Parametre média vo vonkajšej rúrke [hustota cp alfa]* [1000 4.2e3 1480]

**Parametre rúrky [hustota cp]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 2**, kde prvý prvok vektora je hustota steny rúrky a druhý prvok vektora je tepelná kapacita steny rúrky.

Pre modelový príklad:

*Parametre rúrky [hustota cp]* [8930 385]

**Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej hrúbka steny]** – vektor, ktorý má rozmer **1x 2**, kde prvý prvok vektora predstavuje priemer vnútornej rúrky a druhý prvok predstavuje priemer vonkajšej rúrky výmenníka tepla.

Pre modelový príklad:

*Priemery rúrok [d1 d3 delta]* [25e-3 50e-3 1.5 e-3]

**Dĺžka výmenníka tepla** – číslo, ktoré zodpovedá dĺžke výmenníka tepla.

Pre modelový príklad:

*Dĺžka výmenníka tepla* 10

**Počet úsekov pri diskretizácii** – číslo, ktoré zodpovedá počtu dielov, na ktoré sa má výmenník rozdeliť.

Pre modelový príklad:

*Počet úsekov pri diskretizácii* 5

**Vektor sledovaných veličín 1-ano 0-nie [T1,1 T1,2 T1,3, .. T1,i T2,i T3,i.. T1,n]** – vektor, ktorý nadobúda hodnoty **0** a **1**. Má rozmer **1 x 3n**, kde *n* je počet úsekov pri diskretizácii. Prvé tri prvky patria jednotlivým teplotám prvého úseku výmenníka tepla, ďalšie tri patria druhému úseku výmenníka, ... a posledné tri prvky patria teplotám *n-tého* úseku výmenníka tepla, pričom teploty idú v poradí – teplota kvapaliny vo vnútornej rúrke, teplota steny rúrky a teplota kvapaliny vo vonkajšej rúrke. Ak má byť výstupná, sledovaná veličina, t.j. teplota vnútornej kvapaliny v *i-tom* úseku výmenníka tepla zobrazená, tak  $((i-1).n+j)$  prvok vektora nadobudne hodnotu 1, v opačnom prípade nadobudne hodnotu 0, kde *j* je číslo teploty, ktorú sledujeme, t.j. pre teplotu kvapaliny vo vnútornej rúrke *j* = 1, pre teplotu steny rúrky *j* = 2, pre teplotu kvapaliny vo vonkajšej rúrke *j* = 3.

Pre modelový príklad: voda – vonkajšia petrolej – vnútorná

Sledujeme vodu v treťom úseku  $j = 1, i = 3, n = 5; (3-1).5 - 1 = 11$

t.j. 11 prvok vektora nadobudne hodnotu 1. Takisto postupujeme aj pre ostatné sledované veličiny.

Vektor sledovaných veličín 1-ano 0-nie  $[T1,1 .. T1,i .. T1,n]$

$[0\ 0\ 0, 0\ 0\ 0, 1\ 0\ 0, 0\ 0\ 0, 1\ 0\ 1]$

### Poznámka

Pre lepšiu názornosť sú jednotlivé úseky výmenníka tepla oddelené čiarkou.

Správne vyplnený formulár pre uvažovaný modelový príklad, t.j. trojkapacitný rúrkový výmenník tepla je na obr. 3.25 a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMTRVTS\_demo*

**Block Parameters: Trojkapacitny rurkový vymennik tepla**

TROJKAPACITNY RURKOVÝ VÝMENNÍK TEPLA - súprúdový (mask)

Trojkapacitný súprúdový rúrkový výmenník tepla - nelineárny model  
možnosť voľby riadiacich veličín - hmotnostné toky v jednotlivých rúrkach  
a teploty vstupujúcich médií.

Parameters

Vstupné - riadiace veličiny 1-áno 0-nie [m1 m3 T1 T3]  
[0 0 0 1]

Poruchové veličiny 1-áno 0-nie [m1 m3 T1 T3]  
[0 0 0 0]

Vstupné teploty [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3]  
[20 75]

Vstupné hmotnostné toky [vnútorná vonkajšia] rúrka [m1 m3]  
[1100/3600 400/3600]

Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]  
[810 2.1e3 750]

Parametre média vo vonkajšej rúrke [hustota cp alfa]  
[1000 4.2e3 1480]

Parametre rúrky [hustota cp]  
[8930 385]

Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej hrúbka steny]  
[25e-3 50e-3 1.5e-3]

Dĺžka výmenníka tepla  
[10]

Počet úsekov pri diskretizácii  
[5]

Vektor sledovaných veličín [.. T(1,i) T(2,i) T(3,i) ..]  
[0 0 0, 0 0 0, 1 0 0, 0 0 0, 1 0 1]

OK Cancel Help Apply

Obr. 3.25 Správne vyplnený formulár pre modelový príklad  
trojkapacitný rúrkový výmenník tepla súprúdový

Blok Trojkapacitný rúrkový výmenník tepla súprudový - matice má navyše položku vypísanie matíc A,B,C,D.

**Vypísanie matíc A,B,C,D** – ak je zaškrtnutý check-box, tak sa po kliknutí na voľbu OK resp. APPLY vypíšu matice  $A, B, C, D$  v pracovnom okne MATLABu. V opačnom prípade sa blok „zatvorí“, nevypíšu sa matice a systém je pripravený na simuláciu. Ak chceme vypísať matice, tak pre modelový príklad

*Vypísanie matíc A,B,C,D*



Malá odlišnosť je aj v položkách vstupné riadiace veličiny a poruchové veličiny a to, že nemôžeme riadiť vstupnými hmotnostnými tokmi kvapaliny do vnútornej, resp. vonkajšej rúrky. Správne vyplnenie daného bloku znázorňuje obr. 3.26 a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMTRVTSM\_demo*.

### **Ponukový panel**

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať z daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

### **3.4.2.3 Opis funkcií využívaných danými blokmi**

Funkcie, ktoré dané bloky využívajú sú:

- |              |          |
|--------------|----------|
| • $TRVTS\_M$ | $TRVTS1$ |
| • $TRVTS\_A$ | $TRVTS2$ |
| • $TRVTS\_B$ | $TRVTS3$ |
| • $TRVTS\_C$ | $TRVTS4$ |
| • $TRVTS\_D$ | $TRVTS5$ |
| • $TRVTSS$   |          |

Majú rovnakú činnosť ako funkcie, ktoré využívajú bloky pre jednokapacitný rúrkový výmenník s rozdielom v zdrojovom kóde (iné rovnice, premenné) a v označení. Rozdiel v označení spočíva v zámene prvého písmena názvu jednotlivých funkcií. Pri jednokapacitnom rúrkovom výmenníku je prvé písmeno  $J$  a pri trojkapacitnom je prvé písmeno  $T$ .

**Block Parameters: Trojkapacitny rurovny vymennik tepla m...**

TROJKAPACITNY RUKOVY VYMENNIK TEPLA - súprúdový-matice (mas  
Trojkapacitný súprúdový rurový výmenník tepla -matice - lineárny model  
možnosť voľby radiacích veličín - teploty vstupujúcich médií.

Parameters

Vstupné - radiace veličiny 1-áno 0-nie [T1 T3]  
[0 1]

Poruchové veličiny 1-áno 0-nie [T1 T3]  
[0 0]

Vstupné teploty [vnútorná vonkajšia] rúrka [T1 T3]  
[20 75]

Vstupné hmotnostné toky [vnútorná vonkajšia] rúrka [m1 m3]  
[1100/3600 400/3600]

Parametre média vo vnútornej rúrke [hustota cp alfa]  
[810 2.1e3 750]

Parametre média vo vonkajšej rúrke [hustota cp alfa]  
[1000 4.2e3 1480]

Parametre rúrky [hustota cp]  
[8930 385]

Priemery rúrok [vnútornej vonkajšej hrúbka steny]  
[25e-3 50e-3 1.5e-3]

Dĺžka výmenníka tepla  
[10]

Počet úsekov pri diskretizácii  
[5]

Vektor sledovaných veličín [.. T(1,i) T(2,i) T(3,i) ..]  
[0 0 0, 0 0 0, 1 0 0, 0 0 0, 1 0 1]

☒ Vypísanie matíc A,B,C,D

OK Cancel Help Apply

obr. 3.26 *Správne vyplnený formulár pre modelový príklad*

Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Vymenniky\_tepla\TRVTS*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

### 3.4.3 Dvojkapacitný výmenník tepla

Pre dvojkapacitný súprudový výmenník tepla boli vytvorené bloky DVOJKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA – súprudový a DVOJKAPACITNY RURKOVY VYMENNIK TEPLA súprudový – matice. Tieto bloky sú veľmi podobné ako bloky vytvorené pre trojkapacitný výmenník – majú len nepatrné odlišnosti vo vypĺňaní formuláru. Pracujú na rovnakom princípe ako bloky vytvorené pre troj- a jedno- kapacitné rúrkové výmenníky tepla

. Funkcie, ktoré boli vytvorené sú podobné funkciám pre troj- a jedno- kapacitné výmenníky . Majú rozdiel v tvare zdrojového kódu a v názve – pre dvojkapacitné je prvé písmeno *D*.

Ak sa chcete o činnosti jednotlivých funkcií dozvedieť viac zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom *CD* v adresári *PDF\Vymenniky tepla\DRVTS*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

## 3.5 Zoznam použitých symbolov

- *VELIČINY*

<i>Symbol</i>	<i>Názov veličiny</i>	<i>Jednotka SI</i>
<i>A</i>	- teplovýmenná plocha zariadenia	$\text{m}^2$
<i>cp</i>	- špecifická tepelná kapacita	$\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
<i>d</i>	- priemer	$\text{m}$
<i>k</i>	- úhrnný koeficient prechodu tepla	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
<i>m</i>	- hmotnosť kvapaliny	$\text{kg}$
<i>m<sub>i</sub></i>	- hmotnostný tok	$\text{kg.s}^{-1}$
<i>l</i>	- dĺžka	$\text{m}$
<i>q</i>	- objemový prietok kvapaliny	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
<i>Q</i>	- teplo	$\text{J}$
<i>Q̇</i>	- tepelný tok	$\text{W}$
<i>T</i>	- časová konštanta	$\text{s}$
<i>V</i>	- objem	$\text{m}^3$
<i>w</i>	- Rýchlosť prúdenia	$\text{m.s}^{-1}$

$\alpha$	- koeficient prestupu tepla	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
$\delta$	- hrúbka	m
$\vartheta$	- teplota	K
$\vartheta_p$	- teplota pary	K
$\rho$	- hustota tekutiny	$\text{kg.m}^{-3}$

• *DOLNÝ INDEX*

*Symbol - Názov veličiny*

---

$i$	- poradové číslo
$j$	- poradové číslo
$n$	- poradové číslo
$n$	- počet zariadení, počet úsekov pri diskretizácii
$v$	- vstupná veličina
$p$	- para
1	- médium vo vnútornej rúrke výmenníka tepla
2	- stena výmenníka tepla
3	- médium vo vonkajšej rúrke výmenníka tepla
12	- vzťah prvej a druhej veličiny
23	- vzťah druhej a tretej veličiny
13	- vzťah prvej a tretej veličiny

• *HORNÝ INDEX*

*Symbol - Názov veličiny*

---

$s$	- ustálený – rovnovážny stav
-----	------------------------------

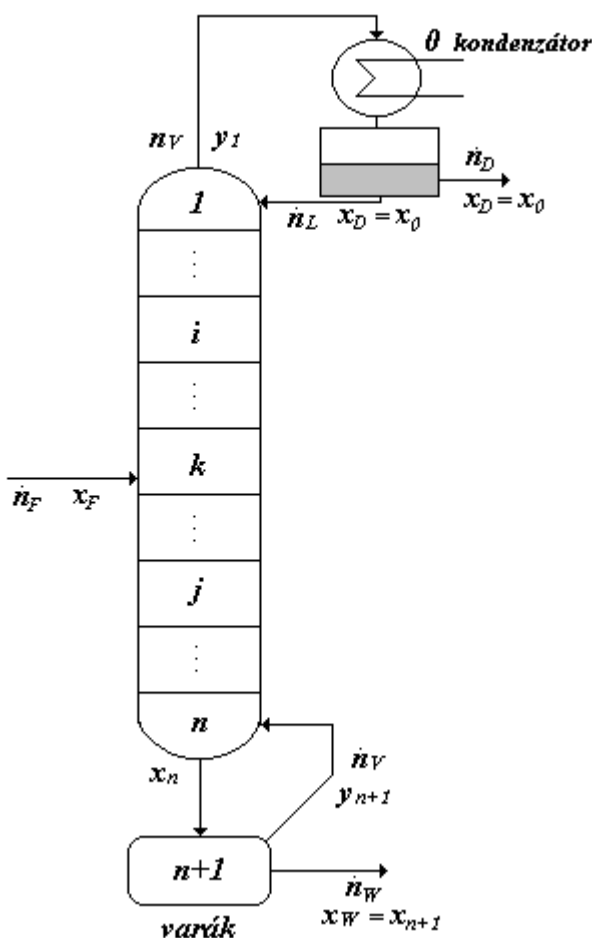
## 4 ETÁŽOVÁ REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA

V rektifikačných kolónach prebiehajú procesy s prestupom látky, ktoré sú pre chemický priemysel veľmi dôležité. Rektifikácia je proces delenia kvapalných čiastočne, alebo úplne vzájomne rozpustných zmesí, založený na rôznych parciálnych tlakoch zložiek tvoriacich zmes. Pri odvodení matematického modelu etážovej rektifikačnej kolóny sa obmedzíme len na prípad delenia binárnej zmesi [2].

### 4.1 Etážová rektifikačná kolóna - nelineárny matematický model

#### 4.1.1 Teoretická časť

Pri zostavovaní matematického modelu etážovej rektifikačnej kolóny je treba si uvedomiť, že tento systém pri zohľadnení všetkých čiastkových procesov prebiehajúcich pri rektifikácii patrí k najzložitejším systémom.



Obr. 4.1 Etážová rektifikačná kolóna

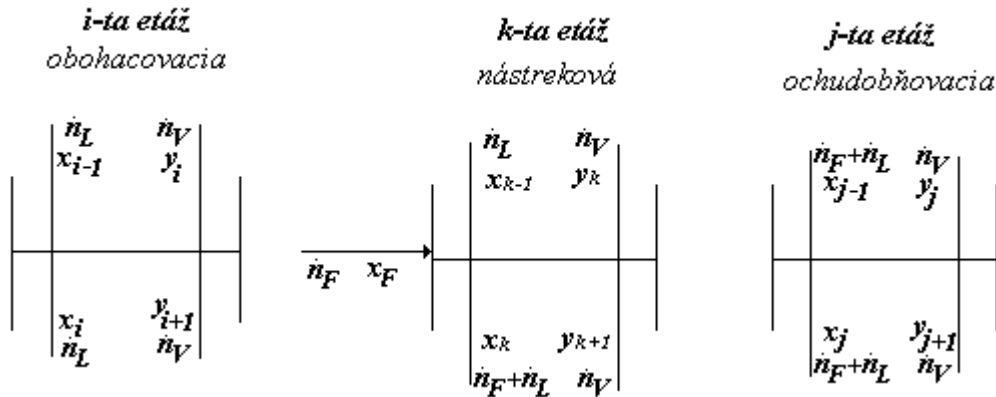
Predpokladajme systém, skladajúci sa z  $n$ -etážovej kolóny s obohacovacou a ochudobňovacou časťou a prídavných zariadení, tvorených varákom, kondenzátorom a zásobníkom kondenzátu (obr. 4.1). Uvažujme rektifikáciu binárnej zmesi, pričom kolóna má jediný vstup (nástrek) na  $k$ -tu etáž a výstupy len z varáka (destilačný zvyšok) a zásobníka kondenzátu (destilát). Kvapalina, ktorá steká kolónou (spätný tok), vchádza do varáka, kde sa spája s kvapalnou zádržou. Vo varáku prebieha odparovanie a pary prúdia do kolóny. Pary z hlavy kolóny kondenzujú a dopĺňajú zádrž kvapaliny v zásobníku kondenzátu. Časť kondenzátu sa vracia do kolóny ako vonkajší spätný tok [3].

Pri odvodení matematického modelu sa obmedzíme na najjednoduchší opis systému, ktorý získame po zavedení nasledujúcich zjednodušujúcich predpokladov:

- dokonalé miešanie kvapalnej fázy na etážach, v zásobníku kondenzátu aj vo varáku,
- k prestupu látky dochádza len na etážach kolóny a zloženie mimo etáži je konštantné,
- kolóna je tepelne izolovaná, straty tepla do okolia sú zanedbateľné,
- nástrek sa privádza v konštantnom množstve a na bode varu v kvapalnej fáze,
- kvapalina na všetkých etážach, vo varáku aj v zásobníku kondenzátu je na bode varu,
- prietok kvapalnej fázy je pozdĺž kolóny konštantný,
- tlak je pozdĺž kolóny konštantný,
- sú definované Murphreeho účinnosti etáži,
- rovnovážne zloženie, kvapalnej fázy sa rovná skutočnému, ale u pary to neplatí, rovnovážna závislosť  $y^* = f_{rel}(x)$ ,
- pary odchádzajúce z hlavy kolóny a v kondenzátore úplne kondenzujú,
- relatívna prchavosť zmesi pozdĺž kolóny je konštantná,
- etáže sú teoretické, t.j. para odchádzajúca z etáže je v rovnováhe s kvapalinou na etáži,
- zádrže parnej fázy na etážach sú zanedbateľné, zádrže kvapalnej fázy vo varáku, na jednotlivých etážach a kondenzátore sú konštantné,
- mólové výparné tepla oboch zložiek sú rovnaké, zjavné teploty sú zanedbateľné.



Za týchto predpokladov zostavíme matematický model kolóny len pomocou materiálovej bilancie prchavejšej zložky na jednotlivých etážach. Situácia na  $k$ -tej nástrekovej,  $i$ -tej etáži obohacovacej časti a  $j$ -tej etáži ochudobňovacej časti kolóny je znázornená na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Situácia na jednotlivých etážach

Dynamický matematický model etážovej rektifikačnej kolóny predstavuje sústavu nelineárnych diferenciálnych rovníc prvého rádu získaných materiálovými bilanciami prchavejšej zložky.

Pre kondenzátor:

$$\frac{d[H_0 x_0(t)]}{dt} = \dot{n}_V y_1(t) - \dot{n}_L x_0(t) - \dot{n}_D x_0(t) \quad (4.1)$$

Pre  $i$ -tu etáž obohacovacej časti:

$$\frac{d[H_i x_i(t)]}{dt} = \dot{n}_L x_{i-1}(t) + \dot{n}_V y_{i+1}(t) - \dot{n}_L x_i(t) - \dot{n}_V y_i(t) \quad (4.2)$$

$$\text{Murphreeho účinnosť: } y_i(t) = \eta_i \cdot y_i^* + (1 - \eta_i) y_{i+1}(t)$$

$$y_i = f_{nel}(x_i)$$

Pre  $k$ -tu nástrekovú etáž:

$$\frac{d[H_k x_k(t)]}{dt} = \dot{n}_F x_F(t) + \dot{n}_L x_{k-1}(t) + \dot{n}_V y_{k+1}(t) - (\dot{n}_F + \dot{n}_L) x_k(t) - \dot{n}_V y_k(t) \quad (4.3)$$

$$\text{Murphreeho účinnosť: } y_k(t) = \eta_k \cdot y_k^* + (1 - \eta_k) y_{k+1}(t)$$

$$y_k = f_{nel}(x_k)$$

Pre  $j$ -tu etáž ochudobňovacej časti:

$$\frac{d[H_j x_j(t)]}{dt} = (\dot{n}_F + \dot{n}_L) x_{j-1}(t) + \dot{n}_V y_{j+1}(t) - (\dot{n}_F + \dot{n}_L) x_j(t) - \dot{n}_V y_j(t) \quad (4.4)$$

$$\text{Murphreeho účinnosť: } y_j(t) = \eta_j \cdot y_j^* + (1 - \eta_j) y_{j+1}(t)$$

$$y_j = f_{nel}(x_j)$$

Pre varák:

$$\frac{d[H_{n+1} x_{n+1}(t)]}{dt} = (\dot{n}_F + \dot{n}_L) x_n(t) - \dot{n}_W x_{n+1}(t) - \dot{n}_V y_{n+1}(t) \quad (4.5)$$

$$\text{Murphreeho účinnosť: } y_{n+1}(t) = \eta_v \cdot y_{n+1}^*$$

$$y_{n+1} = f_{nel}(x_{n+1})$$

Vstupnými veličinami môžu byť zloženie nástreku, ktorý pôsobí zvyčajne ako poruchová veličina, tok látkového množstva parnej fázy kolónou, tok látkového množstva kvapalnej fázy kolónou, tok látkového množstva destilátu a destilačného zvyšku. Výstupnými veličinami môžu byť mólové zlomky prchavejšej zložky v kvapalnej, alebo parnej fáze pozdĺž etážovej rektifikačnej kolóny.

Pri vytváraní dynamického matematického modelu potrebujeme pre vytvorenie s-funkcie začiatočné podmienky, čo sú pre daný systém rovnovážne zloženia (mólové zlomky) kvapalnej fázy. Rektifikačná kolóna je v rovnovážnom stave, ak akumulčné členy v rovniciach (4.1-4.5) sú nulové. Pre mólový zlomok nástreku a toky látkových množstiev nástreku, destilačného zvyšku, destilátu, spätného toku a pár odchádzajúcich hlavou kolóny získame rozloženie mólových zlomkov pozdĺž kolóny a mólové zlomky destilátu a destilačného zvyšku v rovnovážnom stave iteračným riešením sústavy nelineárnych algebraických rovníc v tvare

Pre kondenzátor:

$$\dot{n}_V^s y_1^s - \dot{n}_L^s x_0^s - \dot{n}_D^s x_0^s = 0 \quad (4.6)$$

Pre  $i$ -tu etáž obohacovacej časti:

$$\dot{n}_L^s x_{i-1}^s + \dot{n}_V^s y_{i+1}^s - \dot{n}_L^s x_i^s - \dot{n}_V^s y_i^s = 0 \quad (4.7)$$

$$y_i(t) = \eta_i \cdot y_i^* + (1 - \eta_i) y_{i+1}(t)$$

$$y_i^s = f_{nel}(x_i^s)$$

Pre  $k$ -tu nástrekovú etáž:

$$\dot{n}_F^s x_F^s + \dot{n}_L^s x_{k-1}^s + \dot{n}_V^s y_{k+1}^s - (\dot{n}_F^s + \dot{n}_L^s) x_k^s - \dot{n}_V^s y_k^s = 0 \quad (4.8)$$

$$y_k^s = \eta_k y_k^* + (1 - \eta_k) y_{k+1}^s \quad y_k^s = f_{nel}(x_k^s)$$

Pre  $j$ -tu etáž ochudobňovacej časti:

$$(\dot{n}_F^s + \dot{n}_L^s) x_{j-1}^s + \dot{n}_V^s y_{j+1}^s - (\dot{n}_F^s + \dot{n}_L^s) x_j^s - \dot{n}_V^s y_j^s = 0 \quad (4.9)$$

$$y_j^s = \eta_j y_j^* + (1 - \eta_j) y_{j+1}^s \quad y_j^s = f_{nel}(x_j^s)$$

Pre varák:

$$(\dot{n}_F^s + \dot{n}_L^s) x_n^s - \dot{n}_W^s x_{n+1}^s - \dot{n}_V^s y_{n+1}^s = 0 \quad (4.10)$$

$$y_{n+1}^s = \eta_v y_{n+1}^* \quad y_{n+1}^s = f_{nel}(x_{n+1}^s)$$

pričom treba mať na zreteli, že pri voľbe vstupov musí byť zachovaná celková materiálová bilancia kolóny v tvare

$$\dot{n}_F^s = \dot{n}_W^s + \dot{n}_D^s \quad (4.11)$$

a celková materiálová bilancia prchavejšej zložky

$$\dot{n}_F^s x_F^s = \dot{n}_W^s x_W^s + \dot{n}_D^s x_D^s \quad (4.12)$$

#### 4.1.2 Etážová rektifikačná kolóna – použitie bloku

**Etážová rektifikačná kolóna** je simulinkový blok, ktorý je súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 4.3).



Obr. 4.3 **Blok – etážová rektifikačná kolóna**

Slúži na simulovanie dynamických vlastností systému etážová rektifikačná kolóna, ktorý umožňuje rôzne možnosti voľby parametrov. Blok je vytvorený tak, aby užívateľovi poskytoval čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať.

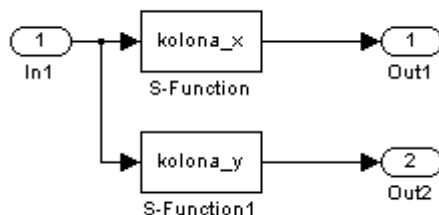
Táto časť práce je venovaná opisu daného bloku, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- *opis bloku*
- *vyplnenie formulára daného bloku*
- *opis funkcií využívaných daným blokom*

#### 4.1.2.1 Opis bloku

Simulinkový blok Etážová rektifikačná kolóna je subsystém, ktorý má jeden vstup a dva výstupy. Vstupom do bloku (systému) je vektor riadiacich a poruchových veličín, t.j. mólový zlomok nástreku a toky látkových množstiev nástreku, destilátu, destilačného zvyšky, spätného toku a pár prechádzajúcich kolónou. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Ako už bolo spomenuté výstupy z bloku (systému) sú dva, a sú to sledované – merané veličiny. Výstup, ktorý sa nachádza v hornej časti bloku je vektor mólových zlomkov kvapalnej fázy a výstup, ktorý sa nachádza v spodnej časti je vektor mólových zlomkov parnej fázy (obr. 4.4). Ako zadať premenné tak, aby boli zobrazené požadované mólové zlomky kvapalnej aj parnej fázy je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené blok etážová rektifikačná kolóna je subsystém, ktorý v sebe zahŕňa s-funkcie *kolona\_x* a *kolona\_y* (obr. 4.4), ktoré sú zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku etážovej rektifikačnej kolóny v prostredí MATLAB.



Obr. 4.4 *Odmaskovaný subsystém etážovej rektifikačnej kolóny*

Viacej o s-funkciách a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

#### 4.1.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Formulár bloku Etážová rektifikačná kolóna má tvar, ktorý znázorňuje obr. 4.5.

Je tvorený z nasledujúcich častí

- *Názov masky bloku – ETAZOVA REKTIFIKACNA KOLONA*
- *Základný opis masky bloku – Etážová rektifikačná kolóna – nelineárny model*
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel – možnosti: OK, ...*

**Block Parameters: Etážová rektifikačná kolóna**

ETAZOVA REKTIFIKACNA KOLONA (mask)  
Etážová rektifikačná kolóna - nelineárny model

Parameters

Riadiace - akčné veličiny ano-1 nie-0 [nF xF nL nD nV nW]  
[0 0 1 0 0 0]

Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [nF xF nD nL nV nW]  
[0 0 0 0 0 0]

Počet etáží  
n

Nástreková etáž  
F

Konštanty rovnovážnej krivky  $y=(ax^2+bx+c)/(dx^2+ex+1)$   
[a b c d e]

Učinnosti [jednotlivé etáže varák] v percentách  
[ni nv]

Tok látkového množstva a molový zlomok nástreku [nF xF]  
[nF xF]

Tok látkového množstva destilátu a destil. zvyšku [nD nW]  
[nD nW]

Tok látkového množstva spätného toku a odchádzajúcich pár [nL nV]  
[nL nV]

Zádrže kvapaliny [jednotlivé etáže varák]  
[Hi Hiv]

Výstupné veličiny xi-yi 1 - ano 0 - nie [.. xi-yi ..]  
[1 0 .. 1 0 0 .. 0 0]

OK Cancel Help Apply

Obr. 4.5 Formulár bloku Etážová rektifikačná kolóna

**Názov masky bloku**

Zahrňa meno bloku a pre daný blok má tvar *ETAZOVA REKTIFIKACNA KOLONA*.

**Základný opis masky bloku**

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu. V tejto časti môžu byť uvedené rok vytvorenia, verzia, meno osôb – organizácie, ktorá daný blok vytvorila atď.

**Formulár – Parameters**

Je najhlavnejšia časť masky bloku. Pomocou neho sú zadávané jednotlivé parametre, ktoré sú potrebné pre správnu činnosť daného bloku. Ak sa zadávaný parameter skladá z viac ako jedného čísla, treba ho zadať vo vektorovom tvare, ktorý sa zapisuje v hranatých zátvorkách.

Formulár – Parameters bloku Etážová rektifikačná kolóna (obr. 4.5) sa skladá z nasledujúcich položiek:

- *Riadiace – akčné veličiny*
- *Poruchové veličiny*
- *Počet etáží*
- *Nástreková etáž*
- *Konštanty rovnovážnej krivky*
- *Účinnosti [jednotlivé etáže varák]*
- *Tok látkového množstva a mólový zlomok nástreku*
- *Tok látkového množstva destilátu a destilačného zvyšku*
- *Tok látkového množstva spätného toku a odchádzajúcich pár*
- *Zádrže kvapaliny [jednotlivé etáže varák]*
- *Vektor sledovaných veličín  $x_i y_i$*

Pri tvorbe návodu na vyplnenie formuláru bloku etážová rektifikačná kolóna bol uvažovaný modelový príklad – 6-etážová rektifikačná kolóna so 4- nástrekovou etážou so zadanými parametrami.

Mólový zlomok nástreku 0,50; tok látkového množstva nástreku 0,234; tok látkového množstva destilátu 0,165; tok látkového množstva spätného toku 0,16; rovnovážna krivka je zadaná v tvare  $y = (a + cx + ex^2)/(1 + bx + dx^2)$  s koeficientmi  $a = 0,0004622436$ ;  $c = 15,131084$ ;  $e = -5,1346083$ ;  $b = 25,2741$ ;  $d = -16,30502$ . Zádrže kvapaliny na etážach

a v kondenzátore 0,2 kmol a vo varáku 1 kmol. Účinnosť etáži je 60 % a účinnosť varáka je 100 %. Riadiacou veličinou je tok látkového množstva spätného toku a poruchovou veličinou je mólový zlomok nástreku. Výstupnou veličinou je zloženie (mólový zlomok) kvapalnej fázy v kondenzátore, na hlave kolóny, nástrekovvej etáži a vo varáku.

**Riadiace - akčné veličiny** **ano-1 nie-0**  $[nF \ xF \ nL \ nD \ nV \ nW]$  – vektor, ktorý má rozmer **1 x 6** a nadobúda hodnoty **0** a **1**. Riadiace veličiny pre daný systém môžu byť mólový zlomok nástreku a toky látkových množstiev nástreku, spätného toku, destilátu, pár odchádzajúcich z hlavy kolóny a destilačného zvyšku. Ak *i*-ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude riadiaca, prvok vektora na *i*-tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že *j*-ta vstupná veličina nebude riadiaca, prvok vektora na *j*-tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

$$\text{Riadiace - akčné veličiny} \quad \text{ano-1} \quad \text{nie-0} \quad [nF \ xF \ nL \ nD \ nV \ nW] \quad [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

**Poruchové veličiny** **ano-1 nie-0**  $[nF \ xF \ nL \ nD \ nV \ nW]$  – vektor, ktorý má rozmer **1 x 6** a nadobúda hodnoty **0** a **1**. Poruchové veličiny pre daný systém môžu byť mólový zlomok nástreku a toky látkových množstiev nástreku, spätného toku, destilátu, pár odchádzajúcich z hlavy kolóny a destilačného zvyšku. Ak *i*-ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude poruchová, prvok vektora na *i*-tom mieste vektora bude mať hodnotu 1. V prípade, že *j*-ta vstupná veličina nebude poruchová, prvok vektora na *j*-tom mieste nadobudne hodnotu 0.

Pre modelový príklad:

$$\text{Poruchové veličiny} \quad \text{ano-1} \quad \text{nie-0} \quad [nF \ xF \ nL \ nD \ nV \ nW] \quad [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

**Počet etáží** – zadáva sa počet etáží. Medzi etáže sa nezapočítava varák a kondenzátor.

Pre modelový príklad:

$$\text{Počet etáží} \quad 6$$

**Nástreková etáž** – zadáva sa číslo nástrekovvej etáže. Číslovanie etáží je od kondenzátora, má hodnotu nula, po varák, má hodnotu  $n+1$ .

Pre modelový príklad:

$$\text{Nástreková etáž} \quad 4$$

**Konštanty rovnovážnej krivky**  $y=(ax^2 + bx +c)/(dx^2 + ex + 1)$  – vektor, ktorý má rozmer **1 x 5**. Jednotlivé prvky vektora sú koeficienty rovnovážnej krivky a to v tvare  $[a \ b \ c \ d \ e]$ . Ak je niektorý z koeficientov rovný nule, treba na jeho miesto do daného vektora zadať 0.

Rovnovážna krivka má tvar 
$$y^* = \frac{ax^2 + bx + c}{dx^2 + ex + 1}$$

Pre modelový príklad:

*Konštanty rovnovážnej krivky*

*[-5.1346083 15.131084 46.224365e-6 -16.30502 25.2741]*

**Účinnosti [jednotlivé etáže varák]** – vektor, ktorý môže nadobúdať dva tvary a to:

**1 x 2** – ak účinnosti jednotlivých etáží sú rovnaké, vtedy má vektor tvar  
[účinnosť etáží účinnosť varáka]

**1 x (n+1)** – ak účinnosti jednotlivých etáží sú rôzne, vtedy prvých  $n$ - prvkov vektora je priradených jednotlivým etážam a  $n+1$  prvok je priradený účinnosti varáka, pričom platí, že  $i$ -ty prvok vektora je účinnosť  $i$ -tej etáže.

Účinnosť etáží resp. varáka sa zadávajú v percentách.

Pre modelový príklad:

*Účinnosti [jednotlivé etáže varák]*

*[60 100]*

**Tok látkového množstva a mólový zlomok nástreku [nF xF]** – vektor, ktorý má rozmer

**1 x 2**, pričom prvý prvok vektora je hodnota toku látkového množstva nástreku a druhý prvok vektora je hodnota mólového zlomku nástreku. V prípade, že niektorý parameter nie je zadáný, tak do vektora za príslušný prvok treba zadať hodnotu –1.

Pre modelový príklad:

*Tok látkového množstva a mólový zlomok nástreku [nF xF]*

*[0.234 0.5]*

**Tok látkového množstva destilátu a destil. zvyšku [nD nW]** – vektor, ktorý má rozmer

**1 x 2**, pričom prvý prvok vektora je hodnota toku látkového množstva destilátu a druhý prvok vektora je hodnota toku látkového množstva destilačného zvyšku. V prípade, že niektorý parameter nie je zadáný, tak do vektora, za príslušný prvok treba zadať hodnotu –1.

Pre modelový príklad:

*Tok látkového množstva destilátu a destil. zvyšku [nD nW]*

*[0.165 -1]*

**Tok látkového množstva spätného toku a odchádzajúcich pár [nL nV]** – vektor, ktorý

má rozmer **1 x 2**, pričom prvý prvok vektora je hodnota toku látkového množstva spätného toku a druhý prvok vektora je hodnota toku látkového množstva odchádzajúcich pár. V prípade, že niektorý parameter nie je zadáný, tak do vektora, za príslušný prvok treba zadať hodnotu –1.

Pre modelový príklad:

*Tok látkového množstva spätného toku a odchádzajúcich pár [nL nV]*

*[0.16 -1]*



**Zádrže kvapalín [jednotlivé etáže varák]** – vektor, ktorý môže nadobúdať dva tvary:

**1 x 2** – ak zádrže kvapaliny pre jednotlivé etáže a kondenzátor sú rovnaké, vtedy má vektor tvar [(zádrže na etážach+kondenzátore) (zádrž vo varáku)]

**1 x (n+2)** – ak zádrže kvapaliny pre jednotlivé etáže a kondenzátor sú rôzne, vtedy prvý prvok vektora prislúcha zádrži kvapaliny v kondenzátore, druhý až  $n+1$  prvok vektora je priradený zádržiam kvapaliny na jednotlivých etážach a  $n+2$  prvok vektora je priradený zádrži kvapaliny vo varáku, pričom platí, že  $i+1$  prvok vektora je zádrž kvapalina na  $i$ -tej etáži.

Pre modelový príklad:

*Zádrže kvapalín [jednotlivé etáže varák] [0.2 1.0]*

**Vektor sledovaných veličín  $x_i y_i$  1-ano 0-nie** – vektor, ktorý má rozmer **1 x (n+2)**, kde  $n$  je počet etáží. Ak má byť výstupná, sledovaná veličina, t.j. mólové zlomky kvapalnej a parnej fázy na  $i$ -tej etáži vykreslené, tak  $i+1$  prvok vektora nadobudne hodnotu 1, v opačnom prípade nadobudne hodnotu 0. Aj v tomto prípade platí, že prvý prvok vektora je kondenzátor, druhý až  $n+1$  prvok sú jednotlivé etáže, pričom  $i+1$  prvok je  $i$ -ta etáž a  $n+2$  prvok vektora je varák.

Pre modelový príklad:

*Vektor sledovaných veličín  $x_i y_i$  1-ano 0-nie [1 1 0 0 1 0 0 1]*

### **Poznámka:**

Takto vyplnený formulár platí len vtedy, ak pri simulácii dynamických vlastností nerobíme skokovú zmenu nejakej riadiacej veličiny, pri konštantnej hodnote veličiny, ktorá nie je zadaná. Blok je naprogramovaný tak, aby nezadané veličiny automaticky dopočítal. V danom prípade bude veličina, ktorá má byť konštantná dopočítaná a jej konštantnosť nebude dodržaná. Ak teda chceme riadiť pri konštantnej hodnote musíme zadať aj číselnú hodnotu veličiny, ktorá má byť konštantná.

Napr. uvažujme náš modelový príklad. Chceme simulovať dynamické vlastnosti systému pri skokovej zmene toku látkového množstva spätného toku pri konštantnom toku látkového množstva odchádzajúcich pár. Pri výpočte začiatočných podmienok (mólové zlomky v rovnovážnom stave) môže byť formulár vyplnený podľa predchádzajúcich pokynov (obr. 4.6). Pri simulácii s danou skokovou zmenou musí byť zadaná hodnota toku látkového množstva spätného toku, ktorý zistíme napríklad materiálovou bilanciou (pre modelový príklad  $n_V = n_D + n_L = 0,165 + 0,16$ ). Takto vypočítané  $n_V$  musí byť potom zadané do formulára daného bloku.

Ostatné parametre bloku sú nastavované podľa predchádzajúcich pokynov. Správne nastavenie danej časti formulára je znázornené na obr. 4.7.

Správne vyplnený formulár pre uvažovaný modelový príklad, t.j. systém etážová rektifikačná kolóna je na obr. 4.6 a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMERK\_demo*.

**Block Parameters: Etážová rektifikačná kolóna**

ETAZOVA REKTIFIKACNA KOLONA (mask)  
Etážová rektifikačná kolóna - nelineárny model

Parameters

Riadiace - akčné veličiny ano-1 nie-0 [nF xF nL nD nV nW]  
[0 0 1 0 0 0]

Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [nF xF nD nL nV nW]  
[0 1 0 0 0 0]

Počet etáží  
6

Nástreková etáž  
4

Konštanty rovnovážnej krivky  $y=(ax^2+bx+c)/(dx^2+ex+1)$   
[-5.1346083 15.131084 46.224365e-6 -16.30502 25.2741]

Učinnosti [jednotlivé etáže varák]  
[60 100]

Tok látkového množstva a molový zlomok nástreku [nF xF]  
[0.234 0.5]

Tok látkového množstva destilátu a destil. zvyšku [nD nW]  
[0.165 -1]

Tok látkového množstva spätného toku a odchádzajúcich pár [nL nV]  
[0.16 -1]

Zádrže kvapaliny [jednotlivé etáže varák]  
[0.2 1]

Výstupné veličiny xi-yi 1 - ano 0 - nie [.. xi-yi ..]  
[1 1 0 0 1 0 0 1]

OK Cancel Help Apply

Obr. 4.6 *Správne vyplnený formulár pre modelový príklad*

**Ponukový panel**

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli, t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

Obr. 4.7 *Správne vyplnený formulár pri simulácii so skokovou zmenou pri konštantnej hodnote niektorej nezadanej veličiny - pre modelový príklad*

**4.1.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom**

Simulinkový blok etážová rektifikačná kolóna využíva nasledovné funkcie:

- *kolona1*                      *kolona2*
- *kolona3*                      *kolona4*
- *kolona5*                      *kolona\_x*
- *kolona\_y*

*kolona1* – funkcia, ktorá generuje na základe zadaných vstupných parametrov vektor derivácii zmien zloženia (mólových zlomkov) kvapalnej fázy na jednotlivých etážach od času a transponuje daný vektor do výstupnej premennej k. Funkcia je používaná vo funkcii *kolona2* a v s-funkciách *kolona\_x* a *kolona\_y*.

*kolona2* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov, využitím funkcie *fsolve* počíta hodnoty zloženia (mólových zlomkov) kvapalnej fázy na jednotlivých etážach

v ustálenom – rovnovážnom stave, t.j. vektor  $[x_0 \dots x_i \dots x_k \dots x_j \dots x_{n+1}]$ . Funkcia je používaná v s-funkciách *kolona\_x* a *kolona\_y*.

*kolona3* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov vytvorí vektor výstupných parametrov tak, že určí ktoré sú riadiace, resp. poruchové a priradí im príslušnú číselnú hodnotu. Funkcia je používaná v s-funkciách *kolona\_x* a *kolona\_y*.

*kolona4* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *C* – maticu výstupu. Funkcia je priamo definovaná v maske bloku a je využívaná s-funkciami *kolona\_x* a *kolona\_y*.

*kolona5* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov počíta vektor zloženia (mólových zlomkov) parnej fázy na jednotlivých etážach a transponuje ho do výstupnej premennej *H*. Funkcia je používaná v s-funkcii *kolona\_y*.

*kolona\_x* – s-funkcia vytvorená pre simulinkový blok etážová rektifikačná kolóna, ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému v kvapalnej fáze v prostredí MATLAB. Využíva funkcie:

- *kolona1*                      *kolona2*
- *kolona4*                      *kolona3 - nepriamo*

*kolona\_y* – s-funkcia vytvorená pre simulinkový blok etážová rektifikačná kolóna, ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému v parnej fáze v prostredí MATLAB. Využíva funkcie:

- *kolona1*                      *kolona2*
- *kolona4*                      *kolona5*
- *kolona3 - nepriamo*

Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Etazova\_kolona*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

## 4.2 Zoznam použitých symbolov

### • VELIČINY

Symbol	Názov veličiny	Jednotka SI
<i>a, b, c, d, e</i>	konštanty rovnovážnej krivky	bezrozmerná
<i>H</i>	zádrž kvapaliny	mol
<i>n</i>	tok látkového množstva	mol.s <sup>-1</sup>

$x$	- mólový zlomok prchavejšej zložky v kvapalnej fáze	bezrozmerná
$y$	- mólový zlomok prchavejšej zložky v parnej fáze	bezrozmerná
$y^*$	- rovnovážny mólový zlomok prchavejšej zložky v parnej fáze	bezrozmerná
$\eta_i$	- účinnosť jednotlivých etáží	bezrozmerná
$\eta_v$	- účinnosť varáka	bezrozmerná

• *DOLNÝ INDEX*

*Symbol* - *Názov veličiny*

---

0	- označenie kondenzátora
$i$	- poradové číslo
$j$	- poradové číslo
$k$	- nástreková etáž
$n$	- poradové číslo
$n$	- počet etáží
$n+1$	- označenie varáka
$v$	- varák
$D$	- destilát
$F$	- nástrek
$L$	- spätný tok
$V$	- pary odchádzajúce hlavou kolóny
$W$	- destilačný zvyšok

• *HORNÝ INDEX*

*Symbol* - *Názov veličiny*

---

$s$	- ustálený – rovnovážny stav
-----	------------------------------

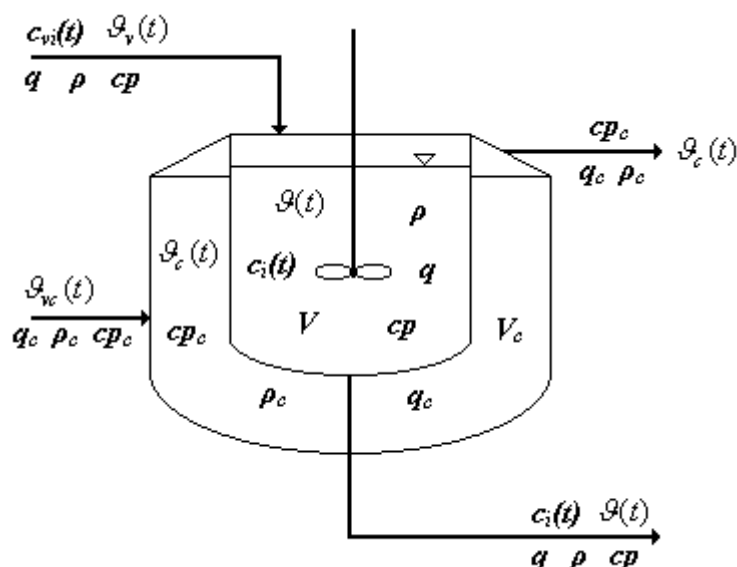
## 5 CHEMICKÉ REAKTORY

Systémy s chemickou reakciou – chemické reaktory, patria k základným zariadeniam chemickej technológie. Z hľadiska matematického opisu a požiadaviek na riadenie sú tieto systémy však veľmi zložité. Vyplýva to zo skutočnosti, že okrem fyzikálnych javov, ako je prúdenie, vedenie tepla, difúzia, prestup tepla, prebiehajú v chemických reaktoroch aj javy chemické, ktoré sú zvyčajne veľmi zložité a ich poznanie je na úrovni empirických vzťahov. Preto je nevyhnutné pri matematickom modelovaní chemických reaktorov používať mnohé zjednodušujúce predpoklady. Chemické reaktory patria do triedy nelineárnych systémov [3].

### 5.1 Prietokový chemický reaktor s miešaním – nelineárny model

#### 5.1.1 Teoretická časť

Prietokový chemický reaktor s dokonalým miešaním je systém so sústredenými parametrami. Pri odvodzovaní matematického modelu uvažujeme systém dokonale miešaný chemický reaktor s chladením, v ktorom prebieha všeobecná exotermická reakcia s  $n$  reagujúcimi zložkami v  $m$  reakciách, ktorý je znázornený na obr. 5.1.



Obr. 5.1 *Prietokový chemický reaktor s miešaním*

Pri odvádzaní zavedieme nasledovné zjednodušujúce predpoklady:

- tepelná kapacita steny reaktora a jej tepelný odpor sú zanedbateľné
- úhrnný koeficient prechodu tepla je konštantný
- prietok, hustota, špecifická tepelná kapacita, objem reakčnej zmesi sú konštantné
- teplota a koncentrácia v celom objeme reakčnej zmesi sú rovnaké, čo sa zabezpečuje dokonalým miešaním
- teplota a koncentrácia výstupného prúdu sú rovnaké ako teplota a koncentrácia reakčnej zmesi v reaktore
- objemový prietok reakčnej zmesi na vstupe do reaktora a výstupe z reaktora je rovnaký a konštantný
- teplota chladiacej kvapaliny v celom objeme plášťa je rovnaká

V tomto prípade je daný systém opísaný  $n-1$  rovnicami materiálovej bilancie v tvare

$$q c_{vi}(t) + V \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \cdot \xi_{vj}(t) = q c_i(t) + \frac{d[V \cdot c_i(t)]}{dt} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (5.1)$$

kde  $\xi_{vj}$  je rýchlosť chemickej reakcie na jednotku objemu reagujúcej zmesi pre  $j$ -tú reakciu, ktorá je definovaná súčinom rýchlostnej konštanty danej reakcie a koncentrácií reagujúcich zložiek, umocnených poriadkom reakcie.

rovniciou entalpiekej bilancie reakčnej.

$$q \rho c_p \vartheta_v(t) = q \rho c_p \vartheta(t) + A k [\vartheta(t) - \vartheta_c(t)] + V \sum_{j=1}^m \xi_{jv}(t) \cdot (\Delta_r H)_j + \frac{d[V \rho c_p \vartheta(t)]}{dt} \quad (5.2)$$

a rovnicou entalpiekej bilancie chladiaceho média

$$q_c \rho_c c_{p_c} \vartheta_{vc}(t) + A k [\vartheta(t) - \vartheta_c(t)] = q_c \rho_c c_{p_c} \vartheta_c(t) + \frac{d[V_c \rho_c c_{p_c} \vartheta_c(t)]}{dt} \quad (5.3)$$

so začiatočnými podmienkami

$$c_i(0) = c_i^s \quad \text{pre } i = 1, \dots, n$$

$$\vartheta(0) = \vartheta^s \quad \vartheta_c(0) = \vartheta_c^s$$

Vstupnými veličinami sú vstupné koncentrácie jednotlivých zložiek –  $c_{vi}(t)$ , teplota reakčnej zmesi na vstupe do reaktora  $\vartheta_v(t)$  a teplota chladiaceho média na vstupe do reaktora  $\vartheta_{vc}(t)$ . Výstupnými veličinami sú koncentrácie jednotlivých zložiek  $c_i(t)$ , teplota reakčnej zmesi  $\vartheta(t)$  a chladiaceho média  $\vartheta_c(t)$ .

Prietokový chemický reaktor bude v rovnovážnom stave, ak akumulčné členy z rovníc (5.1-5.3) budú rovné nule. Potom matematický model rovnovážneho stavu vyjadruje  $n-1$  rovníc materiálovej bilancie v tvare

$$q^s c_{vi}^s + V \cdot \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \cdot \xi_{vj}^s = q^s c_i^s \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (5.4)$$

rovnícou entalpickej bilancie reakčnej zmesi

$$q^s \rho_c p \vartheta_v^s = q^s \rho_c p \vartheta^s + Ak [\vartheta^s - \vartheta_c^s] + V \sum_{j=1}^m \xi_{jv}^s \cdot (\Delta_r H)_j \quad (5.5)$$

a rovnícou entalpickej bilancie chladiaceho média

$$q_c^s \rho_c c_{pc} \vartheta_{vc}^s + Ak [\vartheta^s - \vartheta_c^s] = q_c^s \rho_c c_{pc} \vartheta_c^s \quad (5.6)$$

Riešením týchto rovníc získame pre zadané vstupné parametre teplotu chladenia v plášti  $\vartheta_c^s$ , hodnoty teploty reakčnej zmesi  $\vartheta^s$  a koncentrácie jednotlivých zložiek  $c_i^s$  v rovnovážnom stave. Tieto hodnoty sú začiatočnými podmienkami pre riešenie rovníc (5.1-5.3). Zároveň sú pracovným bodom, v okolí ktorého môžeme linearizovať daný nelineárny matematický model.

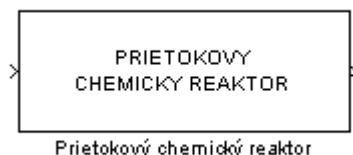
### 5.1.2 Prietokový chemický reaktor s miešaním – použitie bloku

**Prietokový chemický reaktor** je simulinkový blok, ktorý je súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 5.2). Slúži na modelovanie systému prietokový chemický reaktor. Blok je vytvorený s určitými obmedzeniami, ktoré sú:

- *maximálny počet chemických reakcií sú tri,*
- *maximálny počet reaktantov je päť,*
- *nedajú sa modelovať postupné reakcie.*

Aj napriek týmto obmedzeniam je blok vytvorený tak, aby užívateľovi poskytoval čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať pri simulovaní dynamických vlastností daného procesu.



Obr. 5.2 **Blok – prietokový chemický reaktor**

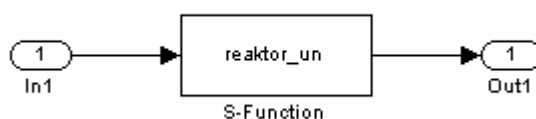
Táto časť práce je venovaná opisu daného bloku, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- opis bloku
- vyplnenie formulára daného bloku
- opis funkcií využívaných daným blokom

### 5.1.2.1 Opis bloku

Simulinkový blok Prietokový chemický reaktor je subsystém, ktorý má jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do bloku (systému) je vektor riadiacich a poruchových veličín, t.j. objemový prietok reakčnej zmesi, objemový prietok chladiaceho média, vstupná teplota reakčnej zmesi, vstupná teplota chladiaceho média a vektor vstupných koncentrácií jednotlivých zložiek. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z bloku (systému) sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená koncentrácie jednotlivých zložiek v reakčnej zmesi, teplotu reakčnej zmesi a teplotu chladiaceho média. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená požadovaná výstupná veličina, je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené, blok prietokový chemický reaktor je subsystém, ktorý v sebe zahŕňa s-funkcie *reaktor\_un* (obr. 5.3), ktoré sú zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku prietokového chemického reaktora s dokonalým miešaním a chladením v prostredí MATLAB.

Obr. 5.3 **Odmaskovaný subsystém prietokového chemického reaktora**

Viacej o s-funkciách a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 5.1.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Formulár bloku Prietokový chemický reaktor má tvar, ktorý znázorňuje obr. 5.4.

**Block Parameters: Prietokový chemický reaktor**

PRIETOKOVÝ CHEMICKÝ REAKTOR (mask)

Prietokový chemický reaktor s miešaním - nelineárny model  
Platný pre systém v ktorom prebiehajú max. 3 chemické reakcie a kde počet reaktantov je maximálne 5. Blok sa nedá použiť pre postupné reakcie.

Parameters

Počet [reakcií reaktantov produktov]  
[n r p]

Vstupné riadiace veličiny ano-1 nie-0 [q qc Tv Tvc cv]  
[0 1 0 0 0]

Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [q qc Tv Tvc cv]  
[0 0 0 0 0]

Matica stechiometrických koeficientov  
[a1 b1 .. :a2 b2 .. : a3 b3 ..]

Vektor vstupných koncentracii  
[cA .. cn]

Vstupné prietoky [reakčná zmes chladiace médium]  
[q qc]

Vstupné teploty [reakčná zmes chladiace médium]  
[T Tc]

Vektor rýchlostných konštánt  
[kr1 .. kri .. km]

Vektor reakčných energií  
[E1 .. Ei .. En]

Vektor reakčných entalpií  
[h1 .. hi .. hn]

Konštanty [hustota zmesi hustota media cp zmesi cp media]  
[ro roc cp cpc]

Konštanty [V reaktora V chladiča A-plocha k-prestupu tepla]  
[V Vc A k]

Vektor sledovaných veličin ano-1 nie-0 [ci ... cn T Tc]  
[1 0 .. 1 0 .. 1]

OK Cancel Help Apply

Obr. 5.4 *Formulár bloku prietokový chemický reaktor*

Je tvorený z nasledujúcich častí

- *Názov masky bloku – PRIETOKOVY CHEMICKY REAKTOR*
- *Základný opis masky bloku – Prietokový chemický reaktor – nelineárny model*
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel – možnosti: OK, ...*

### ***Názov masky bloku***

Zahrňa meno bloku a pre daný blok má tvar *PRIETOKOVY CHEMICKY REAKTOR*.

### ***Základný opis masky bloku***

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorca. V tejto časti môžu byť uvedené rok vytvorenia, verzia, meno osôb – organizácie, ktorá daný blok vytvorila atď. Sú v ňom uvedené určité obmedzenia, ktoré platia pre daný systém.

### ***Formulár – Parameters***

Je najhlavnejšia časť masky bloku. Pomocou neho sú zadávané jednotlivé parametre, ktoré sú potrebné pre správnu činnosť daného bloku. Ak sa zadávaný parameter skladá z viac ako jedného čísla treba ho zadať vo vektorovom tvare, ktorý sa zapisuje v hranatých zátvorkách.

Formulár – Parameters bloku Prietokový chemický reaktor (obr. 5.4) sa skladá z nasledujúcich položiek:

- *Počet [reakcií reaktantov produktov]*
- *Vstupné riadiace veličiny*
- *Poruchové veličiny*
- *Matica stechiometrických koeficientov*
- *Vektor vstupných koncentrácií*
- *Vstupné prietoky [reakčná zmes chladiace médium]*
- *Vstupné teploty [reakčná zmes chladiace médium]*
- *Vektor rýchlostných konštánt*
- *Vektor reakčných energií*
- *Vektor reakčných entalpií*

- Konštanty [*hustota zmesi hustota média cp zmesi cp média*]
- Konštanty [*V reaktora V chladiča A-plocha k-prestupu tepla*]
- Vektor sledovaných veličín [*ci .. cn T Tc*]

Pri tvorbe návodu na vyplnenie formuláru bloku prietokový chemický reaktor bol uvažovaný modelový príklad prietokového chemického reaktora s dokonalým miešaním reakčnej zmesi (obr. 5.1). Prebiehajú v ňom dve paralelné exotermické reakcie. Prvá reakcia je reakciou 1. poriadku, kde 1 mol A reaguje na 1 mol B, rýchlostná konštanta reakcie je  $k_1$ . Druhá reakcia je reakciou 1. poriadku, kde 2 mol A reaguje na 1 mol C, rýchlostná konštanta reakcie je  $k_2$ . Pri odvodení modelu uvažujte len tepelnú kapacitu reakčnej zmesi a chladiaceho média. Ostatné tepelné kapacity (tepelné kapacity stien reaktora) a straty tepla do okolia zanedbajte.

Dané sú parametre:

koncentrácia látky A vo vstupnom prúde reakčnej zmesi  $4,22 \text{ kmol m}^{-3}$ , ostatné koncentrácie vo vstupnou prúde sú nulové, teplota vstupného prúdu reakčnej zmesi 333 K; teplota vstupného prúdu chladiaceho média 298 K; prietok reakčnej zmesi  $0,015 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  prietok chladiaceho média  $0,004 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ; hustota reakčnej zmesi  $1020 \text{ kg m}^{-3}$ ; hustota chladiaceho média  $998 \text{ kg m}^{-3}$ ; špecifická tepelná kapacita reakčnej zmesi  $4,02 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ; špecifická tepelná kapacita chladiaceho média  $4,182 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ; objem reakčnej zmesi  $0,23 \text{ m}^3$ ; objem chladiaceho média  $0,21 \text{ m}^3$ ; plocha prestupu tepla z reakčnej zmesi do chladiaceho média  $1,51 \text{ m}^2$ ; úhrnný koeficient prechodu tepla  $42,8 \text{ kJ min}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ; podiel aktivačnej energie a univerzálnej plynovej konštanty 1. reakcie 9850 K; podiel aktivačnej energie a univerzálnej plynovej konštanty 2. reakcie 22019 K; reakčné entalpie pre 1. reakciu  $-8,6 \times 10^4 \text{ kJ/kmol}$  a pre 2. reakciu  $-1,82 \times 10^4 \text{ kJ/kmol}$  a predexponenciálne faktory pre 1. reakciu  $1,55 \times 10^{11} \text{ min}^{-1}$  a pre 2. reakciu  $4,55 \times 10^{25} \text{ min}^{-1}$ .

Riadiacou veličinou je objemový prietok chladiaceho média. Výstupnou veličinou sú koncentrácie látky A, C a teplota reakčnej zmesi.

**Počet [reakcií reaktantov produktov]** – vektor, ktorý má rozmer **1x 3**, kde prvý prvok vektora je počet reakcií (maximálny počet reakcií môže byť tri), druhý prvok je počet reaktantov (maximálny počet reaktantov je päť) a tretí prvok vektora je počet produktov.

Pre modelový príklad:

*Počet [reakcií reaktantov produktov]*

*[2 1 2]*

**Vstupné – riadiace veličiny**  $\text{ano-1 nie-0 } [q \text{ } q_c \text{ } T_v \text{ } T_{vc} \text{ } c_v]$  – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 5$  a nadobúda hodnoty  $0$  a  $1$ . Riadiace veličiny pre daný systém môžu byť objemový prietok reakčnej zmesi, objemový prietok chladiaceho média, vstupná teplota reakčnej zmesi, vstupná teplota chladiaceho média a vektor koncentrácií jednotlivých zložiek reakčnej zmesi. Ak  $i$ -ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude riadiaca, prvok vektora na  $i$ -tom mieste vektora bude mať hodnotu  $1$ . V prípade, že  $j$ -ta vstupná veličina nebude riadiaca, prvok vektora na  $j$ -tom mieste nadobudne hodnotu  $0$ .

Pre modelový príklad:

$$\text{Vstupné riadiace veličiny } \text{ano-1 nie-0 } [q \text{ } q_c \text{ } T_v \text{ } T_{vc} \text{ } c_v] \quad [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

**Poruchové veličiny**  $\text{ano-1 nie-0 } [q \text{ } q_c \text{ } T_v \text{ } T_{vc} \text{ } c_v]$  – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 5$  a nadobúda hodnoty  $0$  a  $1$ . Poruchové veličiny pre daný systém môžu byť objemový prietok reakčnej zmesi, objemový prietok chladiaceho média, vstupná teplota reakčnej zmesi, vstupná teplota chladiaceho média a vektor koncentrácií jednotlivých zložiek reakčnej zmesi. Ak  $i$ -ta vstupná veličina (voľba závisí od užívateľa – prípadne zadania) bude poruchová, prvok vektora na  $i$ -tom mieste vektora bude mať hodnotu  $1$ . V prípade, že  $j$ -ta vstupná veličina nebude poruchová, prvok vektora na  $j$ -tom mieste nadobudne hodnotu  $0$ .

Pre modelový príklad:

$$\text{Poruchové veličiny } \text{ano-1 nie-0 } [q \text{ } q_c \text{ } T_v \text{ } T_{vc} \text{ } c_v] \quad [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

**Matica stechiometrických koeficientov** – matica, ktorá má rozmer  $n \times m$ , kde  $n$  je počet reakcií a  $m$  je súčet reaktantov a produktov. Ak v  $i$ -tej reakcii reaguje  $j$ -ta zložka reakčnej zmesi, tak prvok matice na  $i$ -tom riadku v  $j$ -tom stĺpci nadobudne hodnotu stechiometrického koeficienta, ktorý vystupuje pred danou zložkou reakčnej zmesi v danej reakcii.

Pre modelový príklad:

$$\text{Matica stechiometrických koeficientov} \quad [-1 \ 1 \ 0; -2 \ 0 \ 1]$$

**Vektor vstupných koncentrácií** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times m$ , kde  $m$  je súčet reaktantov a produktov. Prvky vektora sú vstupné koncentrácie jednotlivých zložiek reakčnej zmesi, pričom vstupná koncentrácia  $i$ -tej zložky reakčnej zmesi je  $i$ -tým prvkom vektora. V prípade, že niektoré vstupné koncentrácie majú nulovú hodnotu, treba zadať za daný prvok do vektora  $0$ .

Pre modelový príklad:

$$\text{Vektor vstupných koncentrácií} \quad [4.22 \ 0 \ 0]$$

**Vstupné prietoky [reakčná zmes chladiace médium]** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 2$ , pričom prvý prvok vektora je objemový prietok reakčnej zmesi a druhý prvok vektora je objemový prietok chladiaceho média.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vstupné prietoky [reakčná zmes chladiace médium]} \quad [0.015 \ 0.004]$$

**Vstupné teploty [reakčná zmes chladiace médium]** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 2$ , pričom prvý prvok vektora je teplota reakčnej zmesi a druhý prvok vektora je teplota chladiaceho média.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vektor teploty [reakčná zmes chladiace médium]} \quad [333 \ 298]$$

**Vektor rýchlostných konštánt** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet reakcií.

Prvky vektora sú rýchlostné konštanty daných reakcií, pričom rýchlostná konštanta  $i$ -tej reakcie je  $i$ -tým prvkom daného vektora.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vektor rýchlostných konštánt} \quad [1.55e11 \ 4.55e25]$$

**Vektor reakčných energií** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet reakcií. Prvky vektora sú reakčné energie príslušných reakcií, pričom reakčná energia pre  $i$ -tu reakciu je  $i$ -tým prvkom daného vektora. Hodnota reakčnej energie danej reakcie nie je podelená univerzálnou plynovou konštantou  $R$ .

Pre modelový príklad:

$$\text{Vektor reakčných energií} \quad [9850*8.314 \ 22019*8.314]$$

**Vektor reakčných entalpií** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times n$ , kde  $n$  je počet reakcií. Prvky vektora sú reakčné entalpie príslušných reakcií, pričom reakčná entalpia pre  $i$ -tu reakciu je  $i$ -tým prvkom daného vektora.

Pre modelový príklad:

$$\text{Vektor reakčných entalpie} \quad [-8.6e4 \ -1.82e4]$$

**Konštanty [hustota zmesi hustota média cp zmesi cp média]** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 4$ , pričom prvý prvok vektora je hustota reakčnej zmesi, druhý prvok je hustota chladiaceho média, tretí prvok je špecifická tepelná kapacita reakčnej zmesi a štvrtý prvok je špecifická tepelná kapacita chladiaceho média.

Pre modelový príklad:

$$\text{Konštanty [hustota zmesi hustota média cp zmesi cp média]} \\ [1020 \ 998 \ 4.02 \ 4.182]$$

**Konštanty [V reaktora V chladiča A-plocha k-prestupu tepla]** – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times 4$ , pričom prvý prvok vektora je objem reaktora, druhý prvok je objem plášťa reaktora, tretí prvok je teplovýmenná plocha reaktora a štvrtý prvok je úhrnný koeficient prechodu tepla.

Pre modelový príklad:

$$\text{Konštanty [V reaktora V chladiča A-plocha k-prestupu tepla]} \quad [0.23 \ 0.21 \ 1.51 \ 42.8]$$

**Vektor sledovaných veličín 1-áno 0-nie  $[c_i \dots c_n \ T \ T_c]$**  – vektor, ktorý má rozmer  $1 \times (m+2)$ , kde  $m$  je súčet reaktantov a produktov. Ak má byť výstupná, sledovaná veličina, t.j. koncentrácia  $i$ -tej zložky reakčnej zmesi vykreslená, tak  $i$  prvok vektora nadobudne hodnotu 1, v opačnom prípade nadobudne hodnotu 0. Ak má byť výstupná veličina teplota reakčnej zmesi, tak  $m+1$  prvok vektora nadobudne hodnotu 1, v opačnom prípade nadobudne hodnotu 0. To isté platí aj pre teplotu chladiaceho média, iba s tým rozdielom, že ide o prvok  $m+2$ .

Pre modelový príklad:

$$\text{Vektor sledovaných veličín 1-áno 0-nie } [c_i \dots c_n \ T \ T_c] \quad [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Správne vyplnený formulár pre uvažovaný modelový príklad, t.j. systém prietokový chemický reaktor je na obr. 5.5 a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMPCHR\_demo*

### **Ponukový panel**

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli, t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

#### **5.1.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom**

Simulinkový blok prietokový chemický reaktor využíva nasledovné funkcie:

- *reaktor1*                      *reaktor2*
- *reaktor3*                      *reaktor4*
- *reaktor\_un*

**Block Parameters: Prietokový chemický reaktor**

PRIETOKOVY CHEMICKY REAKTOR (mask)

Prietokový chemický reaktor - nelineárny model  
Platný pre systém v ktorom prebiehajú max. 3 chemické reakcie a kde počet reaktantov je maximálne 5. Blok sa nedá použiť pre postupné reakcie.

Parameters

Počet [reakcií reaktantov produktov]  
[2 1 2]

Vstupné riadiace veličiny ano-1 nie-0 [q qch Tv Tvch cv]  
[0 1 0 0 0]

Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [q qch Tv Tvch cv]  
[0 0 0 0 0]

Matica stechiometrických koeficientov  
[-1 1 0;-1 0 1]

Vektor vstupných koncentrácií  
[4.22 0 0]

Vstupné prietoky [reakčná zmes chladiace médium]  
[0.015 0.004]

Vstupné teploty [reakčná zmes chladiace médium]  
[333 298]

Vektor rýchlostných konštánt  
[1.55e11 4.55e25]

Vektor reakčných energií  
[9850\*8.314 22019\*8.314]

Vektor reakčných entalpií  
[-8.6e4 -1.82e4]

Konštanty [hustota zmesi hustota média cp zmesi cp média]  
[1020 998 4.02 4.182]

Konštanty [V reaktora V chladiča A-plocha k-prechodu tepla]  
[0.23 0.21 1.51 42.8]

Vektor sledovaných veličín 1-ano 0-nie [ci ... cn T Tch]  
[1 0 1 0 1]

OK Cancel Help Apply

Obr. 5. 5 Správne vyplnený formulár pre modelový príklad

*reaktor1* – funkcia, ktorá generuje na základe zadaných vstupných parametrov vektor derivácií zmien koncentrácií *i-tych* zložiek reakčnej zmesi, teploty reakčnej zmesi a teploty chladiaceho média od času a transponuje daný vektor do výstupnej premennej



F. Funkciu možno využiť na riešenie jednoduchých reakcií. Funkcia je používaná vo funkcii *reaktor2* a v s-funcii *reaktor un*.

*reaktor2* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov, využitím funkcie *fsolve* počíta hodnoty koncentrácií *i*-tych zložiek reakčnej zmesi, teploty reakčnej zmesi a teploty chladiaceho média v ustálenom – rovnovážnom stave. Funkcia je používaná v s-funkcii *reaktor.un*.

*reaktor3* – funkcia, ktorá na základe zadaných vstupných parametrov vytvorí vektor výstupných parametrov tak, že určí ktoré sú riadiace, resp. poruchové a priradí im príslušné číselné hodnoty. Funkcia je používaná v s-funkcii *reaktor.un*.

*reaktor4* – funkcia, ktorá vypočíta maticu *C* – maticu výstupu. Funkcia je priamo definovaná v maske bloku a je používaná v s-funkcii *reaktor.un*.

*reaktor\_un* – s-funkcia vytvorená pre simulinkový blok prietokový chemický reaktor, ktorá je zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku daného systému v prostredí MATLAB. Využíva funkcie:

- reaktor1 reaktor2
- reaktor4 reaktor3 – nepriamo

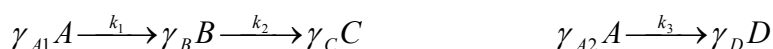
Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom *CD* v adresári *PDF\Reaktor\Prietokový\_reaktor*, ktoré obsahujú ich podrobnejší opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

## 5.2 PCHR pre postupné reakcie – nelineárny model

### 5.2.1 Teoretická časť

Pri odvádzaní dynamického matematického modelu budeme uvažovať tie isté zjednodušujúce predpoklady ako v časti 5.1 *Prietokový chemický reaktor – nelineárny model*. Reaktor je takisto reprezentovaný obrázkom (obr. 5.1).

PCHR pre postupné reakcie – nelineárny model je systém, v ktorom prebiehajú tri reakcie nasledovného typu



V tomto prípade je daný systém opísaný 4 rovnicami materiállovej bilancie v tvare

$$qc_{vA}(t) - (k_1(t)c_A^{\gamma_{A1}}(t) + k_1(t)c_A^{\gamma_{A2}}(t)).V = qc_A(t) + \frac{d[V.c_A(t)]}{dt} \quad (5.7)$$

$$qc_{vB}(t) + (k_1(t)c_A^{\gamma_{A1}}(t) - k_2(t)c_B^{\gamma_B}(t)).V = qc_B(t) + \frac{d[V.c_B(t)]}{dt} \quad (5.8)$$

$$qc_{vC}(t) + k_2(t)c_B^{\gamma_B}(t).V = qc_C(t) + \frac{d[V.c_C(t)]}{dt} \quad (5.9)$$

$$qc_{vD}(t) + k_3(t)c_A^{\gamma_{A2}}(t).V = qc_D(t) + \frac{d[V.c_D(t)]}{dt} \quad (5.10)$$

rovnice entalpickej bilancie reakčnej zmesi

$$q\rho c_p \vartheta_v(t) = q\rho c_p \vartheta(t) + Ak[\vartheta(t) - \vartheta_c(t)] + V \sum_{j=1}^3 \xi_{jv}(t).(\Delta_r H)_j + \frac{d[V\rho c_p \vartheta(t)]}{dt} \quad (5.11)$$

a rovnicou entalpickej bilancie chladiaceho média

$$Ak[\vartheta(t) - \vartheta_c(t)] + \dot{Q}_c = \frac{d[m_c.c_p \vartheta_c(t)]}{dt} \quad (5.12)$$

so začiatocnými podmienkami  $c_i(0) = c_i^s$  pre  $i = 1, \dots, 4$   
 $\vartheta(0) = \vartheta^s$   $\vartheta_c(0) = \vartheta_c^s$

Vstupnými veličinami sú vstupné koncentrácie jednotlivých zložiek –  $c_{vi}(t)$ , teplota reakčnej zmesi na vstupe do reaktora  $\vartheta_v(t)$  a tepelný tok odvádzaný chladiacim médiom  $\dot{Q}_c$ . Výstupnými veličinami sú koncentrácie jednotlivých zložiek  $c_i(t)$ , teplota reakčnej zmesi  $\vartheta(t)$  a chladiaceho média  $\vartheta_c(t)$ .

Prietokový chemický reaktor bude v rovnovážnom stave, ak akumulčné členy z rovníc (5.7-5.12) budú rovné nule. Potom matematický model rovnovážneho stavu vyjadruje rovnice materiállovej bilancie v tvare

$$q^s c_{vA}^s - (k_1^s c_A^{s\gamma_{A1}} + k_1^s c_A^{s\gamma_{A2}}).V = q^s c_A^s \quad (5.13)$$

$$q^s c_{vB}^s + (k_1^s c_A^{s\gamma_{A1}} - k_2^s c_B^{s\gamma_B}).V = q^s c_B^s \quad (5.14)$$

$$q^s c_{vC}^s + k_2^s c_B^{s\gamma_B}.V = q^s c_C^s \quad (5.15)$$

$$q^s c_{vD}^s + k_3^s c_A^{s\gamma_{A2}}.V = q^s c_D^s \quad (5.16)$$

rovnica entalpickej bilancie reakčnej zmesi

$$q^s \rho c_p \vartheta_v^s = q^s \rho c_p \vartheta^s + Ak[\vartheta^s - \vartheta_c^s] + V \sum_{j=1}^3 \xi_{vj}^s (\Delta_r H)_j \quad (5.17)$$

a rovnica entalpickej bilancie chladiaceho média

$$Ak[\vartheta^s - \vartheta_c^s] + \dot{Q}_c^s = 0 \quad (5.18)$$

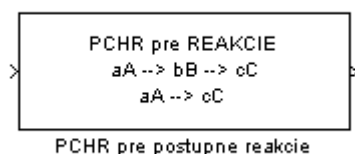
Riešením týchto rovníc získame pre zadané vstupné parametre teplotu chladenia v plášti  $\vartheta_c^s$ , hodnoty teploty reakčnej zmesi  $\vartheta^s$  a koncentrácie jednotlivých zložiek  $c_i^s$  v rovnovážnom stave. Tieto hodnoty sú začiatočnými podmienkami pre riešenie rovníc (5.7-5.12). Zároveň sú pracovným bodom, v okolí ktorého môžeme linearizovať daný nelineárny matematický model.

### 5.2.2 PCHR pre postupné reakcie – použitie bloku

**PCHR pre postupné reakcie** je simulinkový blok, ktorý je súčasťou toolboxu MODELTOOL (obr. 5.6). Slúži na modelovanie systému prietokový chemický reaktor s reakciami typu



Blok je vytvorený tak, aby užívateľovi poskytoval čo najmenšie obmedzenia pri tvorbe rôznych variantov úloh, ktoré môžu nastať pri modelovaní daného procesu.



Obr. 5.6 **Blok – PCHR pre postupné reakcie**

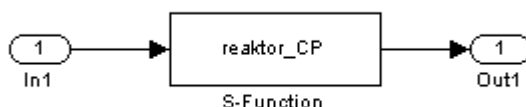
Táto časť práce je venovaná opisu daného bloku, pričom je členená do nasledujúcich častí:

- opis bloku
- vyplnenie formulára daného bloku
- opis funkcií využívaných daným blokom

### 5.2.2.1 Opis bloku

Simulinkový blok PCHR pre postupne reakcie je subsystém, ktorý má jeden vstup a jeden výstup. Vstupom do bloku (systému) je vektor riadiacich a poruchových veličín, t.j. objemový prietok reakčnej zmesi, vstupná teplota reakčnej zmesi, tepelný tok prijatý chladiacim médiom a vektor vstupných koncentrácií jednotlivých zložiek. Voľba riadiacich veličín závisí od užívateľa a forma zadávania je vysvetlená v časti *vyplnenie formulára daného bloku*. Výstupom z bloku (systému) sú sledované – merané veličiny, čo pre daný systém znamená koncentrácie jednotlivých zložiek v reakčnej zmesi, teplotu reakčnej zmesi a teplotu chladiaceho média. Ako zadať premenné tak, aby bola zobrazená požadovaná výstupná veličina je tiež popísané v časti *vyplnenie formulára daného bloku*.

Ako bolo zmienené, blok PCHR pre postupne reakcie je subsystém, ktorý v sebe zahŕňa s-funkcie *reaktor\_CP* (obr. 5.7), ktoré sú zápisom sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc opisujúcich dynamiku prietokového chemického reaktora s dokonalým miešaním a chladením pre postupné reakcie v prostredí MATLAB.



obr. 5.7 *Odmaskovaný subsystém PCHR pre postupné reakcie*

Viacej o s-funkciách a funkciách používaných daným blokom je obsiahnuté v časti *opis jednotlivých funkcií*.

### 5.2.2.2 Vyplnenie formulára daného bloku

Formulár bloku Prietokový chemický reaktor má tvar, ktorý znázorňuje obrázok obr. 5.8. Je tvorený z nasledujúcich častí

- *Názov masky bloku – PCHR PRE POSTUPNE REAKCIE*
- *Základný opis masky bloku – Prietokový chemický reaktor pre postupne reakcie – nelineárny model*
- *Formulár - Parameters*
- *Ponukový panel – možnosti: OK, ...*

**Block Parameters: PCHR pre postupne reakcie**

PCHR PRE POSTUPNE REAKCIE (mask)

Prietokový chemický reaktor pre postupne reakcie- nelineárny model.  
 Vytvorený pre systém v ktorom prebiehajú reakcie typu:  
 $aA \rightarrow bB \rightarrow cC$        $aA \rightarrow dD$   
 Systém je navrhnutý na základe matematického opisu výroby  
 cyklopentadiolu.

Parameters

Vstupné riadiace veličiny ano-1 nie-0 [q Tv Qc cv]

Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [q Tv Qc cv]

Matica stechiometrických koeficientov

Vektor vstupných koncentrácií

Parametre [q Tv mc Tvc]

Vektor rýchlostných konštánt [kr1 kr2 kr3]

Vektor reakčných energií [E1 E2 E3]

Vektor reakčných entalpií

Teplný tok odovzdaný chladiacemu médiu Qc

Konštanty [hustota zmesi cp zmesi cp chladiwa]

Konštanty [V reaktora A-plocha k-prechodu tepla]

Vektor sledovaných veličín ano-1 nie-0 [cA ... cD T Tc]

OK Cancel Help Apply

obr. 5.8 Formulár bloku PCHR pre postupné reakcie

**Názov masky bloku**

Zahrňa meno bloku a pre daný blok má tvar *PCHR PRE POSTUPNE REAKCIE*.

**Základný opis masky bloku**

Obsahuje základné informácie o bloku a jeho tvar závisí od tvorcu. V tejto časti môžu byť uvedené rok vytvorenia, verzia, meno osôb – organizácie, ktorá daný blok vytvorila atď..

**Formulár – Parameters**

Je najhlavnejšia časť masky bloku. Pomocou neho sú zadávané jednotlivé parametre, ktoré sú potrebné pre správnu činnosť daného bloku. Ak sa zadávaný parameter skladá z viac ako jedného čísla, treba ho zadať vo vektorovom tvare, ktorý sa zapisuje v hranatých zátvorkách.

Formulár – Parameters bloku PCHR pre postupné reakcie (obr. 5.8) sa skladá z nasledujúcich položiek:

- *Vstupné riadiace veličiny*
- *Poruchové veličiny*
- *Matica stechiometrických koeficientov*
- *Vektor vstupných koncentrácií*
- *Parametre  $[q \ m_c \ T_v \ T_{vc}]$*
- *Vektor rýchlostných konštánt*
- *Vektor reakčných energií*
- *Vektor reakčných entalpií*
- *Teplo odovzdané chladiacemu médiu  $Q_c$*
- *Konštanty  $[hustota \ zmesi \ c_p \ zmesi \ c_p \ média]$*
- *Konštanty  $[V \ reaktora \ A \text{-} plocha \ k \text{-} prestupu \ tepla]$*
- *Vektor sledovaných veličín  $[c_A \ .. \ c_D \ T \ T_c]$*

**Poznámka**

Pri vyplňaní položiek bloku PCHR pre postupné reakcie, ktoré majú rovnaký tvar ako položky bloku Prietokový chemický reaktor platia tie isté pravidlá, (viď. podkapitola 5.1.2.2 *Vyplnenie formulára daného bloku*). Rozdiel je iba v dĺžke vektorov a vynechaní niektorých veličín.

V tejto časti nie je uvádzaný žiadny modelový príklad. Vzor ako vyplniť daný blok pre systém v ktorom prebiehajú reakcie



môžete vidieť na obr. 5.9.

Pre položky, ktoré sa nenachádzajú vo formulári bloku Prietokový chemický reaktor platí:

**Parametre [q m<sub>c</sub> T<sub>v</sub> T<sub>vc</sub>]** – vektor, ktorý má rozmer **1 x 4**, pričom prvý prvok vektora je objemový prietok reakčnej zmesi, druhý prvok vektora je hmotnosť chladiaceho média, tretí prvok je vstupná teplota reakčnej zmesi a štvrtý prvok vektora je vstupná teplota chladiaceho média. Ak vstupná teplota chladiaceho média nie je zadaná treba zadať hodnotu 0.

**Teplo odovzdané chladiacemu médiu** – číslo, ktoré je zadané, pričom teplo odovzdané chladiacemu médiu má znamienko mínus a teplo prijaté reakčnou zmesou má znamienko plus.

Správne vyplnený formulár pre uvažovaný modelový príklad, t.j. PCHR pre postupne reakcie je na obr. 5.9 a demo verzia k danému bloku sa nachádza v toolboxe MODELTOOL. Príkaz na spustenie demo verzie má tvar *MMPCHRK demo*

### *Ponukový panel*

Ak je formulár vyplnený podľa predchádzajúceho návodu, potom môžeme začať pracovať s daným blokom a to tak, že zadáme jednu z možností nachádzajúcich sa v ponukovom paneli, t.j. klikneme na jedno z tlačidiel OK, Cancel atď.

### 5.2.2.3 Opis funkcií využívaných daným blokom

Simulinkový blok prietokový chemický reaktor využíva nasledovné funkcie:

- *reaktor1\_CP*
- *reaktor3\_CP*
- *reaktor CP*

**Block Parameters: PCHR pre postupne reakcie**

PCHR PRE POSTUPNE REAKCIE (mask)  
 Prietokový chemický reaktor pre postupne reakcie- nelineárny model.  
 Vytvorený pre systém v ktorom prebiehajú reakcie typu:  
 $aA \rightarrow bB \rightarrow cC$        $aA \rightarrow dD$   
 Systém je navrhnutý na základe matematického opisu výroby  
 cyklopentadiolu.

Parameters

Vstupné riadiace veličiny ano-1 nie-0 [q Tv Qc cv]

Poruchové veličiny ano-1 nie-0 [q Tv Qc cv]

Matica stechiometrických koeficientov

Vektor vstupných koncentrií

Parametre [q Tv mc Tvc]

Vektor rýchlostných konštánt [kr1 kr2 kr3]

Vektor reakčných energií [E1 E2 E3]

Vektor reakčných entalpií

Tepelný tok odovzdaný chladiacemu médiu Qc

Konštanty [hustota zmesi cp zmesi cp chladiwa]

Konštanty [V reaktora A-plocha k-prechodu tepla]

Vektor sledovaných veličín ano-1 nie-0 [cA ... cD T Tc]

OK Cancel Help Apply

Obr. 5. 9 *Správne vyplnený formulár pre modelový príklad*

Ak sa chcete dozvedieť o činnosti jednotlivých funkcií niečo viac, tak opis, akú činnosť vykonávajú nasledovné funkcie nájdete v podkapitole 5.1.2.3 *Opis funkcií využívaných daným blokom*, pričom čísla prislúchajúcich funkcií sú rovnaké. Funkcie sú založené na tom istom princípe, len majú iný zdrojový kód, čo súvisí s rozdielnymi formuláciami daných úloh.



Zdrojové kódy jednotlivých funkcií sú umiestnené v podobe pdf súborov na priloženom CD v adresári *PDF\Reaktor\PCHR postupné*, ktoré obsahujú ich podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov, premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

### 5.3 Analýzy stability rovnovážnych stavov prietokových chemických reaktorov s miešaním

Je činnosť, ktorej hlavnou úlohou je posúdiť, či nami vypočítaný rovnovážny stav je stabilný. Stabilný rovnovážny stav je vtedy, ak smernica priamky  $Q_{od}^s = f(t)$  je väčšia ako smernica dotyčnice ku krivke  $Q_{od}^s = f(t)$ . Pre dané systémy boli vytvorené dve funkcie, pomocou ktorých môžeme získať rovnovážne grafy, t.j. závislosti generovaného tepla chemickou reakciou resp. odvedeného tepla z chemickej reakcie od meniacej sa teploty reakčnej zmesi.

#### 5.3.1 Teoretická časť

Pri určovaní stability rovnovážnych stavov vychádzame z entalpických bilancií reakčnej zmesi v rovnovážnom stave. Pre prietokový chemický reaktor s dokonalým miešaním a chladením má rovnica tvar

$$q^s \rho c p \vartheta_v^s = q^s \rho c p \vartheta^s + Ak [\vartheta^s - \vartheta_c^s] + V \sum_{j=1}^m \xi_{vj}^s \cdot (\Delta_r H)_j \quad (5.19)$$

úpravou rovnice (5.19) dostaneme rovnicu (5.20), kde pravá strana rovnice je tepelný tok odvedený z reaktora a ľavá strana rovnice predstavuje tepelný tok generovaný chemickými reakciami.

$$\sum_{j=1}^m \xi_{vj}^s \cdot (\Delta_r H)_j = (-q^s \rho c p \vartheta_v^s - Ak \vartheta_c^s) + (q^s \rho c p + Ak) \vartheta^s \quad (5.20)$$

#### 5.3.2 Funkcie vytvorené pre analýzu stability rovnovážnych stavov chemických reaktorov – použitie

Prvá funkcia bola vytvorená na analýzu stability rovnovážnych stavov pre univerzálny reaktor a volá sa reaktor\_SRS. Druhá funkcia bola vytvorená pre konkrétny prípad a to pre

chemický reaktor na výrobu cyklopentadiolu, čo je systém s postupnými chemickými reakciami a volá sa reaktorCP\_SRS.

Táto časť práce je venovaná opisu a použitiu daných funkcií.

### 5.3.2.1 Funkcia reaktor\_SRS

#### *Opis funkcie*

Má rovnaké obmedzenia ako daný systém a možno ju použiť do určitej teploty, ktorú si určí funkcia sama. Vzhľadom na to, že ide o iteračný výpočet, čas výpočtu je dosť dlhý (cca 1 minúty) a závisí od výkonu výpočtovej techniky.

Funkcia má tvar:

$$Q = \text{reaktor\_SRS}(a, rp, pp, m, cv, q, qc, Tv, Tvc, kr, e, h, ro, roc, cp, cpc, v, vc, A, k, Ts1, krok)$$

Má 22 vstupných premenných a 2 výstupy – premennú Q a graf. Premenná Q je matica, ktorá má rozmer  $3 \times n$ , kde  $n$  je dĺžka teplotného intervalu s daným zvoleným krokom. Prvky prvého riadku matice predstavujú teploty reakčnej zmesi, pri ktorých sú počítané jednotlivé tepelné toky, prvky druhého riadku predstavujú tepelné toky generované chemickou reakciou a prvky tretieho riadku predstavujú tepelné toky odvedeného tepla z reaktora. Vstupné premenné sú zadané parametre pre daný systém. Význam jednotlivých vstupných premenných je vysvetlený v časti zoznam použitých symbolov.

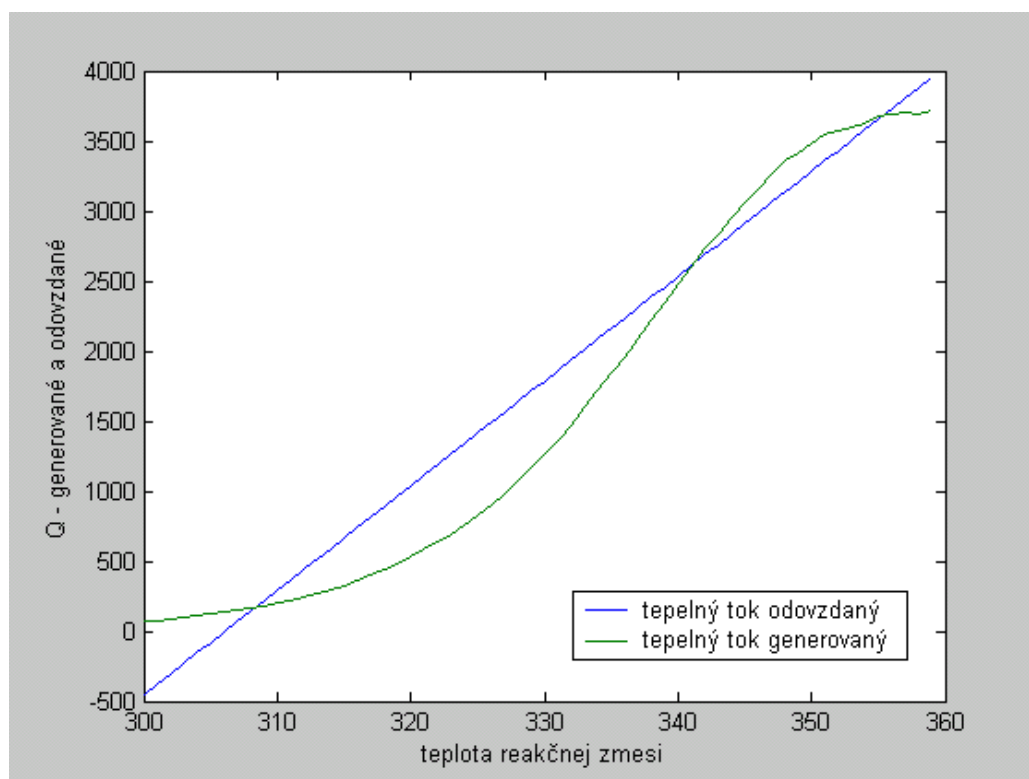
#### *Použitie funkcie*

Po zadefinovaní vstupných parametrov, zapísaní tvaru funkcie (užívateľ môže použiť pri tejto činnosti pracovné okno, alebo m-file MATLABu) a spustení daného príkazu, sa v pracovnom okne MATLABu zobrazí hlásenie

```
Optimization terminated successfully:
First-order optimality is less than options.TolFun.
PREBIEHA VYPOCET
```

Po ukončení výpočtu sa zobrazí graf závislostí a vypíše sa matica Q (výpis závisí od užívateľa, ak nechce vypísať maticu Q, stačí napísať bodkočiarku za tvar funkcie).

Pre modelový príklad (zadanie vid' podkapitola 5.1.2.2 *Vyplnenie formulára daného bloku*) a zvolenú dolnú hranicu teplotného intervalu  $\vartheta_1^s = 300$  °C má graf tvar znázornený na obr. 5.10.

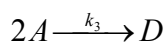
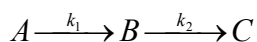
Obr. 5.10 Graf závislostí  $Q_g = f(T)$  a  $Q_d = f(T)$ 

Zdrojový kód funkcie je umiestnený v podobe pdf súboru na priloženom *CD* v adresári *PDF\Reaktor\Analýza\_SRS*, ktorý obsahuje jej podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov, premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

### 5.3.2.2 Funkcia reaktorCP\_SRS

#### Opis funkcie

ReaktorCP\_SRS je funkcia, ktorá bola vytvorená pre konkrétny prípad a to pre chemický reaktor na výrobu cyklopentadiolu, v ktorom prebiehajú reakcie



pričom materiálové, resp. entalpické bilancie majú podobný tvar ako bilancie pre PCHR pre postupné reakcie, t.j. rovnice 5.13-5.18 (rozdiel je len v stechiometrických koeficientoch).

Funkcia má tvar:

$$Q = \text{reaktorCP\_SRS}(cv, q, mc, Tv, kr, e, h, ro, cp, cpc, v, A, k, Qc, Ts1, Ts2, krok)$$

Funkcia má 16 vstupov a 2 výstupy – premennú  $Q$  a graf. Premenná  $Q$  je matica, ktorá má rozmer  $3 \times n$ , kde  $n$  je dĺžka teplotného intervalu s daným zvoleným krokom. Prvky prvého riadku matice predstavujú teploty reakčnej zmesi, pri ktorých sú počítané jednotlivé tepelné toky, prvky druhého riadku predstavujú tepelné toky generované chemickou reakciou a prvky tretieho riadku predstavujú tepelné toky odvedeného tepla z reaktora. Vstupné premenné sú zadané parametre pre daný systém. Význam jednotlivých vstupných premenných je vysvetlený v časti zoznam použitých symbolov.

### Použitie funkcie

Použitie funkcie reaktorCP\_SRS je rovnaké ako použitie funkcie reaktor\_SRS. Rozdiel je len v tom, že pri funkcii reaktorCP\_SRS je potrebná voľba spodnej aj hornej hranice teplotného intervalu, pričom u funkcie reaktor\_SRS sa zadáva iba spodná hranica teplotného intervalu.

Zdrojový kód funkcie je umiestnený v podobe pdf súboru na priloženom CD v adresári PDF\Reaktor\Analýza\_SRS, ktorý obsahuje jej podrobný opis a zahŕňajú aj definície parametrov premenných, s ktorými dané funkcie pracujú.

## 5.4 Zoznam použitých symbolov

### • VELIČINY

Symbol	Názov veličiny	Jednotka SI
$A$	- teplovýmenná plocha	$\text{m}^2$
$cp$	- špecifická tepelná kapacita	$\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$c$	- koncentrácia	$\text{mol.m}^{-3}$
$E$	- aktivačná energia	$\text{J.kg}^{-1}$
$\Delta_r H$	- reakčná entalpia chemickej reakcie	$\text{J.mol}^{-1}$
$k$	- úhrnný koeficient prechodu tepla	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
$k_{ri}$	- rýchlostná konštanta chemickej $i$ -tej reakcie	
$m_c$	- hmotnosť chladiaceho média	$\text{kg}$
$m$	- matica chemických reakcií a zložiek zmesi	bezrozmerná
$pp, p$	- počet produktov	bezrozmerná
$rp, r$	- počet reaktantov	bezrozmerná

$q$	- objemový prietok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$V$	- objem reaktora	$\text{m}^3$
$V_c$	- objem plášťa reaktora	$\text{m}^3$
$\vartheta$	- teplota	K
$\gamma_{ij}$	- stechiometrický koeficient $i$ -tej zložky v $j$ -tej reakcii	bezrozmerná
$\xi_{vj}$	- rýchlosť chemickej reakcie na jednotku objemu reagujúcej zmesi pre $j$ -tu reakciu	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

• DOLNÝ INDEX

*Symbol* - *Názov veličiny*

---

$A, B, C, D$  - zložky reakčnej zmesi

$i, j$  -  $i$ -ta zložka v  $j$ -tej chemickej reakcii

$i$  - poradové číslo

$i$  -  $i$ -ta zložka reakčnej zmesi

$j$  - poradové číslo

$n$  - poradové číslo

$c$  - chladiace médium

$v$  - vstupná veličina

• HORNÝ INDEX

*Symbol* - *Názov veličiny*

---

$s$  - ustálený – rovnovážny stav

## ZÁVER

Úlohou tejto práce bolo vytvoriť knižnicu matematických modelov chemicko-technologických procesov s využitím pracovného prostredia MATLAB. Prvým krokom bolo vytvorenie jednotlivých funkcií a s-funkcií. Druhým krokom bolo vytvorenie jednoduchých simulačných schém v prostredí Simulink, na ktorých sa najprv test správnej činnosti vytvorených s-funkcií. Tretím krokom bolo vytvorenie subsystémov blokov vybraných chemicko-technologických procesov. Posledným krokom bolo otestovanie činnosti jednotlivých blokov a napísanie užívateľskej príručky.

Testovanie činnosti sa robilo na určitých modelových príkladoch, ktoré boli tvorené zadaniami z dynamiky procesov.

Výsledkom tejto práce je vytvorenie knižnice, ktorá by mala pomôcť pri výučbe na katedre informatizácie a riadenia procesov tým, že prvé hodiny seminárnych cvičení predmetov špecializácie nemusia byť venované tvorbe s-funkcií a linearizovaných stavových opisov. Ďalšie využitie by mohlo spočívať v príprave zadaní na seminárne cvičenia, kde by sa bloky jednotlivých procesov mohli využiť ako modely pre testovanie algoritmov riadenia.

V budúcnosti by bolo potrebné otestovať vytvorené bloky viacerými modelovými príkladmi, prípadne doplniť knižnicu o ďalšie bloky, aby vznikla knižnica, ktorá bude mať plnohodnotné pedagogické i výskumné využitie.

Knižnica matematických modelov je v elektronickej podobe vo forme toolboxu MODELTOOL. Je uložená na priloženom CD v komprimovanom súbore *modeltool.zip*. Priložené CD okrem spomínaného toolboxu ďalej obsahuje súbor *manual.pdf*, ktorý je užívateľskou príručkou a adresár *PDF*, ktorý obsahuje pdf súbory so zdrojovými kódmi použitých funkcií.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Bakošová, M., Fikar, M., Čirka, Ľ.: *Základy automatizácie Laboratórne cvičenia zo základov automatizácie*. STU Bratislava 2003
- [2] MÉSZÁROS, A. et al.: *Základy automatizácie*. Bratislava : STU, 1997. 174s.
- [3] Chmúrny, D. a kol.: *Modelovanie a riadenie chemickotechnologických procesov a systémov*. Alfa, Bratislava 1985.
- [4] BAFRNEC, M. a kol.: *Chemické inžinierstvo I*. Malé centrum, Bratislava 1999. 440s
- [5] Bartko, R. – Miller, M.: *MATLAB I. algoritmizácia a riešenie úloh*. Digital Graphic, Trenčín, 2004. 288s.
- [6] DOJČANSKÝ, J. – LONGAUER, J.: *Chemické inžinierstvo II*. Malé centrum, Bratislava 2000. 392s
- [7] Dušek, F.: *MATLAB a Simulink úvod do používání*. Univerzita Pardubice, Pardubice 2002. 158s.
- [8] Ingham, J. a kol.: *Chemical engineering dynamics*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1994.
- [9] KOZÁK, Š.: *MATLAB – Simulink*. Bratislava : STU, 1999. 141s.
- [10] Mikleš, J., Fikar, M.: *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I*. STU, Bratislava 1999.
- [11] Ogunnaike, B. A., Ray, W. H.: *Process dynamics, modeling and control*. Oxford University press, New York 1994.
- [12] *Simulink using simulink version 4*. Mathwork Inc, Natic1999.