

Knihovna modelů technologických procesů

Matlab library of models of technological processes

Bc. Radim Pišan

Diplomová práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radim PIŠAN**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Téma práce: **Knihovna modelů technologických procesů**

Zásady pro vypracování:

1. Vyberte vhodné reprezentativní technologické procesy vyskytující se v průmyslové praxi.
2. Na základě přijatých zjednodušení, odvodte jejich matematické modely.
3. V programovém systému MATLAB/Simulink realizujte knihovnu vybraných modelů technologických procesů s jednoduchým, uživatelsky příjemným způsobem zadávání vstupních údajů.
4. Ošetřete možná nesprávná zadání vstupních údajů a singularity při výpočtu.
5. Vytvořenou knihovnu doplňte o přehlednou a názornou dokumentaci.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. NOSKIEVIČ, P. Modelování a identifikace systémů. 1999. Montanex a.s.: Ostrava.
2. MIKLEŠ, J. – FIKAR, M. Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I. 1999. Vydavateľstvo STU: Bratislava.
3. WELLSTEAD, P.E. Introduction to physical system modelling. 1979. Academic Press Ltd: London.
4. DUŠEK, F. Matlab a simulink – úvod do používání. 2000. Univerzita Pardubice. 146 s. ISBN 80-7194-273-1.
5. Simulink – Model-based and system-based design. Version 5. The MathWorks, 2002.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Gazdoš, Ph.D.**

Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **22. února 2008**

Termín odevzdání diplomové práce: **6. června 2008**

Ve Zlíně dne 22. února 2008

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

V této diplomové práci je představena knihovna modelů technologických procesů, vytvářená v programovém prostředí MATLAB/SIMULINK. Ta využívá bloku s-function (s-funkcí) pro definici dynamiky vybraných procesů. Knihovna je prozatím tvořena bloky zásobníků na kapalinu v různých konfiguracích (kulové, válcové a ve tvaru trychtýře), průtočným výměníkem tepla a průtočným chemickým reaktorem. Knihovna je koncipována jako otevřená a byla k ní udělána podpora ve formě nápovědy.

Klíčová slova:

Modelování, technologické procesy, Matlab/Simulink, knihovna, simulace.

ABSTRACT

This diploma work introduces a library of models of technological processes created in the Matlab/Simulink environment. It uses the s-function block for definition of dynamics of selected processes. So far the library includes blocks of liquid tanks in various configurations (spherical, cylinder and funnel shapes), a stirred heat exchanger, and a continuous stirred tank reactor. The library is conceived as open and it also contains corresponding support in the form of help-files.

Keywords:

Modelling, technological processes, Matlab/Simulink, toolbox, simulation.

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Františku Gazdošovi, Ph.D za odborné rady a připomínky při vedení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, že mi umožnila studium na této škole a za trpělivost, kterou v průběhu studia se mnou měla.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE ŘÍZENÉHO SYSTÉMU	10
1.1 POJEM MODELU A MATEMATICKÉHO MODELU	10
1.2 ZÁKLADNÍ POSTUPY PŘI MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACI	11
2 ODVOZENÍ MODELŮ VYBRANÝCH TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ	14
2.1 VÁLCOVÝ ZÁSOBNÍK NA KAPALINU	14
2.2 DVA VÁLCOVÉ ZÁSOBNÍKY NA KAPALINU	15
2.3 TŘI VÁLCOVÉ ZÁSOBNÍKY	18
2.4 TRYCHTÝŘOVÝ ZÁSOBNÍK NA KAPALINU.....	21
2.5 DVA TRYCHTÝŘOVÉ ZÁSOBNÍKY NA KAPALINU	22
2.6 TŘI TRYCHTÝŘOVÉ ZÁSOBNÍKY	24
2.7 KULOVÝ ZÁSOBNÍK NA KAPALINU	26
2.8 DVA KULOVÉ ZÁSOBNÍKY NA KAPALINU.....	27
2.9 TŘI KULOVÉ ZÁSOBNÍKY NA KAPALINU	29
2.10 PRŮTOČNÝ VÝMĚNÍK TEPLA S PROMÍCHÁVÁNÍM.....	30
2.11 PRŮTOČNÝ CHEMICKÝ REAKTOR	32
3 MATLAB, SIMULINK, S-FUNKCE	36
3.1 MATLAB	36
3.1.1 Výpočetní jádro	36
3.1.2 Grafický subsystém	36
3.1.3 Toolboxy	37
3.2 SIMULINK	37
3.3 S-FUNKCE.....	37
3.3.1 Jak s-funkce pracuje	38
3.3.2 Implementace s-funkce.....	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
4 KNIHOVNA MODELŮ	42
4.1 VYTVOŘENÍ S-FUNKCE DVOU TRYCHTÝŘOVÝCH ZÁSOBNÍKŮ NA KAPALINU	42
4.2 STRUKTURA VYTVOŘENÉHO M-FILU	49
4.3 INSTALACE KNIHOVNY.....	53
4.4 PRÁCE S KNIHOVNOU	55
5 UKÁZKY SIMULACÍ	57

5.1	DVA TRYCHTÝŘOVÉ ZÁSOBNÍKY NA KAPALINU	57
5.2	TŘI VÁLCOVÉ ZÁSOBNÍKY NA KAPALINU	60
5.3	EXPERIMENT NA REÁLNÉM MODELU	63
ZÁVĚR		66
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ		67
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		69
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		70
SEZNAM OBRÁZKŮ		71
SEZNAM TABULEK		73
SEZNAM PŘÍLOH		74

ÚVOD

V posledních letech neuvěřitelně vzrostl výkon dnešních počítačů a ty se prosazují ve všech oblastech lidské činnosti. Díky rychlému a velkému výpočetnímu výkonu se dnes může většina technologických procesů simulovat právě na počítačích. Význam simulace je dnes již téměř nenahraditelný a roste s rizikovostí daného technologického procesu. Šetří náklady, umožňuje poznání kritických stavů, nebo umožňuje provádět takové experimenty, které by nebyly v praxi možné, např. kvůli bezpečnosti.

Aby byla simulace možná, je nutné nejprve nalézt vhodný model. Tím se zabývá modelování a identifikace [7], [8], [11]

V této práci se zabývám matematickým modelováním. Mým úkolem je vybrat vhodné technologické procesy, tyto popsat matematicky, tak aby byla jejich simulace možná. Tento popis je většinou realizován pomocí diferenciální rovnice, nebo soustavy diferenciálních rovnic. Při tomto modelování, mohou nastat stavy, které z matematického hlediska nejsou přípustné např. dělení nulou. Těmto jevům se snažím vyhnout a to vhodným ošetřením.

Jako nástroj pro simulaci daných modelů je zvolen program Matlab [4] a jeho nadstavba Simulink [10]. Simulink představuje velmi intuitivní prostředí, ve kterém se dá snadno zapojit např. regulační obvod. Je zde také možnost tvořit nové modely a to za použití tzv. s-funkcí. Díky tomu můžeme u daných procesů sledovat jejich dynamiku, popřípadě zapojit tyto modely do regulačního obvodu a testovat na nich různé návrhy řídicích algoritmů.

Cílem této práce je vytvoření knihovny obsahující bloky, které budou představovat jednotlivé procesy. Knihovna bude volně k dispozici a k jednotlivým blokům je vytvořena podpora ve formě nápovědy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE ŘÍZENÉHO SYSTÉMU

Nutným předpokladem úspěšného návrhu řízení reálného objektu (přesněji probíhajícího procesu) je představa o jeho statických a dynamických vlastnostech. Samozřejmě, že znalost těchto vlastností může být důležitá i z jiných důvodů, např. při projektování výrob nebo inženýrském výzkumu technologických procesů. Jednou z možností, jak získat představu o vlastnostech daného procesu, je měření statických a dynamických charakteristik na příslušném reálném objektu. Toto měření však často nejsme schopni uskutečnit. Důvody mohou být různé: experiment na reálném objektu může být spojen s rizikem havárie, může vést k znehodnocení nebo snížení produkce, není k dispozici vhodná měřicí technika a mnohé další.[2]

1.1 Pojem modelu a matematického modelu

Jinou možností je mít k dispozici k danému reálnému objektu jako originálu jeho kopii, tj. systém, který bude mít podobné vlastnosti jako originál. Tuto kopii nazveme model daného reálného objektu. Mezi zkoumaným reálným objektem a jeho modelem musí existovat určitá analogie. Model reálného objektu může být opět fyzikální (reálný) nebo abstraktní.

Fyzikálním modelem může být zmenšená kopie původního objektu (původní objekt – laboratorní model) na stejném fyzikálním principu jako původní objekt, zde se využívá tzv. teorie podobnosti. Fyzikální model může být také založen na jiném fyzikálním principu než původní objekt, avšak řídí se podobnými zákony.

Ze třídy abstraktních modelů pro nás bude mít rozhodující význam matematický model reálného objektu. Matematický model je matematická struktura, tedy soubor veličin, odpovídajících reálným fyzikálním veličinám modelovaného reálného systému, svázaných relačními operátory a funkčními vztahy, které odpovídají fyzikálním vazbám mezi veličinami reálného systému. Matematický model je většinou vyjádřen rovnicemi (diferenciálními, diferenčními, algebraickými atd.). Proces tvorby modelů nazýváme modelování. Je to popis vyšetřovaného objektu z kvantitativní i kvalitativní stránky. Matematický model musí vyjadřovat ty stránky původního objektu, které jsou z hlediska studia a zkoumání důležité. Je třeba z něj vyloučit vlastnosti nepodstatné, druhořadého významu, které by učinily model složitějším a analýzu modelu těžkopádnou. Metody

ztotožnění modelu s vyšetřovaným objektem jsou předmětem (cílem) identifikace. Identifikace a modelování jsou tedy procesy, které se vzájemně prolínají.

Jestliže máme k dispozici matematický model nějakého reálného objektu, můžeme experimentování s tímto objektem nahradit experimenty s jeho matematickým modelem. Experiment na matematickém modelu reálného objektu nazýváme simulací. V dnešní době se při simulacích využívají téměř výlučně číslicové počítače (např. PC), proto též hovoříme o číslicové simulaci.

Adekvátnost, resp. shodu matematického modelu s modelovaným objektem je možno zjistit pouze experimentálně.[2]

1.2 Základní postupy při modelování a identifikaci

Existují dva základní (krajní) postupy při modelování a identifikaci reálných objektů. První z nich je analytický postup. Postup vychází z materiálových a energetických bilancí daného zařízení a ze znalostí fyzikálních, chemických popř. biologických dílčích procesů v něm probíhajících a jejich matematického popisu. Využívá také údaje o konstrukci a vlastnostech materiálů příslušného zařízení. Aplikací těchto znalostí získáme analytický (matematický) model daného objektu. Tento model popisuje vnitřní, stavové veličiny modelovaného procesu a jejich vzájemné vazby. Stavové veličiny i parametry modelu mají konkrétní fyzikální význam. Výsledný model je modelem struktury daného objektu. Nazývá se vnitřní (interní) model, častěji však stavový model daného objektu. Tento model pak vystihuje i chování daného objektu. Na tomto místě se musíme zmínit i o míře shody chování modelovaného objektu a jeho modelu, jinak řečeno o přesnosti získaného modelu.

Je zřejmé, že ne všechny dílčí procesy probíhající v modelovaném objektu jsou známé. Ale i procesy známé jsou popsány pouze přibližně - matematické reprezentace přírodních zákonů jsou pouze aproximací reality. To znamená, že nikdy nejsme schopni dosáhnout úplné shody mezi chováním modelovaného objektu a jeho modelu. Navíc, v procesu modelování některé dílčí procesy i funkční závislosti zanedbáváme a zavádíme tzv. zjednodušující předpoklady za účelem získání jednoduššího modelu. Platí, že čím má být model přesnější a věrněji vystihovat realitu, tím je složitější. Modelování je tedy vždy kompromisem mezi složitostí a přesností. Modely sestavované za účelem návrhu nebo

ověřování algoritmů řízení nemusí být zpravidla vysoce přesné z hlediska absolutních hodnot veličin. Musí však v každém případě vystihovat trendy statických i dynamických charakteristik procesu. Naopak modely, používané ve stadiu projektování technologických procesů a inženýrské analýze jsou většinou podstatně přesnější a složitější.

Druhým základním postupem při identifikaci reálného objektu je empirický postup. Vychází z měření vstupních a výstupních veličin na reálném objektu a jejich dalšího zpracování a vyhodnocení. Produktem je potom experimentální model daného reálného objektu. Tento model nepopisuje vnitřní vazby ve zkoumaném objektu, vnitřní, stavové veličiny obchází. Není modelem struktury, je pouze modelem chování. Jeho parametry nemají konkrétní fyzikální význam. Protože uvádí pouze relace mezi vstupem a výstupem, má charakter vnějšího (vstupně-výstupního) modelu.

Samozřejmě, i experimentální model má svoji strukturu, ta je však volena (většinou na základě empirických zkušeností) a neodpovídá vnitřní struktuře zkoumaného objektu.

Každý z obou uvedených postupů má svou oblast použití a své přednosti. Analytický postup je nezastupitelný ve stádiu projektování nějaké technologie, kdy reálné zařízení ještě neexistuje a my z různých důvodů potřebujeme odhadnout budoucí vlastnosti procesu, např. při určení struktury řídicích prvků a prvním odhadu jejich parametrů. Stavový model získaný analytickým postupem je platný v širokém rozsahu změn vstupních veličin, i v režimech, reálně nepřípustných (např. z důvodů bezpečnosti). Vzhledem k tomu, že jeho parametry mají konkrétní fyzikální význam, můžeme zkoumat jejich vliv na výsledek procesu. Nevýhodou tohoto modelu je hlavně jeho složitost a obtížnost sestavení, zejména pro složitější procesy.

Empirický postup logicky vyžaduje existenci reálného objektu (na něm provádíme měření). V oblasti měření, pro kterou proces identifikace proběhl, může být experimentální model přesnější než model získaný analyticky, neboť výsledky měření v sobě obsahují i ty stránky reality, které při analytickém modelování nejsme schopni postihnout nebo je zanedbáváme. Na druhou stranu, model je platný právě jen pro tuto oblast měření a pro jinou oblast změn (pohybu) vstupních veličin musíme sestavit model jiný. Experimentální model je většinou podstatně jednodušší než model analytický.

Oba uvedené postupy představují krajní případy. Mezi nimi existuje řada metod identifikace, využívajících kombinace mezi postupem analytickým a empirickým. Příkladem může být metoda, která využívá analýzu procesu pro určení struktury modelu a následně měření pro určení jeho parametrů.[2]

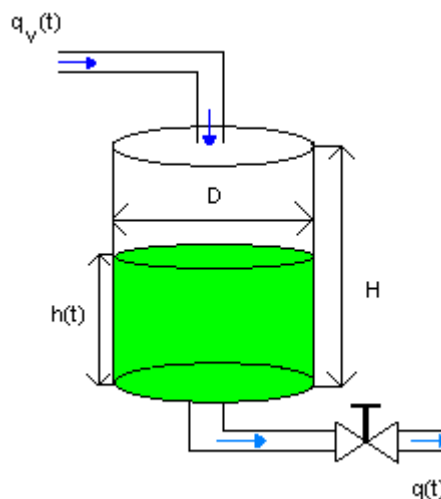
Další informace o modelování a identifikaci lze nalézt např. v [7], [8], [11]

V této práci se budeme zabývat modelováním vybraných technologických procesů. Půjde o modely analytické. Většina modelů je odvozena na základě bilancí.

2 ODVOZENÍ MODELŮ VYBRANÝCH TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ

2.1 Válcový zásobník na kapalinu

Na Obr.1 je vidět schéma válcového zásobníku. Vstupem do zásobníku je vstupní přítok a výstupem ze zásobníku je výstupní odtok přes ventil



Obr. 1 Válcový zásobník na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_v(t)$	přítok do zásobníku	$[m^3/s]$
$h(t)$	výška hladiny v zásobníku	$[m]$
D	průměr zásobníku	$[m]$
H	výška zásobníku	$[m]$
$q(t)$	odtok ze zásobníku	$[m^3/s]$

Tab. 1 Parametry válcového zásobníku

Vstupní veličinou je přítok do zásobníku, stavovou je výška hladiny a výstupní veličinou odtok ze zásobníku.

Předpoklady: Průřez zásobníku je konstantní, zásobník je otevřený.

Odvození matematického modelu:

$$\{\text{přítok do zásobníku}\} = \{\text{odtok ze zásobníku}\} + \{\text{akumulace kapaliny v zásobníku}\}$$

$$q_v = q + \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Vzhledem k tomu, že průřez zásobníku je konstantní, můžeme změny objemu vyjádřit pomocí změn výšky hladiny $dV = F dh$ a následně rovnici (1) napsat ve tvaru:

$$q_v = q + F \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

s počáteční podmínkou $h(0) = h^s$

Je známo, že průtok média přes ventil je úměrný druhé odmocnině z rozdílu tlaků média před a za ventilem. V našem případě jde o hydrostatický tlak úměrný výšce hladiny v zásobníku a tudíž pro průtok platí:

$$q = k\sqrt{h} \quad (3)$$

kde k je konstanta ventilu a vypočítá se z ustáleného přítoku q^s a z ustálené výšky hladiny h^s .

Výsledný matematický model:

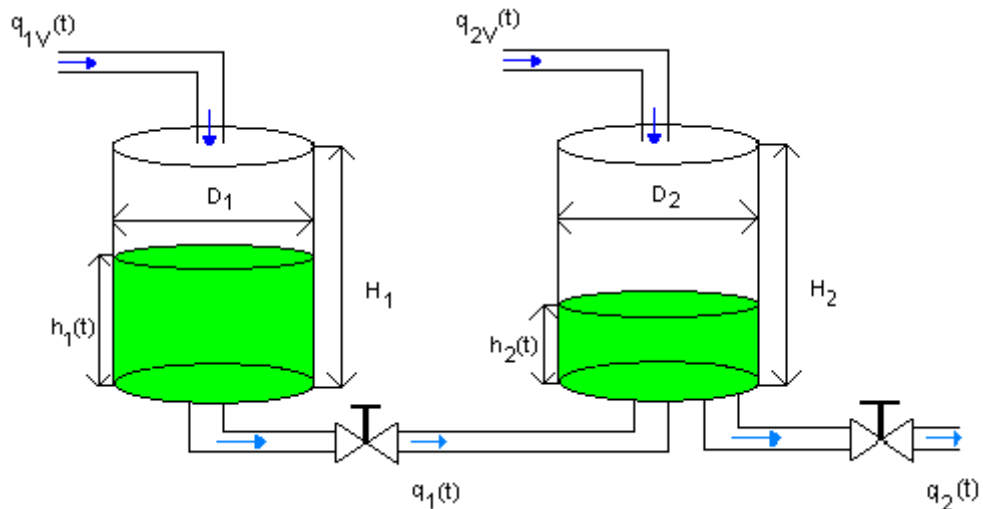
$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{F} [q_v(t) - k\sqrt{h(t)}] \quad (4)$$

Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h(t) < 0$, potom $h(t) = 0$
- jestliže $h(t) > H$, potom $h(t) = H$

2.2 Dva válcové zásobníky na kapalinu

Na Obr.2 je vidět schéma dvou zásobníků na kapalinu. Jde o zásobníky válcové a každý může mít různé parametry. Vstupem do zásobníků jsou dva přítoky. Mezi prvním a druhým zásobníkem se nachází ventil, ten je umístěn i na odtoku z druhého zásobníku.



Obr. 2 Dva válcové zásobníky na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_{1v}(t)$	přítok do prvního zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_{2v}(t)$	přítok do druhého zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$h_1(t)$	výška hladiny v prvním zásobníku	$[\text{m}]$
$h_2(t)$	výška hladiny v druhém zásobníku	$[\text{m}]$
D_1	průměr prvního zásobníku	$[\text{m}]$
D_2	průměr druhého zásobníku	$[\text{m}]$
H_1	výška prvního zásobníku	$[\text{m}]$
H_2	výška druhého zásobníku	$[\text{m}]$
$q_1(t)$	odtok z prvního zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_2(t)$	odtok z druhého zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$

Tab. 2 Parametry dvou válcových zásobníků

Vstupními veličinami jsou dva vstupní přítoky do zásobníku jedna a dva. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladin v obou zásobnících.

Předpoklady: Dna zásobníků jsou ve stejné výšce, zásobníky jsou otevřené a jejich průřezy jsou konstantní

Odvození matematického modelu:

$\{\text{přítok do zásobníku}\} = \{\text{odtok ze zásobníku}\} + \{\text{akumulace kapaliny v zásobníku}\}$

$$\begin{aligned} q_{1v} &= q_1 + \frac{dV_1}{dt}, \\ q_{2v} + q_1 &= q_2 + \frac{dV_2}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

Vzhledem k tomu, že průřezy zásobníků jsou konstantní, můžeme změny objemů vyjádřit pomocí změn výšky hladin $dV_1 = F_1 dh_1$, $dV_2 = F_2 dh_2$ a následně rovnice (5) napsat ve tvaru:

$$\begin{aligned} q_{1v} &= q_1 + F_1 \frac{dh_1}{dt}, \\ q_{2v} + q_1 &= q_2 + F_2 \frac{dh_2}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

s počátečními podmínkami $h_1(0) = h_1^s$, $h_2(0) = h_2^s$

Rovnice(6) platí pro případ, kdy $h_1 > h_2$, v případě $h_1 < h_2$ se v rovnici (6) změní q_1 na $-q_1$.

Je známo, že průtok média přes ventil je úměrný druhé odmocnině z rozdílu tlaků média před a za ventilem. V našem případě jde o hydrostatický tlak úměrný výšce hladin v zásobnících a tudíž pro průtoky platí:

$$q_1 = k_1 \sqrt{h_1 - h_2}, q_2 = k_2 \sqrt{h_2} \quad (7)$$

kde k_1 a k_2 jsou konstanty ventilů a vypočítají se z ustálených přítoků q_{1v}^s, q_{2v}^s a z ustálené výšky hladin h_1^s, h_2^s

Výsledný matematický model:

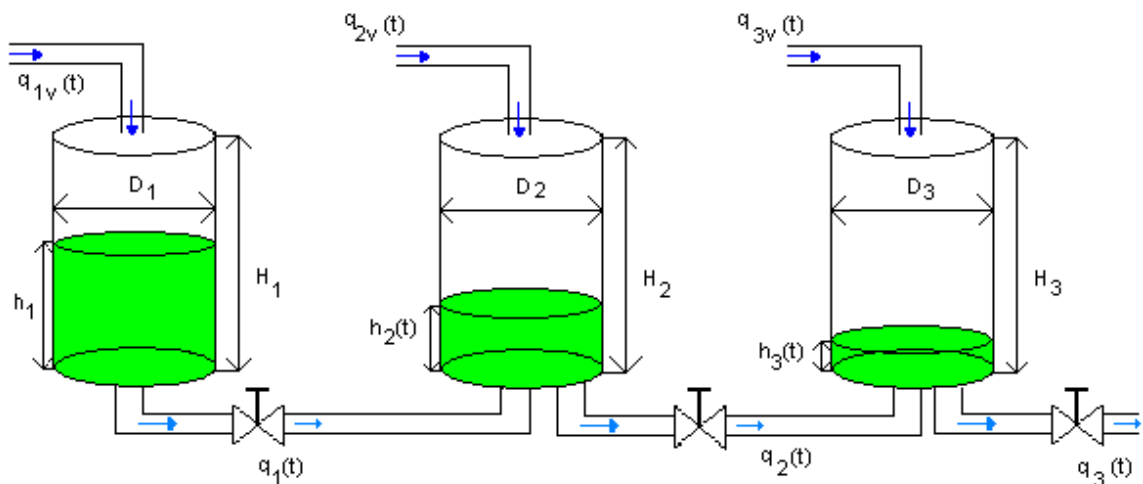
$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{F_1} \left[q_{1v}(t) - k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} \right], \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{1}{F_2} \left[q_{2v}(t) + k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} - k_2 \sqrt{h_2(t)} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h_1(t) < 0$, potom $h_1(t) = 0$
- jestliže $h_2(t) < 0$, potom $h_2(t) = 0$
- jestliže $h_1(t) > H_1$, potom $h_1(t) = H_1$
- jestliže $h_2(t) > H_2$, potom $h_2(t) = H_2$

2.3 Tři válcové zásobníky

Na Obr.3 je vidět schéma tří zásobníků na kapalinu. Jde o zásobníky válcové a každý může mít různé parametry. Vstupem do zásobníku jsou tři přítoky. Mezi prvním, druhým a třetím zásobníkem se nachází ventil, ten je umístěn i na odtoku ze třetího zásobníku.



Obr. 3 Tři válcové zásobníky na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_{1v}(t)$	přítok do prvního zásobníku	$[m^3/s]$
$q_{2v}(t)$	přítok do druhého zásobníku	$[m^3/s]$
$q_{3v}(t)$	přítok do třetího zásobníku	$[m^3/s]$
$h_1(t)$	výška hladiny v prvním zásobníku	$[m]$
$h_2(t)$	výška hladiny v druhém zásobníku	$[m]$
$h_3(t)$	výška hladiny ve třetím zásobníku	$[m]$

D_1	průměr prvního zásobníku	[m]
D_2	průměr druhého zásobníku	[m]
D_3	průměr třetího zásobníku	[m]
H_1	výška prvního zásobníku	[m]
H_2	výška druhého zásobníku	[m]
H_3	výška třetího zásobníku	[m]
$q_1(t)$	odtok z prvního zásobníku	[m ³ /s]
$q_2(t)$	odtok z druhého zásobníku	[m ³ /s]
$q_3(t)$	odtok ze třetího zásobníku	[m ³ /s]

Tab. 3 Parametry tří válcových zásobníků

Vstupními veličinami jsou tři vstupní přítoky do zásobníku jedna, dva a tři. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladin ve všech zásobnících.

Předpoklady: Dna zásobníků jsou ve stejné výšce, zásobníky jsou otevřené a jejich průřezy jsou konstantní

Odvození matematického modelu:

{přítok do zásobníku} = {odtok ze zásobníku} + {akumulace kapaliny v zásobníku}

$$\begin{aligned}
 q_{1v} &= q_1 + \frac{dV_1}{dt}, \\
 q_{2v} + q_1 &= q_2 + \frac{dV_2}{dt}, \\
 q_{3v} + q_2 &= q_3 + \frac{dV_3}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Vzhledem k tomu, že průřezy zásobníků jsou konstantní, můžeme změny objemů vyjádřit pomocí změn výšky hladin $dV_1 = F_1 dh_1$, $dV_2 = F_2 dh_2$, $dV_3 = F_3 dh_3$ a následně rovnice (9) napsat ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 q_{1v} &= q_1 + F_1 \frac{dh_1}{dt}, \\
 q_{2v} + q_1 &= q_2 + F_2 \frac{dh_2}{dt}, \\
 q_{3v} + q_2 &= q_3 + F_3 \frac{dh_3}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

s počátečními podmínkami $h_1(0)=h_1^s$, $h_2(0)=h_2^s$, $h_3(0)=h_3^s$

Rovnice (10) platí pro případ, kdy pro výšky hladin platí: $h_1 > h_2$ a $h_2 > h_3$, pokud $h_1 < h_2$, pak $q_1 = -q_1$, jestliže $h_2 < h_3$, pak $q_2 = -q_2$.

Je známo, že průtok média přes ventil je úměrný druhé odmocnině z rozdílu tlaků média před a za ventilem. V našem případě jde o hydrostatický tlak úměrný výšce hladin v zásobnících a tudíž pro průtoky platí:

$$q_1 = k_1 \sqrt{h_1 - h_2}, q_2 = k_2 \sqrt{h_2 - h_3}, q_3 = k_3 \sqrt{h_3} \tag{11}$$

kde k_1 , k_2 a k_3 jsou konstanty ventilů a vypočítají se z ustálených přítoků $q_{1v}^s, q_{2v}^s, q_{3v}^s$ a z ustálené výšky hladin h_1^s, h_2^s, h_3^s

Výsledný matematický model:

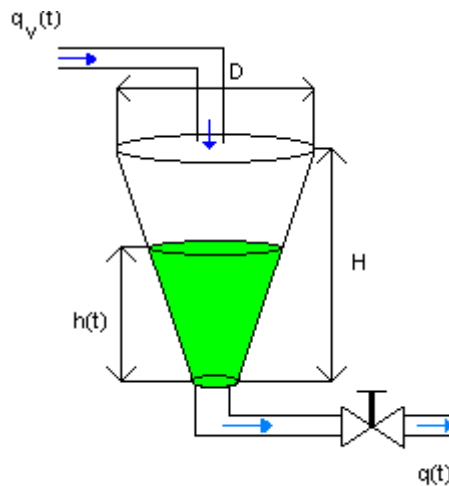
$$\begin{aligned}
 \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{F_1} \left[q_{1v}(t) - k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} \right] \\
 \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{1}{F_2} \left[q_{2v}(t) + k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} - k_2 \sqrt{|h_3(t) - h_2(t)|} \right] \\
 \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{1}{F_3} \left[q_{3v}(t) + k_2 \sqrt{|h_3(t) - h_2(t)|} - k_3 \sqrt{h_3(t)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h_1(t) < 0$, potom $h_1(t) = 0$
- jestliže $h_2(t) < 0$, potom $h_2(t) = 0$
- jestliže $h_3(t) < 0$, potom $h_3(t) = 0$
- jestliže $h_1(t) > H_1$, potom $h(t) = H_1$
- jestliže $h_2(t) > H_2$, potom $h(t) = H_2$
- jestliže $h_3(t) > H_3$, potom $h(t) = H_3$

2.4 Trychtýřový zásobník na kapalinu

Na Obr.4 je vidět schéma trychtýřového zásobníku. Vstupem do zásobníku je vstupní přítok a výstupem ze zásobníku je výstupní odtok přes ventil



Obr. 4 Trychtýřový zásobník na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_v(t)$	přítok do zásobníku	$[m^3/s]$
$h(t)$	výška hladiny v zásobníku	[m]
D	vrchní průměr zásobníku	[m]
H	výška zásobníku	[m]
$q(t)$	odtok ze zásobníku	$[m^3/s]$

Tab. 4 Parametry trychtýřového zásobníku

Vstupní veličinou je vstupní přítok do zásobníku. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladiny v zásobníku.

Předpoklady: Zásobník je otevřený.

Odvození matematického modelu: Je podobné jako u válcového zásobníku.

Výsledný matematický model:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{4H^2}{\pi D^2 h^2(t)} \left[q_v(t) - k\sqrt{h(t)} \right] \quad (13)$$

s počáteční podmínkou $h(0)=h^s$

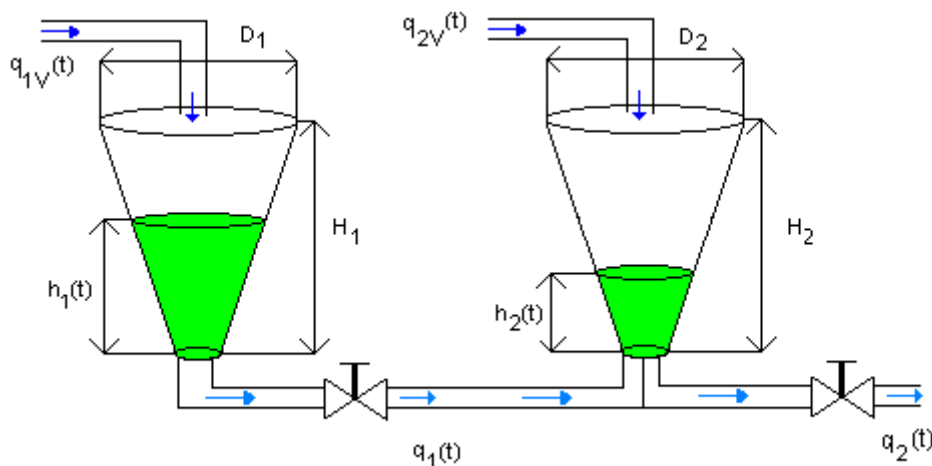
Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h(t) < 0.01H$, potom $h(t) = 0.01H$
- jestliže $h(t) > H$, potom $h(t) = H$

Pozn. Vzhledem k tomu, že výška hladiny se nachází ve jmenovateli, tak nemůže nabývat nulové hodnoty, proto byla zvolena jako „nulová“ výška hladiny 1% z výšky zásobníku (v blízkosti daného singulárního bodu docházelo k numerické nestabilitě).

2.5 Dva trychtýřové zásobníky na kapalinu

Na Obr.5 je vidět schéma dvou zásobníků na kapalinu. Jde o zásobníky trychtýřové a každý může mít různé parametry. Vstupem do zásobníku jsou dva přítoky. Mezi prvním a druhým zásobníkem se nachází ventil, ten je umístěn i na odtoku z druhého zásobníku.



Obr. 5 Dva trychtýřové zásobníky na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_{1v}(t)$	přítok do prvního zásobníku	$[m^3/s]$
$q_{2v}(t)$	přítok do druhého zásobníku	$[m^3/s]$

$h_1(t)$	výška hladiny v prvním zásobníku	[m]
$h_2(t)$	výška hladiny v druhém zásobníku	[m]
D_1	vrchní průměr prvního zásobníku	[m]
D_2	vrchní průměr druhého zásobníku	[m]
H_1	výška prvního zásobníku	[m]
H_2	výška druhého zásobníku	[m]
$q_1(t)$	odtok z prvního zásobníku	[m ³ /s]
$q_2(t)$	odtok z druhého zásobníku	[m ³ /s]

Tab. 5 Parametry dvou trychtýřových zásobníků

Vstupními veličinami jsou dva vstupní přítoky do zásobníku jedna a dva. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladin v obou zásobnících.

Předpoklady: Dna zásobníků ve stejné výšce, jsou otevřené.

Odvození matematického modelu: Je podobné jako u dvou válcových zásobníků

Výsledný matematický model:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{4H_1^2}{\pi D_1^2 h_1^2(t)} [q_{1v}(t) - q_1(t)], \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{4H_2^2}{\pi D_2^2 h_2^2(t)} [q_{2v}(t) + q_1(t) - q_2(t)], \end{aligned} \quad (14)$$

kde $q_1 = k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}$, $q_2 = k_2 \sqrt{h_2(t)}$

s počátečními podmínkami $h_1(0) = h_1^s$, $h_2(0) = h_2^s$

Rovnice (14) platí pro případ, kdy pro výšky hladin platí: $h_1 > h_2$, pokud $h_1 < h_2$, pak

$$q_1 = -q_1$$

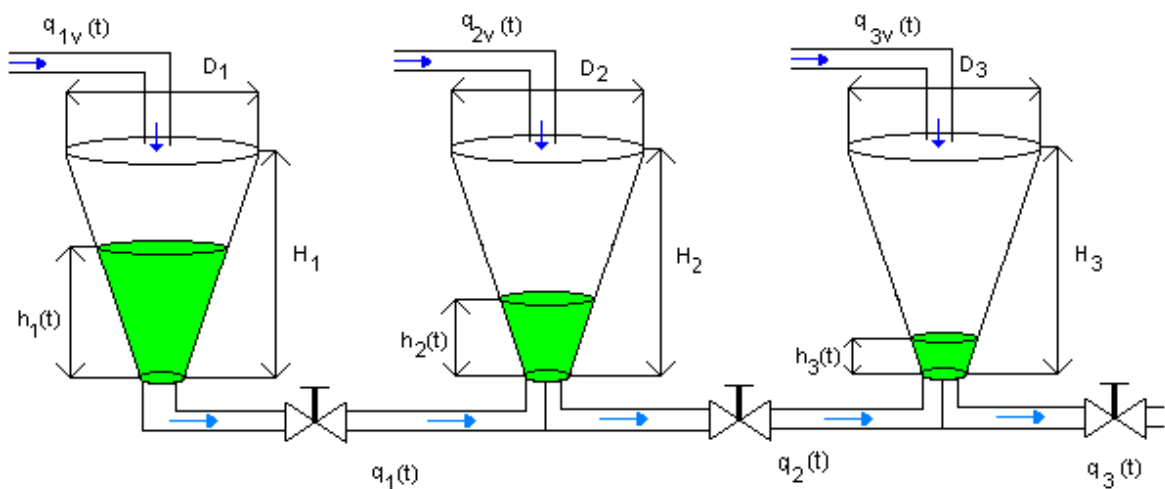
Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h_1(t) < 0.01H_1$, potom $h_1(t) = 0.01H_1$
- jestliže $h_2(t) < 0.01H_2$, potom $h_2(t) = 0.01H_2$
- jestliže $h_1(t) > H_1$, potom $h(t) = H_1$
- jestliže $h_2(t) > H_2$, potom $h(t) = H_2$

Pozn. Vzhledem k tomu, že výšky hladin se nachází ve jmenovateli rovnice (14), výšky hladin nemůžou nabývat nulové hodnoty, proto byla opět zvolena jako nulová výška hladin 1% z výšky zásobníků.

2.6 Tři trychtýřové zásobníky

Na Obr.6 je vidět schéma tří zásobníků na kapalinu. Jde o zásobníky trychtýřové a každý může mít různé parametry. Vstupem do zásobníku jsou tři přítoky. Mezi prvním, druhým a třetím zásobníkem se nachází ventil, ten je umístěn i na odtoku ze třetího zásobníku.



Obr. 6 Tři trychtýřové zásobníky na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_{1v}(t)$	přítok do prvního zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_{2v}(t)$	přítok do druhého zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_{3v}(t)$	přítok do třetího zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$h_1(t)$	výška hladiny v prvním zásobníku	$[\text{m}]$
$h_2(t)$	výška hladiny v druhém zásobníku	$[\text{m}]$
$h_3(t)$	výška hladiny ve třetím zásobníku	$[\text{m}]$
D_1	vrchní průměr prvního zásobníku	$[\text{m}]$
D_2	vrchní průměr druhého zásobníku	$[\text{m}]$
D_3	vrchní průměr třetího zásobníku	$[\text{m}]$

H_1	výška prvního zásobníku	[m]
H_2	výška druhého zásobníku	[m]
H_3	výška třetího zásobníku	[m]
$q_1(t)$	odtok z prvního zásobníku	[m ³ /s]
$q_2(t)$	odtok z druhého zásobníku	[m ³ /s]
$q_3(t)$	odtok ze třetího zásobníku	[m ³ /s]

Tab. 6 Parametry tří trychtýřových zásobníků

Vstupními veličinami jsou tři vstupní přítoky do zásobníku jedna, dva a tři. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladin ve třech zásobnících.

Předpoklady: Dna zásobníků ve stejné výšce, jsou otevřené.

Odvození matematického modelu: Je podobné jako u tří válcových zásobníků

Výsledný matematický model:

$$\begin{aligned}
 \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{4H_1^2}{\pi D_1^2 h_1^2(t)} [q_{1v}(t) - q_1(t)], \\
 \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{4H_2^2}{\pi D_2^2 h_2^2(t)} [q_{2v}(t) + q_1(t) - q_2(t)], \\
 \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{4H_3^2}{\pi D_3^2 h_3^2(t)} [q_{3v}(t) + q_2(t) - q_3(t)],
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\text{kde } q_1 = k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}, q_2 = k_2 \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|}, q_3 = k_3 \sqrt{h_2(t)}$$

s počátečními podmínkami $h_1(0)=h_1^s$, $h_2(0)=h_2^s$, $h_3(0)=h_3^s$

Rovnice (15) platí pro případ, kdy pro výšky hladin platí: $h_1 > h_2$ a $h_2 > h_3$, pokud $h_1 < h_2$, pak $q_1 = -q_1$, jestliže $h_2 < h_3$, pak $q_2 = -q_2$.

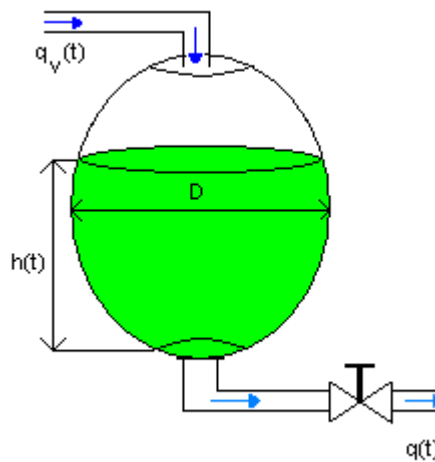
Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h_1(t) < 0.01H_1$, potom $h_1(t) = 0.01H_1$
- jestliže $h_2(t) < 0.01H_2$, potom $h_2(t) = 0.01H_2$
- jestliže $h_3(t) < 0.01H_3$, potom $h_3(t) = 0.01H_3$
- jestliže $h_1(t) > H_1$, potom $h_1(t) = H_1$
- jestliže $h_2(t) > H_2$, potom $h_2(t) = H_2$
- jestliže $h_3(t) > H_3$, potom $h_3(t) = H_3$

Pozn. Vzhledem k tomu, že výšky hladin se nachází ve jmenovateli rovnice (14), výšky hladin nemůžou nabývat nulové hodnoty, proto byla podobně zvolena jako nulová výška hladin 1% z výšky zásobníků.

2.7 Kulový zásobník na kapalinu

Na Obr.7 je vidět schéma kulového zásobníku. Vstupem do zásobníku je vstupní přítok a výstupem ze zásobníku je výstupní odtok přes ventil



Obr. 7 Kulový zásobník na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_v(t)$	přítok do zásobníku	$[m^3/s]$
$h(t)$	výška hladiny v zásobníku	$[m]$
D	průměr zásobníku	$[m]$
$q(t)$	odtok ze zásobníku	$[m^3/s]$

Tab. 7 Parametry kulového zásobníku

Vstupní veličinou je vstupní přítok do zásobníku. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladiny v zásobníku.

Předpoklady: Zásobník je otevřený.

Odvození matematického modelu: Je podobné jako u válcového zásobníku

Výsledný matematický model:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{\pi h(t)(D-h(t))} [q_v(t) - k\sqrt{h(t)}], \quad (16)$$

s počáteční podmínkou $h(0)=h^s$

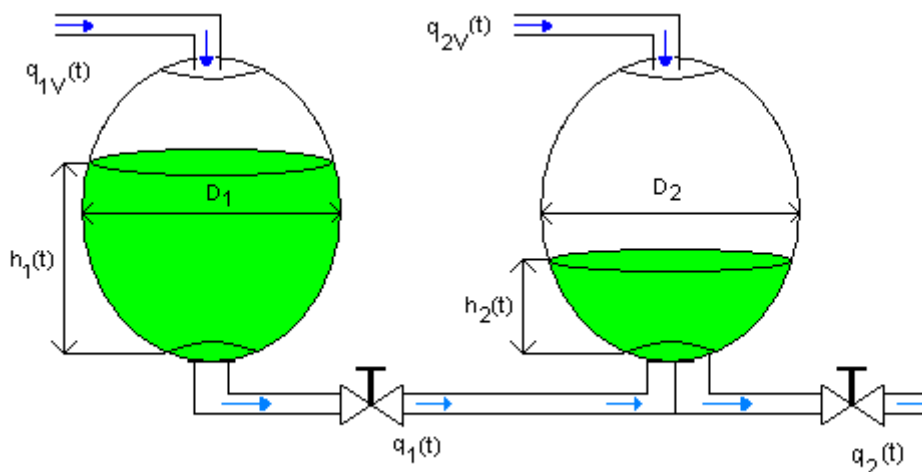
Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h(t) < 0$, potom $h(t) = 0.01D$
- jestliže $h(t) > D$, potom $h(t) = 0.99D$

Pozn. Z důvodu, že výška hladiny se nachází ve jmenovateli, byla opět volena jako nulová výška hladiny 1% průměru zásobníku. Pokud by byla výška hladiny rovna průměru zásobníku, dojde opět k dělení nulou, tento stav se podobně ošetří max. výškou hladiny jako 99% průměru zásobníku.

2.8 Dva kulové zásobníky na kapalinu

Na Obr.8 je vidět schéma dvou zásobníků na kapalinu. Jde o zásobníky kulové a každý může mít různé parametry. Vstupem do zásobníku jsou dva přítoky. Mezi prvním a druhým zásobníkem se nachází ventil, ten je umístěn i na odtoku z druhého zásobníku.



Obr. 8 Dva kulové zásobníky na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_{1v}(t)$	přítok do prvního zásobníku	$[m^3/s]$
$q_{2v}(t)$	přítok do druhého zásobníku	$[m^3/s]$

$h_1(t)$	výška hladiny v prvním zásobníku	[m]
$h_2(t)$	výška hladiny v druhém zásobníku	[m]
D_1	průměr prvního zásobníku	[m]
D_2	průměr druhého zásobníku	[m]
$q_1(t)$	odtok z prvního zásobníku	[m ³ /s]
$q_2(t)$	odtok z druhého zásobníku	[m ³ /s]

Tab. 8 Parametry dvou kulových zásobníků

Vstupními veličinami jsou dva vstupní přítoky do zásobníku jedna a dva. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladin v obou zásobnících.

Předpoklady: Dna zásobníků ve stejné výšce, jsou otevřené

Odvození matematického modelu: Je podobné jako u dvou válcových zásobníků

Výsledný matematický model:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{\pi h_1(t)(D_1 - h_1(t))} [q_{1v}(t) - q_1] \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{1}{\pi h_2(t)(D_2 - h_2(t))} [q_{2v}(t) + q_1 - q_2] \end{aligned} \quad (17)$$

kde $q_1 = k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}$, $q_2 = k_2 \sqrt{h_2(t)}$

s počátečními podmínkami $h_1(0) = h_1^s$, $h_2(0) = h_2^s$

Rovnice (14) platí pro případ, kdy pro výšky hladin platí: $h_1 > h_2$, pokud $h_1 < h_2$, pak $q_1 = -q_1$

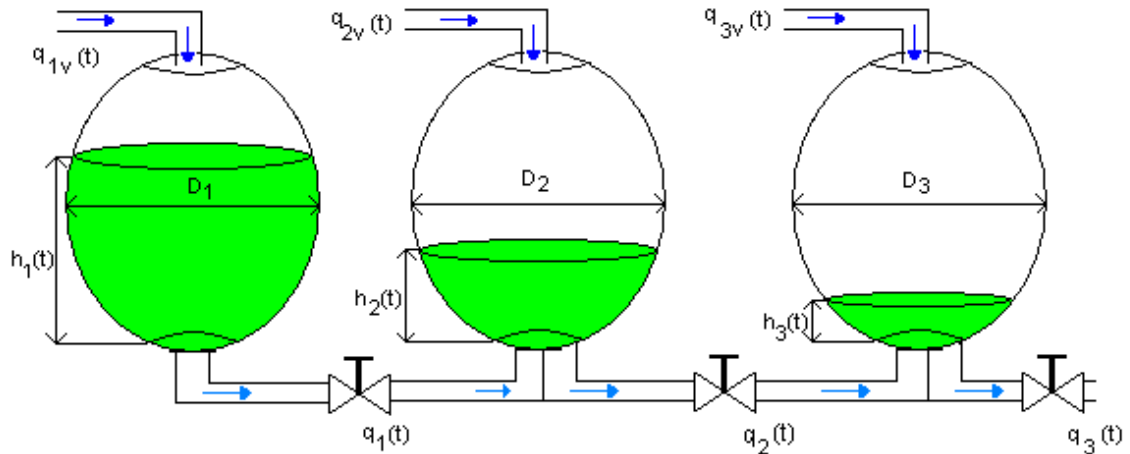
Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h_1(t) < 0$, potom $h_1(t) = 0.01D_1$
- jestliže $h_2(t) < 0$, potom $h_2(t) = 0.01D_2$
- jestliže $h_1(t) > D_1$, potom $h_1(t) = 0.99D_1$
- jestliže $h_2(t) > D_2$, potom $h_2(t) = 0.99D_2$

Pozn. I zde jsou podobným způsobem jako u předchozího modelu ošetřeny singularity.

2.9 Tři kulové zásobníky na kapalinu

Na Obr.9 je vidět schéma tří zásobníků na kapalinu. Jde o zásobníky kulové a každý může mít různé parametry. Vstupem do zásobníku jsou tři přítoky. Mezi prvním, druhým a třetím zásobníkem se nachází ventil, ten je umístěn i na odtoku ze třetího zásobníku.



Obr. 9 Tři kulové zásobníky na kapalinu

Označení	Popis	Jednotka
$q_{1v}(t)$	přítok do prvního zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_{2v}(t)$	přítok do druhého zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_{3v}(t)$	přítok do třetího zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$h_1(t)$	výška hladiny v prvního zásobníku	$[\text{m}]$
$h_2(t)$	výška hladiny v druhém zásobníku	$[\text{m}]$
$h_3(t)$	výška hladiny ve třetím zásobníku	$[\text{m}]$
D_1	průměr prvního zásobníku	$[\text{m}]$
D_2	průměr druhého zásobníku	$[\text{m}]$
D_3	průměr třetího zásobníku	$[\text{m}]$
$q_1(t)$	odtok z prvního zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_2(t)$	odtok z druhého zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$q_3(t)$	odtok ze třetího zásobníku	$[\text{m}^3/\text{s}]$

Tab. 9 Parametry tří kulových zásobníků

Vstupními veličinami jsou tři vstupní přítoky do zásobníku jedna, dva a tři. Stavovou veličinou a zároveň výstupní je výška hladin ve všech zásobnících.

Předpoklady: Dna zásobníků ve stejné výšce, zásobníky jsou otevřené.

Odvození matematického modelu: Je podobné jako u tří válcových zásobníků

Výsledný matematický model:

$$\begin{aligned}\frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{\pi h_1(t)(D_1 - h_1(t))} [q_{1v}(t) - q_1] \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{1}{\pi h_2(t)(D_2 - h_2(t))} [q_{2v}(t) + q_1 - q_2] \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{1}{\pi h_3(t)(D_3 - h_3(t))} [q_{3v}(t) + q_2 - q_3]\end{aligned}\tag{18}$$

kde $q_1 = k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}$, $q_2 = k_2 \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|}$, $q_3 = k_3 \sqrt{h_3(t)}$

s počátečními podmínkami $h_1(0) = h_1^s$, $h_2(0) = h_2^s$, $h_3(0) = h_3^s$

Rovnice (18) platí pro případ, kdy pro výšky hladin platí: $h_1 > h_2$ a $h_2 > h_3$, pokud $h_1 < h_2$, pak $q_1 = -q_1$, jestliže $h_2 < h_3$, pak $q_2 = -q_2$.

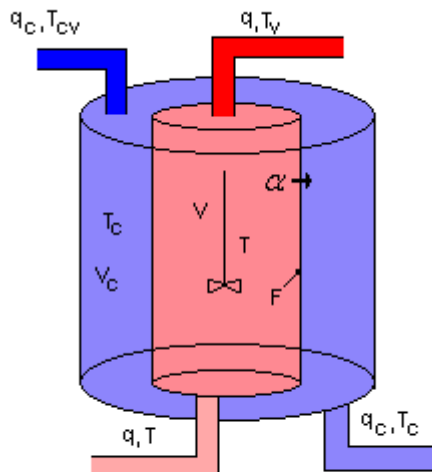
Ošetření chybových stavů:

- jestliže $h_1(t) < 0$, potom $h_1(t) = 0.01 D_1$
- jestliže $h_2(t) < 0$, potom $h_2(t) = 0.01 D_2$
- jestliže $h_3(t) < 0$, potom $h_3(t) = 0.01 D_3$
- jestliže $h_1(t) > D_1$, potom $h(t) = 0.99 D_1$
- jestliže $h_2(t) > D_2$, potom $h(t) = 0.99 D_2$
- jestliže $h_3(t) > D_3$, potom $h(t) = 0.99 D_3$

Pozn. Zde také podobným způsobem jako u předchozích modelů ošetřujeme možné singularitu

2.10 Průtočný výměník tepla s promícháváním

Na Obr.10 je vidět průtočný výměník tepla s promícháváním. Chlazená kapalina se nachází uvnitř výměníku a chladící kapalina v plášti výměníku.



Obr. 10 Průtočný výměník
s promícháváním

Označení	Popis	Jednotka
q_c	průtok chladícího média	$[\text{m}^3/\text{s}]$
T_{cv}	teplota chladícího média na vstupu	$[\text{K}]$
$T_c(t)$	teplota chladícího média v plášti a na výstupu	$[\text{K}]$
q	průtok chlazeného média	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$T(t)$	teplota chlazeného média uvnitř a na výstupu	$[\text{K}]$
V	objem chlazeného média ve výměníku	$[\text{m}^3]$
V_c	objem chladícího média ve výměníku	$[\text{m}^3]$
α	koeficient přestupu tepla	$[\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}]$
F	přestupná plocha	$[\text{m}^2]$

Tab. 10 Parametry výměníku tepla

Vstupními veličinami jsou vstupní průtoky q_c , q a teploty T_{cv} , T_v . Stavové veličiny jsou teploty ve výměníku T_c , T .

Předpoklady: Kapaliny jsou dokonale promíchávány, tepelná kapacity stěny je zanedbána, objemy V, V_c jsou konstantní, stejně jako hustoty ρ, ρ_c , měrná tepla c_p, c_{pc} . Také se zanedbává přestup tepla do okolí.

Odvození matematického modelu:

Chlazená kapalina:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{teplo vstupující} \\ \text{v proudu kapaliny} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{teplo ocházející} \\ \text{v proudu kapaliny} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{teplo přestupující} \\ \text{do chladicí kapaliny} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{teplo v objemu} \\ V \text{ akumulované} \end{array} \right\}$$

Chladicí kapalina:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{teplo vstupující} \\ \text{v proudu kapaliny} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{teplo přestupující} \\ \text{z chlazené kapaliny} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{teplo ocházející} \\ \text{v proudu kapaliny} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{teplo v objemu} \\ V_c \text{ akumulované} \end{array} \right\}$$

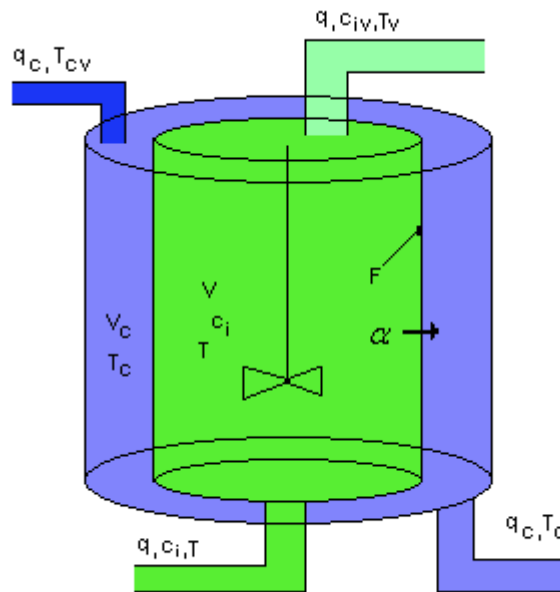
$$\begin{aligned} q\rho c_p T_v &= q\rho c_p T + F\alpha(T - T_c) + V\rho c_p \frac{dT}{dt} \\ q\rho_c c_{pc} T_{cv} + F\alpha(T - T_c) &= q_c \rho_c c_{cp} T_c + V_c \rho_c c_{pc} \frac{dT_c}{dt} \end{aligned} \quad (19)$$

Pro účely simulace upravíme dané diferenciální rovnice tak, aby se osamostatnila derivace a zůstala na jedné straně:

$$\begin{aligned} \frac{dT(t)}{dt} &= \frac{-q\rho c_p T(t) - F\alpha(T(t) - T_c(t)) + q\rho c_p T_v}{V\rho c_p} \\ \frac{dT_c(t)}{dt} &= \frac{-q_c \rho_c c_{cp} T_c(t) + q\rho_c c_{pc} T_{cv} + F\alpha(T(t) - T_c(t))}{V_c \rho_c c_{pc}} \end{aligned} \quad (20)$$

2.11 Průtočný chemický reaktor

Je uvažován průtočný chemický reaktor s chlazením v plášti podle Obr.11, ve kterém dochází k exotermní reakci. V této reakci reaguje i složek v j reakcích



Obr. 11 Průtočný chemický reaktor

Označení	Popis	Jednotka
q_c	průtok chladicího média	$[\text{m}^3/\text{s}]$
T_{cv}	teplota chladicího média na vstupu	$[\text{K}]$
$T_c(t)$	teplota chladicího média v plášti a na výstupu	$[\text{K}]$
q	průtok reakční směsi	$[\text{m}^3/\text{s}]$
T_v	vstupní teplota reakční směsi	$[\text{K}]$
c_{iv}	koncentrace jednotlivých složek ve vstupním proudu	$[\text{kmol m}^{-3}]$
V_c	objem chladicího média v plášti	$[\text{m}^3]$
V	objem reakční směsi	$[\text{m}^3]$
$c_i(t)$	koncentrace jednotlivých složek ve výstupním proudu	$[\text{kmol m}^{-3}]$
$T(t)$	teplota uvnitř a na výstupu z reaktoru	$[\text{K}]$
α	koeficient přestupu tepla	$[\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}]$
F	přestupná plocha	$[\text{m}^2]$

Tab. 11 Parametry chemického reaktoru

Vstupními veličinami jsou: Koncentrace složek c_{iv} ve vstupním proudu, vstupní teplota T_v reakční směsi, vstupní teplota chladiva T_{cv} a oba vstupní průtoky q_c, q . Stavové veličiny jsou koncentrace složek v reaktoru c_i , teplota reakční směsi v reaktoru T , a teplota chladiva v plášti T_c .

Předpoklady: Reakční směs v reaktoru i chladicí kapalina v plášti jsou dokonale promíchávány. Tepelná kapacity stěny je zanedbána. Objem reakční směsi v reaktoru V , V_c , hustoty ρ, ρ_c a měrná tepla reakční směsi i chladiva c, c_p jakož i koeficient přechodu tepla v reaktoru pokládáme za konstantní. Přestup tepla do okolí rovněž zanedbáváme.

Odvození matematického modelu:

Bilanční rovnice pro jednotlivé složky:

$$qc_{iv} = qc_i - V \sum_{j=1}^{j_0} r_{ij} + V \frac{dc_i}{dt}, \text{ pro } i = 1 \dots i_0 \quad (21)$$

s počátečními podmínkami: $c_i(0) = c_i^s, i = 1 \dots i_0$,

Pro tepelnou bilanci:

$$q\rho c_p T_v + V \sum_{j=1}^{j_0} h_j r_j = q\rho c_p T + F\alpha(T - T_c) + V\rho c_p \frac{dT}{dt} \quad (22)$$

s počáteční podmínkou: $T(0) = T^s$

V rovnicích (21) a (22) je r_{ij} rychlost i -té složky v j -té reakci, r_j rychlost j -té reakce a h_j reakční rychlost j -té reakce

Bilance pro chladicí médium:

$$q\rho_c c_{pc} T_{cv} + F\alpha(T - T_c) = q_c \rho_c c_{cp} T_c + V_c \rho_c c_{pc} \frac{dT_c}{dt} \quad (23)$$

s počáteční podmínkou: $T_c(0) = T_c^s$

Pro náš konkrétní případ je uvažován pouze dvousložkový průtočný chemický reaktor, kde dochází k reakci mezi dvěma složkami.

Výsledný matematický model:

$$\begin{aligned}
 \frac{dc_a}{dt} &= (qc_{av} - Vk_1c_a - qc_a) \frac{1}{V} \\
 \frac{dc_b}{dt} &= (qc_{bv} + Vk_1c_a - Vk_1c_a - qc_b) \frac{1}{V} \\
 \frac{dT}{dt} &= (qc_p\rho T_v + V(h_1k_1c_a + h_2k_2c_b) - qc_p\rho T + F\alpha(T - T_c)) \frac{1}{V\rho c_p} \\
 \frac{dT_c}{dt} &= (q_c\rho_c c_{cp}T_c - q\rho_c c_{pc}T_{cv} - F\alpha(T - T_c)) \frac{1}{V_c\rho_c c_{pc}}
 \end{aligned} \tag{24}$$

kde k_1 a k_2 jsou rychlostní konstanty dané Arrheniovým vztahem:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \\
 k_2 &= k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right)
 \end{aligned} \tag{25}$$

kde k_{01} a k_{02} jsou pre-exponenciální faktory a E_1 a E_2 aktivační energie.

3 MATLAB, SIMULINK, S-FUNKCE

3.1 Matlab

Matlab je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. Je nástroj jak pro pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací. [4]

3.1.1 Výpočetní jádro

Nejpodstatnější součástí numerického jádra MATLABu jsou algoritmy pro operace s maticemi reálných a komplexních čísel. MATLAB umožňuje provádět všechny běžné operace jako násobení, inverze, determinant atd. Kromě datových typů jednodušších než tradiční matice podporuje MATLAB také typy složitější, jako jsou např. vícerozměrná pole reálných nebo komplexních čísel. Dalším datovým typem jsou tzv. pole buněk, tedy struktury podobné maticím, ve kterých ovšem každý prvek může být jiného typu. Podobně lze tvořit datové struktury, kde jsou prvky rozlišeny ne souřadnicemi, ale jménem, takže připomínají struktury známé z běžných programovacích jazyků. Skládáním těchto datových typů je pak možné vytvořit libovolně složité datové struktury. MATLAB ukládá všechna čísla v tzv. dvojité přesnosti, ovšem na přání uživatele je možné zvolit úspornější formu. Vektor reálných čísel může v MATLABu představovat i polynom a operace s polynomy jsou v programu rovněž obsaženy.

Samotné výpočetní jádro je implementováno s využitím nejmodernějších knihoven LAPACK a ARPACK. Výpočetní jádro je schopné adaptivně optimalizovat svou činnost podle konkrétní konfigurace uživatelského počítače (typ procesoru, cache, paměť, operační systém, ...), čímž je schopno využít výpočetní výkon skutečně na 100%. [4]

3.1.2 Grafický subsystém

Grafika v MATLABu umožňuje snadné zobrazení a prezentaci výsledků získaných výpočtem. Je možné vykreslit různé druhy grafů: dvourozměrné pro funkce jedné proměnné, třírozměrné pro funkce dvou proměnných, histogramy, koláčové grafy a další. Všem grafickým objektům je možné téměř libovolně měnit vzhled, a to jak při jejich vytváření, tak po jejich nakreslení. [4]

3.1.3 Toolboxy

Otevřená architektura MATLABu vedla ke vzniku knihoven funkcí, nazývaných toolboxy, které rozšiřují použití programu v příslušných vědních a technických oborech. Tyto knihovny, navržené a v jazyce MATLABu napsané nejvýznačnějšími světovými odborníky, nabízejí předzpracované specializované funkce, které je možno rozšiřovat, modifikovat, anebo jen čerpat informace z přehledně dokumentovaných algoritmů.[4]

3.2 Simulink

Simulink je program pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení daných problémů. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic. Pomocí Simulinku a jeho grafického editoru lze vytvářet modely lineárních, nelineárních, v čase diskretních nebo spojitých systémů pouhým přesouváním funkčních bloků myší. Simulink nově umožňuje spouštět určité části simulačního schéma na základě výsledku logické podmínky. Tyto spouštěné a povolované subsystémy umožňují použití programu v náročných simulačních experimentech. Samozřejmostí je otevřená architektura, která dovoluje uživateli vytvářet si vlastní funkční bloky a rozšiřovat již tak bohatou knihovnu Simulinku. Hierarchická struktura modelů umožňuje koncipovat i velmi složité systémy do přehledné soustavy subsystémů prakticky bez omezení počtu bloků. Simulink, stejně jako MATLAB, dovoluje připojovat funkce napsané uživateli v jazyce C. Vynikající grafické možnosti Simulinku je možné přímo využít k tvorbě dokumentace. Mezi neocenitelné vlastnosti Simulinku patří nezávislost uživatelského rozhraní na počítačové platformě. Přenositelnost modelů a schémat mezi různými typy počítačů umožňuje vytvářet rozsáhlé modely, které vyžadují spolupráci většího kolektivu řešitelů na různých úrovních.[5]

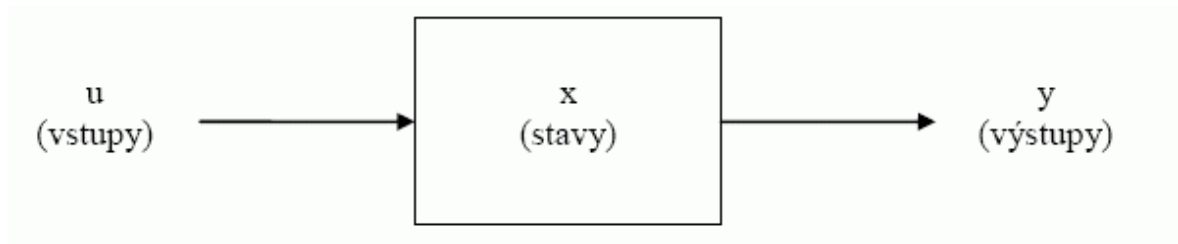
3.3 S-funkce

S-funkce poskytují mocný mechanismus pro rozšíření funkčnosti Simulinku. Dovolují vkládat vlastní bloky do modelu Simulinku. S-funkce umožňují popsat chování uživatelského bloku jazykem počítače. Užívá se speciální syntaxe, která umožňuje přímou interakci s řešitelem soustav nelineárních diferenciálních rovnic. S-funkce může být napsána v MATLABu, C, C++, Fortran, apod. a je samozřejmostí, že každá musí mít

jedinečné jméno. Formát S- funkce dovoluje všeobecné užití ve spojitéch, diskretních i hybridních systémech. [9]

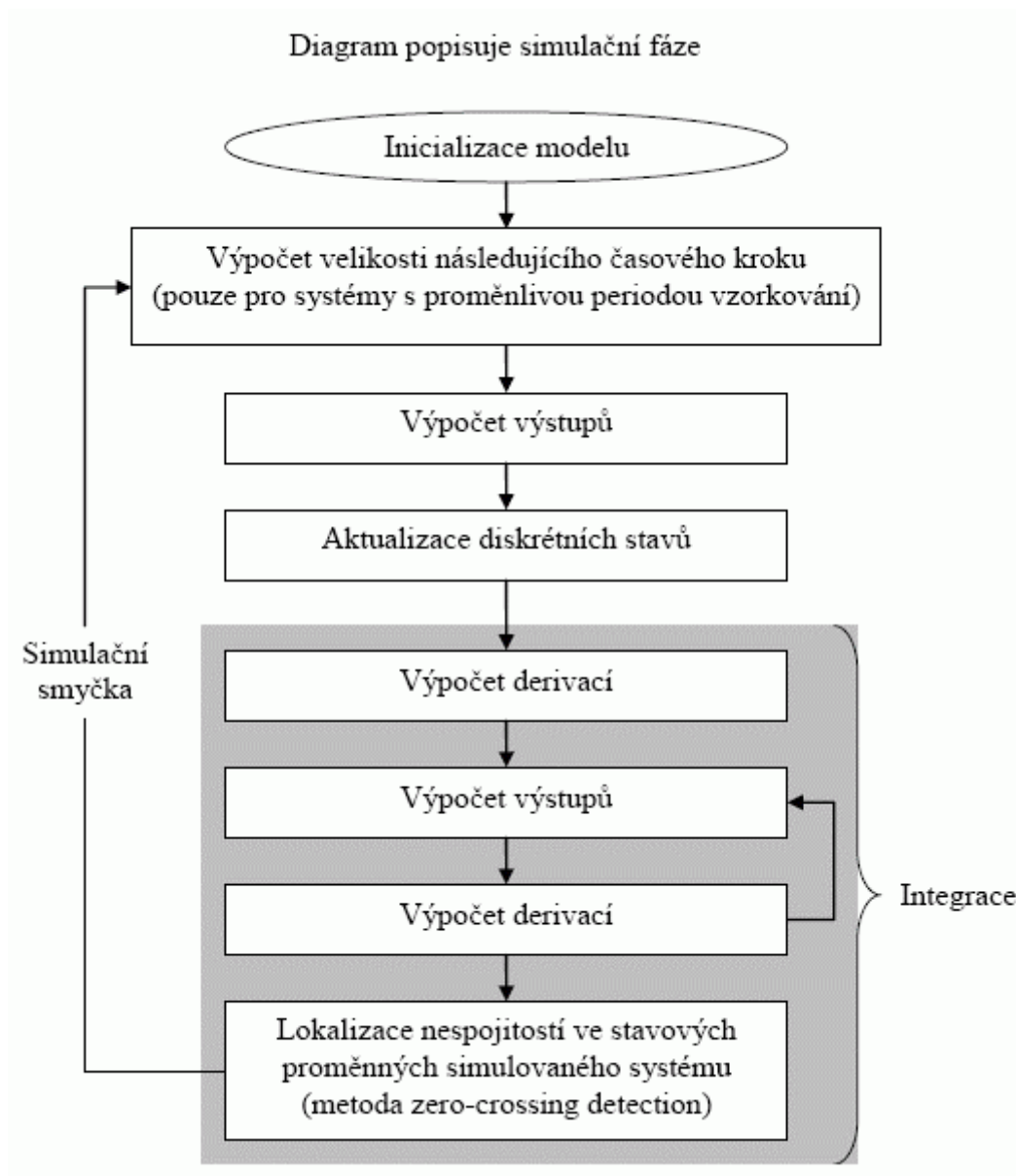
3.3.1 Jak s-funkce pracuje

Bloky Simulinku sestávají z množiny vstupů, množiny stavů a množiny výstupů, kde výstupy bloku jsou funkcí periody vzorkování, vstupu a vnitřních stavů bloku.



Obr. 12 Matematický popis bloku

Simulace modelu probíhá v několika fázích. První fází je inicializace – Simulink propojuje knihovní bloky s modelem, vyhodnocuje parametry bloku, stanovuje pořadí provádění bloku a alokuje paměť. Poté Simulink vstoupí do tzv. cyklu simulace, jeden průchod smyčkou představuje simulační krok. Během simulace modelu, Simulink opakovaně volá f a použije $flag$ pro úkol který bude proveden. Pro každý blok Simulink volá funkci, která vypočte stavy, derivace a výstupy v aktuálním čase. To se opakuje dokud není simulace kompletní.



Obr. 13 Grafické zobrazení průběhu simulace [9]

3.3.2 Implementace s-funkce

S-funkce může být implementována jako M-soubor v Matlabu. Její tvar je:

$$[sys, x0, str, ts] = f(t, x, u, flag, p1, p2, \dots)$$

kde *sys* je všeobecný argument, hodnota vrácená v *sys* je závislá na hodnotě *flagu*, *x0* vrací inicializaci stavů, *str* je rezervováno pro pozdější použití, *ts* vrací periodu vzorkování, *f* je název s-funkce, *t* je čas, *x* vektor stavů, *u* vstupy bloku, *flag* indukuje úlohu, která má být vykonávána a *p1, p2* jsou další předávané parametry bloku. V průběhu simulace modelu, Simulink opakovaně volá *f* a použije *flag* k označení úkonu, který bude

vykonán pro toto volání. Vždy když s-funkce vykonává úlohu, vrací výsledek ve struktuře odpovídající formátu uvedený v syntaktickém příkladu.

Vzorová implementace m-filu s-funkce se nachází v souboru *sfuntmpl.m*, v této části instalace Matlabu *matlabroot/toolbox/simulink/blocks*. Vzor se skládá z hlavní funkce a jednotlivých subfunkcí, kde každá z nich odpovídá hodnotě jednoho *flagu*. Hlavní funkce volá dané subfunkce podle hodnoty ve *flagu*. Subfunkce, nazývané metody zpětného volání, vykonávají požadované operace z s-funkce během simulace. V následující tabulce je vidět obsah m-filu s-funkce, kde je standardní pojmenování subfunkcí.

Stupeň simulace	S-funkce rutina	Flag
Inicializace	<code>mdlInitializeSizes</code>	flag = 0
Výpočet velikosti následujícího časového kroku	<code>mdlGetTimeOfNextVarHit</code>	flag = 4
Výpočet výstupů	<code>mdlOutputs</code>	flag = 3
Aktualizace diskrétních stavů	<code>mdlUpdate</code>	flag = 2
Výpočet derivací	<code>mdlDerivatives</code>	flag = 1
Konec simulace	<code>mdlTerminate</code>	flag = 9

Tab. 12 Hodnoty flagů

Díky těmto s-funkcím, můžeme v prostředí Matlab/Simulink vytvářet vlastní bloky. V této práci jsou vytvářeny bloky na základě odvozených matematických modelů. Pro jejich implementaci jsou použity právě s-funkce.

Pro seznámení se s prostředím Matlab je vhodné použít např. [3].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 KNIHOVNA MODELŮ

V rámci této diplomové práce byla vytvořena knihovna technologických procesů, která je koncipována jako otevřená. Knihovnu tvoří tyto bloky: válcové, trychtýřové a kulové zásobníky na kapalinu a to v zapojení jeden, dva a tři zásobníky za sebou, dále průtočný výměník a chemický reaktor (dvousložkový). Pro knihovnu byla zvolena následující adresářová struktura:

`./bmp` – nacházejí se zde obrázky pro pozadí bloků

`./help` – zde lze najít nápovědu v doc nebo pdf souboru

`./sim` – zde jsou umístěny simulační schémata

`./html` – zde je možné najít soubory napsané v HTML [6] jazyku, které jsou použity jako nápověda pro jednotlivé bloky

`./html/html` – v tomto adresáři se nacházejí gif obrázky pro html soubory

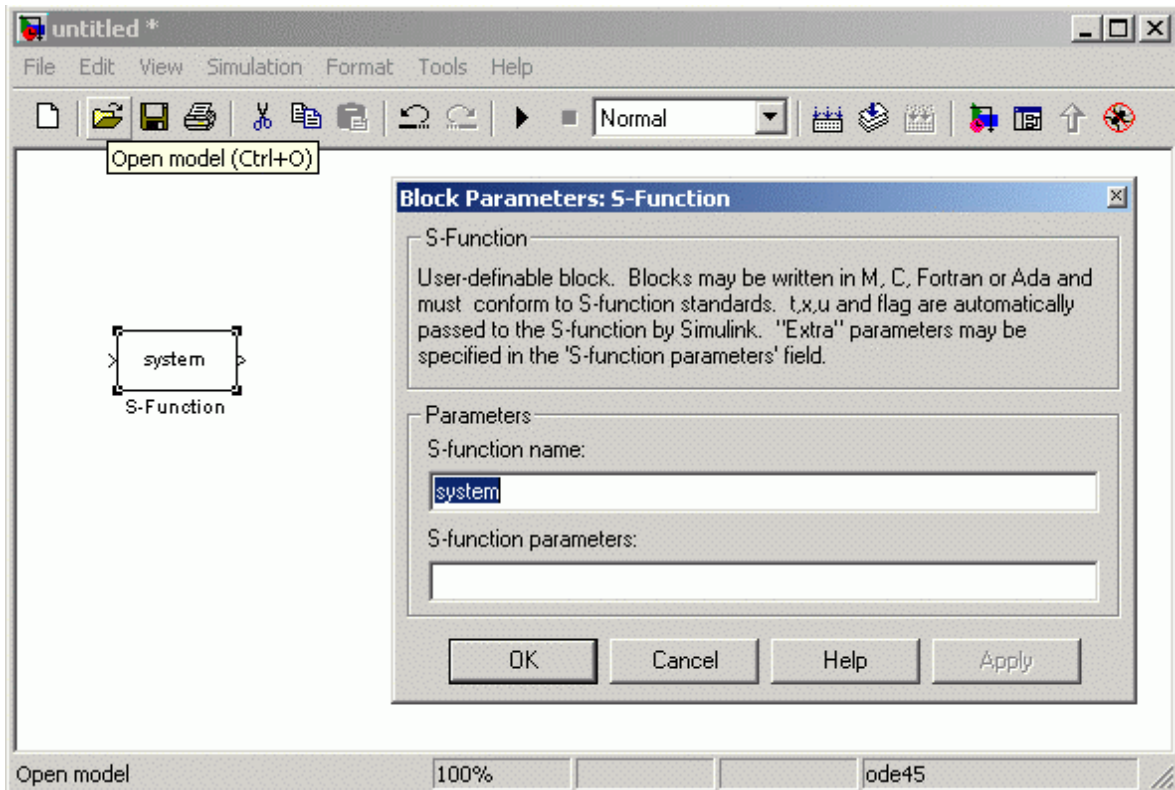
`./` -zde se nalézají příslušné m-fily s-funkcí a soubor *knihovna.mdl*, ve kterém jsou umístěny vytvořené modely.

V následující části je popsáno vytvoření s –funkce pro daný model

4.1 Vytvoření s-funkce dvou trychtýřových zásobníků na kapalinu

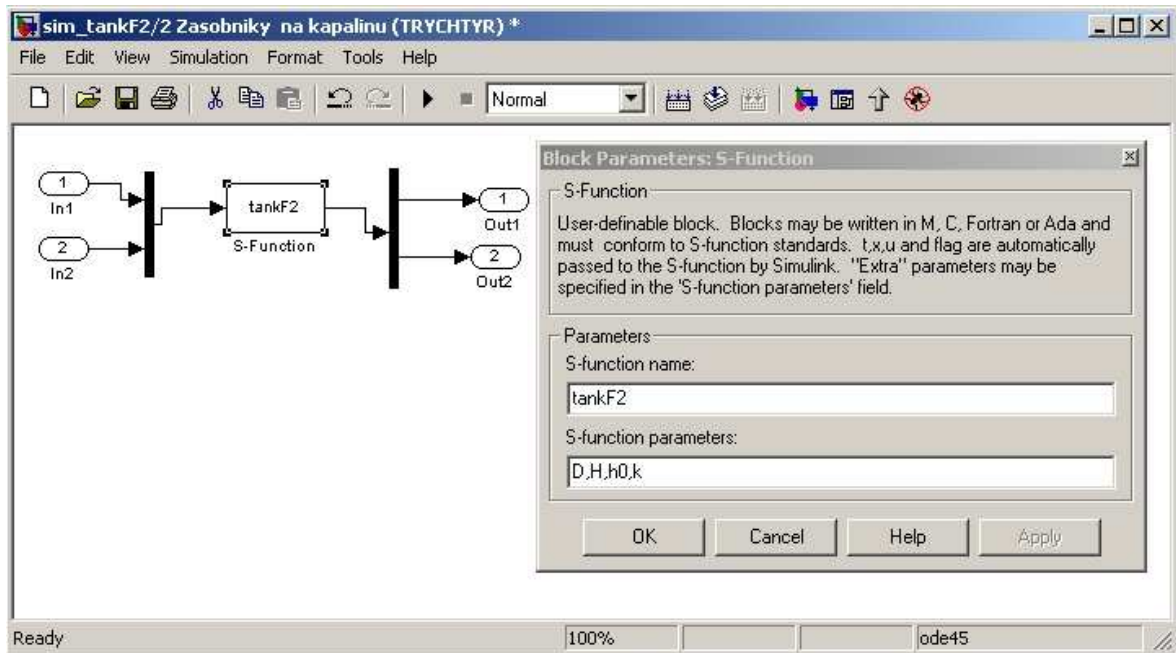
Vyjdeme z matematického popisu dvou trychtýřových zásobníku, rovnice(14). Jde o dvě diferenciální rovnice.

S-funkce se nachází v Simulinku v části *simulink* a *user-defined function*. Po založení nového simulačního schématu ji tam přesuneme. Poklepáním levým tlačítkem myši se dostaneme do položky s názvem s-funkce. Název je důležitý, protože tím se propojí s-funkce s příslušným m-filem, který bude mít stejné jméno jako s-funkce. Na Obr.14 je vidět blok s-funkce a její vlastnosti. Do pole *S-function parameters* se píše názvy proměnných, které lze předávat z s-funkce do m-filu.



Obr. 14 Schéma s-funkce s parametry

Pokud máme zájem přidat potřebný počet vstupů a výstupů, provedeme to pomocí bloků *mux* a *demux*, které se nacházejí v sekci *simulink-signal routing*. Pro požadovaný počet vstupů stačí kliknout na blok a zde změnit počet vstupů. Pro náš případ vypadá s-funkce podle Obr.15. Jsou zde dva vstupy a dva výstupy.



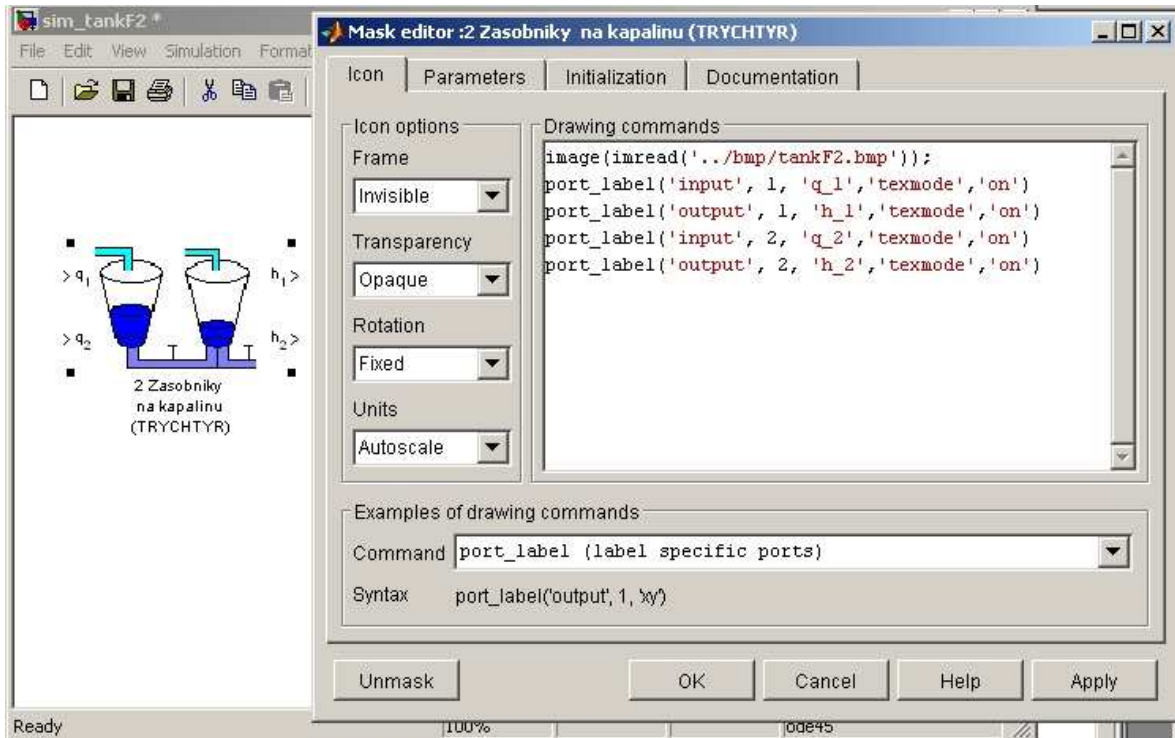
Obr. 15 S-funkce pro dva trychtýřové zásobníky

V jednotlivých proměnných se předávají hodnoty vrchních průřezů zásobníků, výšky zásobníků atd. Označením bloků, kliknutím pravým tlačítkem myši a vybráním položky *create subsystem*, se vytvoří jeden blok se 2 vstupy a 2 výstupy. Dále lze tento blok upravovat a to tak, že pravým tlačítkem klikneme na blok a vybereme položku *edit mask*. Otevře se okno *mask editoru*. V tomto editoru se dají měnit názvy vstupů, dá se načíst obrázek na pozadí bloku atd. K tomu slouží příkazy:

`image(imread('tankC2.bmp'))`; vloží obrázek na pozadí bloku

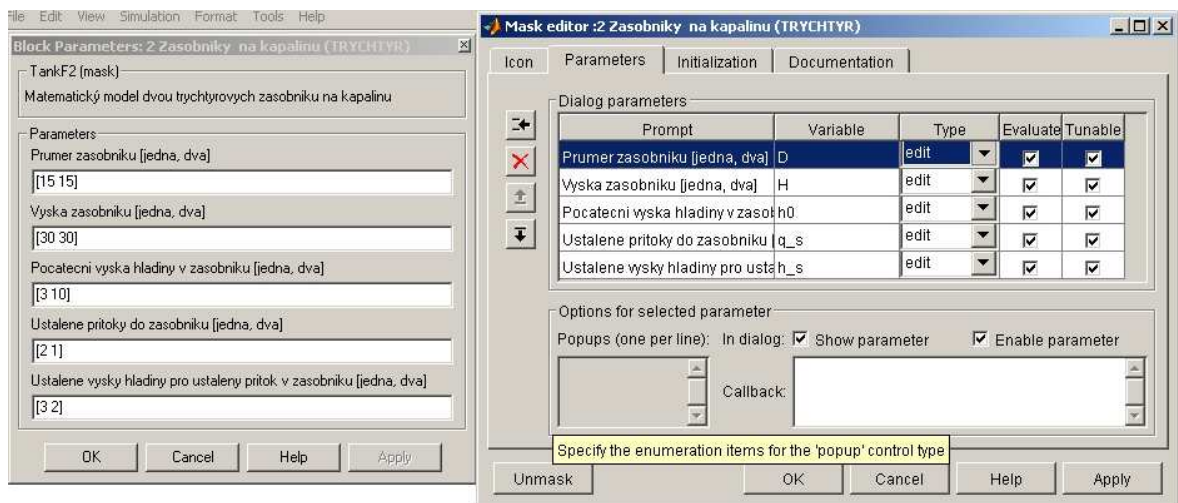
`port_label('input',1,'q_1','texmode','on')`; pojmenuje první vstup jako q_1 , *texmode* se tady používá pro zobrazení dolních indexů.

Zmíněné příkazy je vidět na Obr.16



Obr. 16 Vytvořený blok se 2 vstupy a 2 výstupy a konfigurační okno mask editoru

K vytvoření menu na Obr.17 se využije záložky *parameters*, kde je možný slovní popis zadávaného parametru a k tomu se přiřadí proměnná, která se pak může předat do m-filu. Do menu se dá dostat kliknutím levého tlačítka myši na blok.

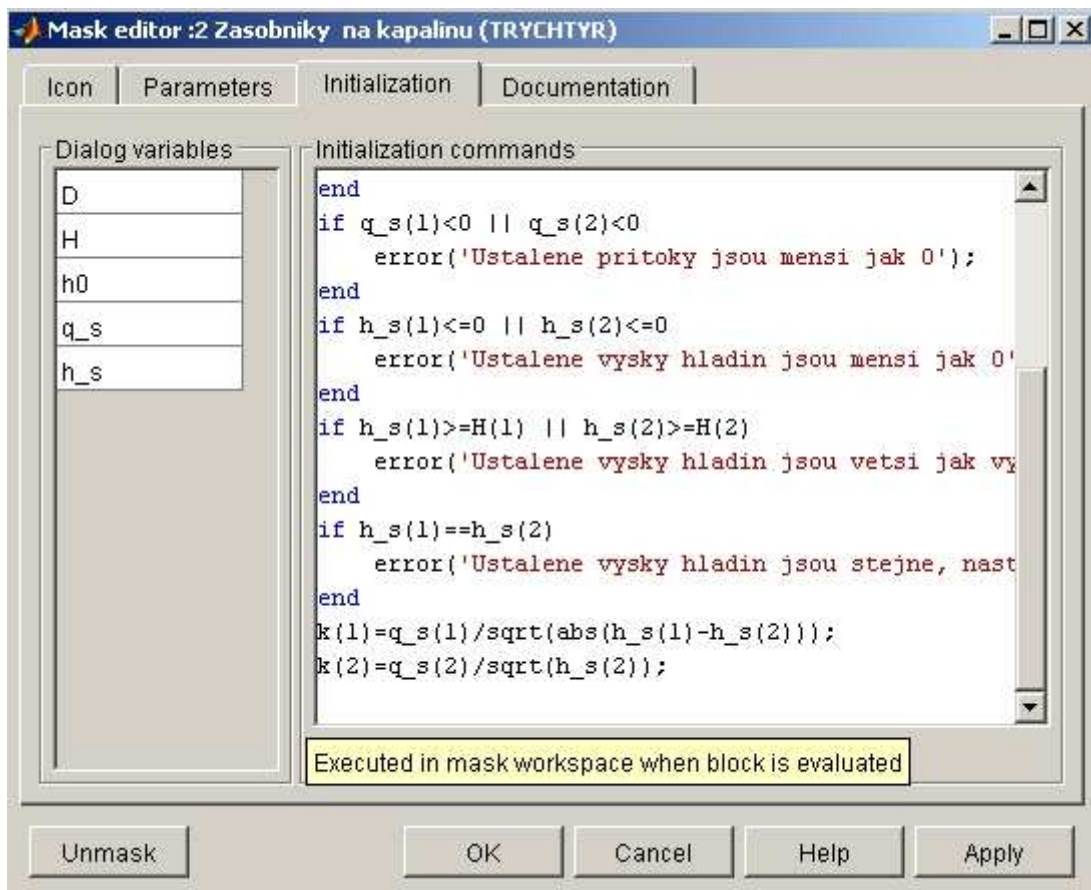


Obr. 17 Vytvoření menu

Záložka *Initialization* se používá pro inicializaci konstant bloku, v tomto případě jde o výpočet konstant ventilů, které se předávají do příslušné S-funce. Dále ho lze použít pro ošetření vstupních parametrů bloku. Jsou zde testovány přípustné rozsahy:

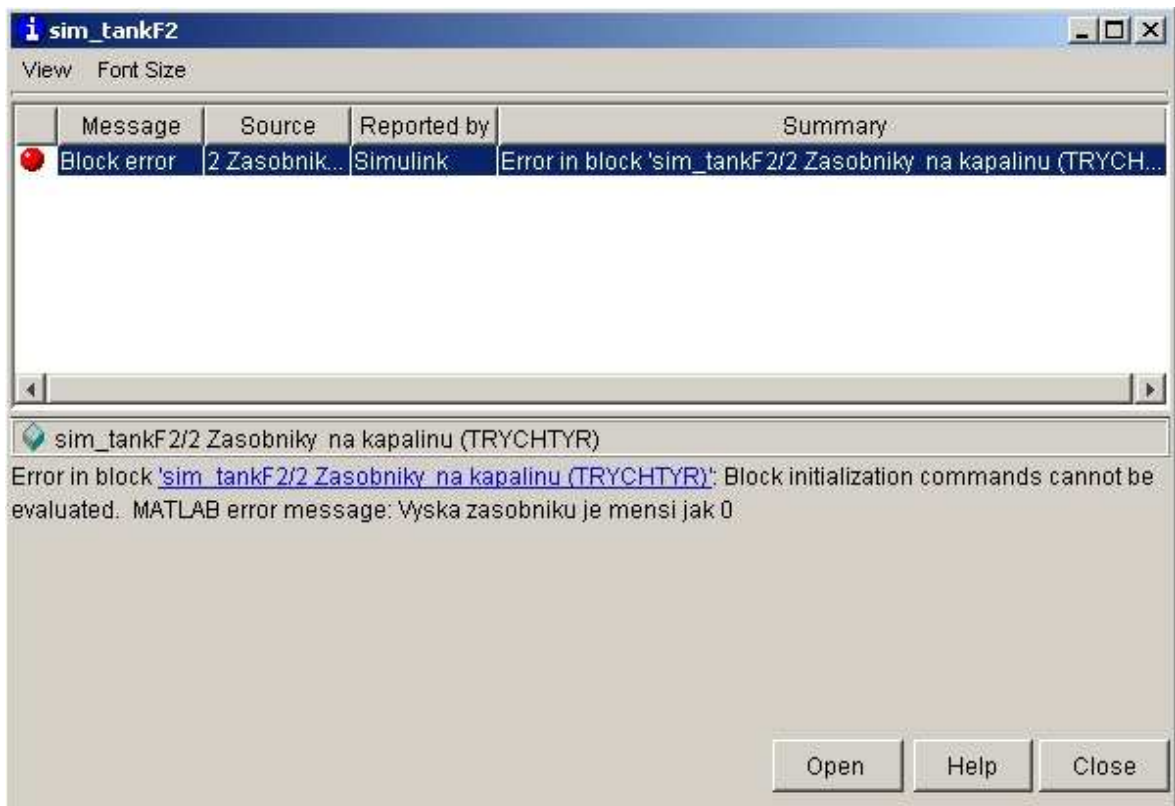
Název	Označení	Doporučená jednotka	Přípustný rozsah
Vrchní průměr zásobníků	D_1, D_2	[m]	$D_1, D_2 > 0$
Výška zásobníků	H_1, H_2	[m]	$H_1, H_2 > 0$
Počáteční výšky hladin	h_{01}, h_{02}	[m]	$(0; H_1), (0; H_2)$
Ustálené přítoky	q_{1v}^s, q_{2v}^s	[m ³ /s]	$q_{1v}^s, q_{2v}^s > 0$
Ustálené výšky hladin odpovídající zadaným q_{1v}^s, q_{2v}^s	h_1^s, h_2^s	[m]	$(0; H_1), (0; H_2)$

Tab. 13 Parametry bloku a jejich přípustné hodnoty



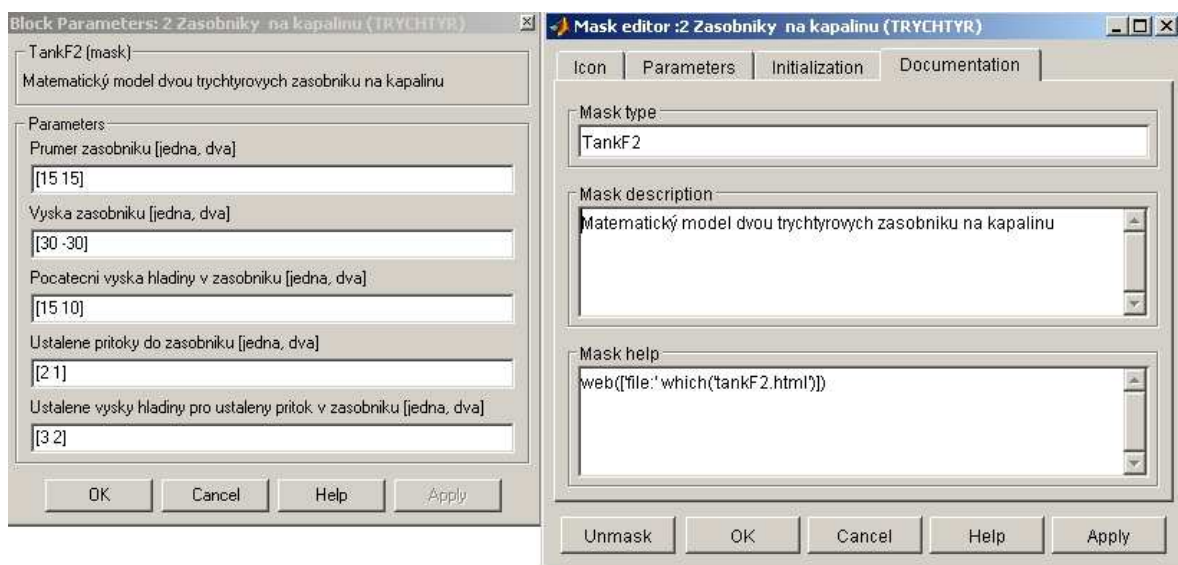
Obr. 18 Záložka Intialization

V případě nesplnění daných podmínek Matlab nahlásí chybu a nedojde ke spuštění simulace, dokud se chyba neodstraní.



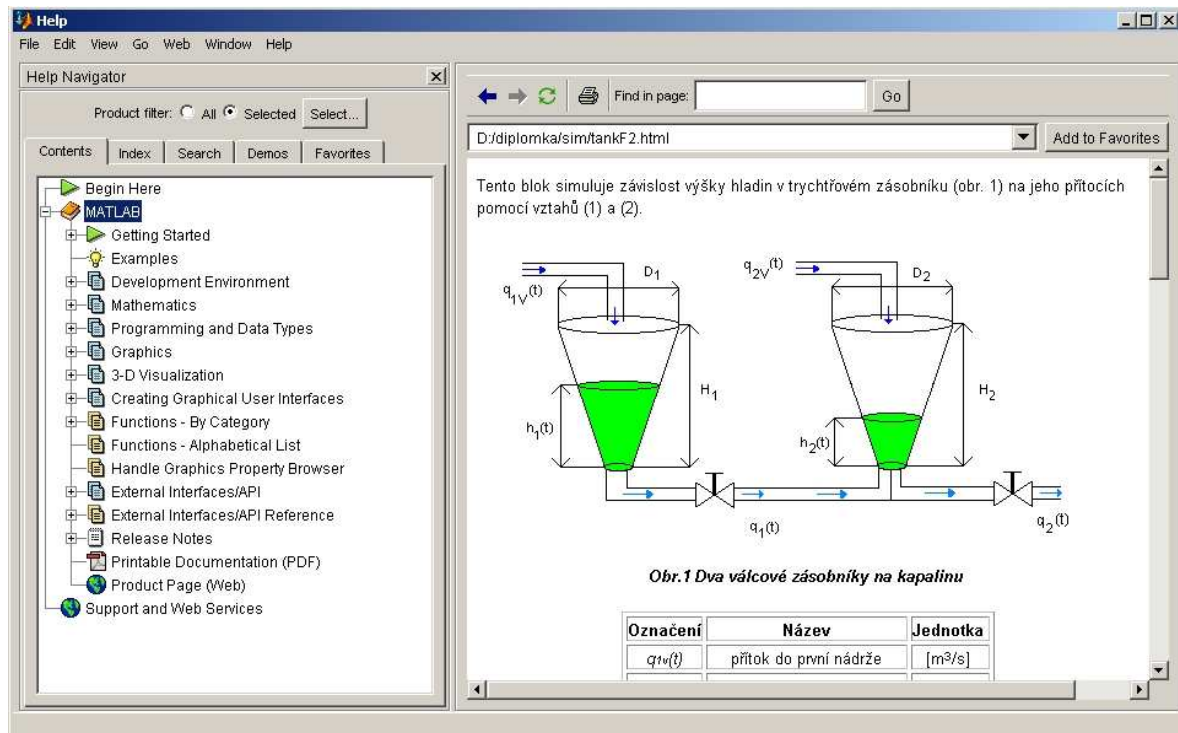
Obr. 19 Chybová hláška

Záložka Documentation slouží k popisu bloku a je zde možnost vytvoření nápovědy k bloku.



Obr. 20 Záložka Documentation a její vliv na popis bloku

K jednotlivým blokům byla vytvořena nápověda, která se spustí po klepnutí na tlačítko help v bloku pro nastavení parametrů zásobníku. Nápověda je tvořena souborem *tankF2.html*. V tomto souboru je pomocí HTML [6] jazyka naformátována nápověda, která je zobrazena Matlabem viz Obr.21.



Obr. 21 Nápověda pro dva trychtřové zásobníky na kapalinu

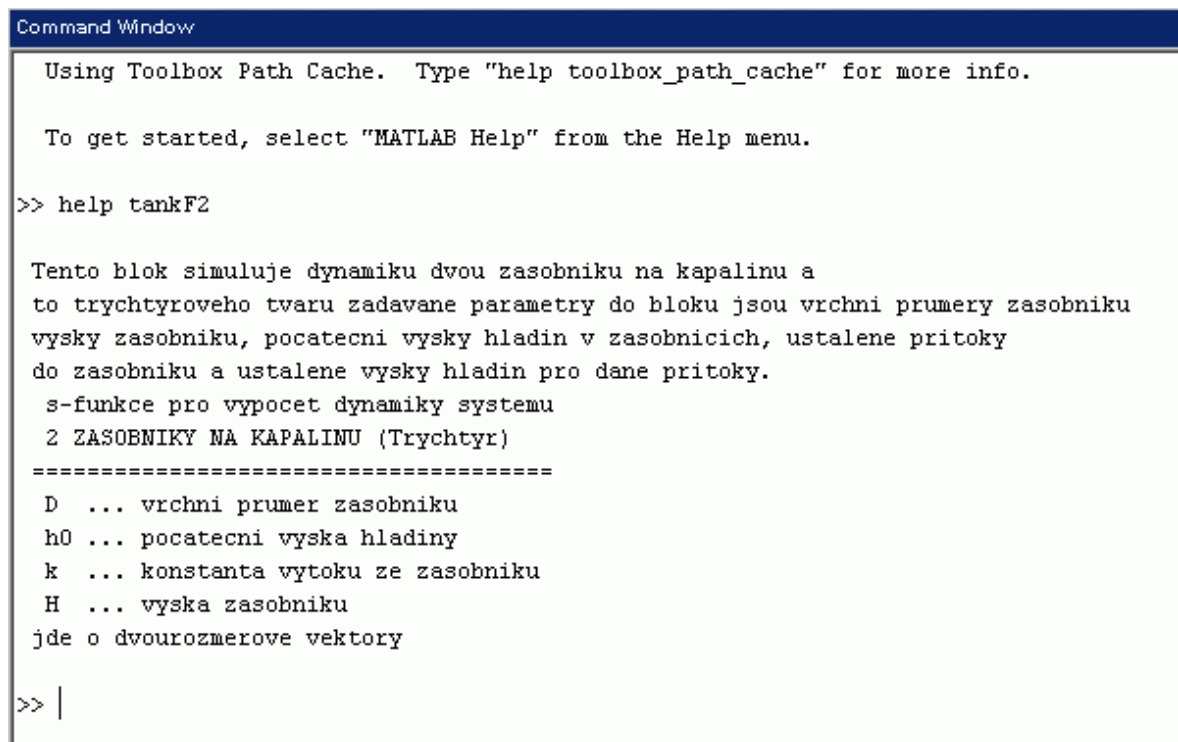
4.2 Struktura vytvořeného m-filu

```
1 function [sys,x0,str,ts] = tankF2(t,x,u,flag, D,H, h0, k)
2
3 %Tento blok simuluje dynamiku dvou zasobniku na kapalinu a
4 %to trychtyroveho tvaru, zadavane parametry do bloku jsou prurez
  zasobniku
5 %vysky zasobniku, pocatecni vysky hladin v zasobnicich, ustalene
  pritoky
6 %do zasobniku a ustalene vysky hladin pro dane pritoky.
7 %s-funkce pro vypocet dynamiky systemu
8 % 2 ZASOBNIKY NA KAPALINU (TRYCHTYR)
9 %=====
10 % D ... vrchni prumer zasobniku
11 % h0 ... pocatecni vyska hladiny
12 % k ... konstanta vytoku ze zasobniku
13 % H ... vyska zasobniku
14 %jde o dvourozmerove vektory
15 switch flag,
16
17 case 0
18     [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(h0); % Inicializace
19
20 case 1
21     sys = mdlDerivatives(t,x,u, D,H, k); % vypocet derivaci
22
23 case 3
24     sys = mdlOutputs(t,x,u, H); % vypocet vystupu
25
26 case { 2, 4, 9 } % nepouzite flagy
27     sys = [];
28
29 otherwise
30     error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]); % Chyba obsluhy
31
32 end
33
34
35
36
37
38
```

```
39 %=====
40 % mdlInitializeSizes
41 % Vratí rozmery, počatec. podminky a periody vzorkovani pro
42 % S-funkci.
43 %=====
44 function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(h0)
45
46 sizes = simsizes;
47 sizes.NumContStates = 2;      % počet spojitych stavu h1(t),h2(t)
48 sizes.NumDiscStates = 0;     % počet diskretnich stavu
49 sizes.NumOutputs     = 2;     % počet vystupu - vystupem, co nas
    zajima, bude vyska hladiny h1(t) a h2(t)
50 sizes.NumInputs      = 2;     % počet vstupu - : qi1(t) a qi2(t)
51 sizes.DirFeedthrough = 0;     % '0' jestlize se ve vystupu
    nepouziva vstupni signal, '1' kdyz jo
52 sizes.NumSampleTimes = 1;     % pocet period vzorkovani (min. 1)
53 sys = simsizes(sizes);
54
55 % Inicializace pocatecnich podminek
56 x0(1) = h0(1);
57 x0(2) = h0(2);
58
59 % retezec razeni stavu - obecne specifikovany jako []
60 str = [];
61
62 ts = [0 0]; % perioda vzorkovani a offset, pro spojite systemy [0
    0]
63
64
65 %=====
66 % mdlDerivatives
67 % Vratí derivace spojitych stavu
68 %=====
69 function sys = mdlDerivatives(t,x,u, D,H, k)
70
71
72 if x(1)>=H(1)
73     x(1)=H(1);
74 end
75 if x(2)>=H(2)
76     x(2)=H(2);
77 end
```

```
78 if x(1)<0.01*H(1)
79     x(1)=0.01*H(1);
80 end
81 if x(2)<0.01*H(2)
82     x(2)=0.01*H(2);
83 end
84 if x(1)>=x(2)
85
86     sys(1) =(4*H(1)*H(1))*(u(1)-k(1)*sqrt(abs(x(1)-
x(2))))/((pi*D(1)*D(1)*x(1)*x(1)));
87     sys(2) =(4*H(2)*H(2))*(u(2)+k(1)*sqrt(abs(x(1)-x(2)))-
k(2)*sqrt(x(2)))/((pi*D(2)*D(2)*x(2)*x(2)));
88 end
89 if x(2)>x(1)
90     sys(1) =(u(1)+k(1)*sqrt(abs(x(1)-
x(2))))/((pi*D(1)*D(1)*x(1)*x(1))/(4*H(1)*H(1)));
91     sys(2) =(u(2)-k(1)*sqrt(abs(x(1)-x(2)))-
k(2)*sqrt(x(2)))/((pi*D(2)*D(2)*x(2)*x(2))/(4*H(2)*H(2)));
92 end
93
94
95
96 %=====
97 % mdlOutputs
98 % Vratí vystup bloku
99 %=====
100 %
101 function sys = mdlOutputs(t,x,u, H)
102 if x(1)>=H(1)
103     x(1)=H(1);
104 end
105 if x(2)>=H(2)
106     x(2)=H(2);
107 end
108 if x(1)<0.01*H(1)
109     x(1)=0.01*H(1);
110 end
111 if x(2)<0.01*H(2)
112     x(2)=0.01*H(2);
113 end
114 sys(1)=x(1);
115 sys(2)=x(2);
```

Na prvním řádku se nachází jméno s-funkce, které musí být stejné jako v Simulinku při vytváření s-funkce. V závorkách se nacházejí jednotlivé proměnné důležité je pořadí těchto proměnných D, H, h_0, k , musí odpovídat pořadí proměnných v s-funkci v Simulinku. Řádky 3 -14 slouží pro popis bloku. Zapsáním příkazu `help tankF2` do Matlabu se zobrazí právě tyto řádky viz Obr.22.



```

Command Window

Using Toolbox Path Cache. Type "help toolbox_path_cache" for more info.

To get started, select "MATLAB Help" from the Help menu.

>> help tankF2

Tento blok simuluje dynamiku dvou zásobníků na kapalinu a
to trychtýřového tvaru zadavane parametry do bloku jsou vrchni průmery zásobníků
výšky zásobníků, počáteční výšky hladin v zásobnících, ustalene přítoky
do zásobníků a ustalene výšky hladin pro dane přítoky.
s-funkce pro výpočet dynamiky systému
2 ZASOBNIKY NA KAPALINU (Trychtýř)
=====
D ... vrchni průměr zásobníku
h0 ... počáteční výška hladiny
k ... konstanta výtoku ze zásobníku
H ... výška zásobníku
jde o dvourozměrové vektory

>> |

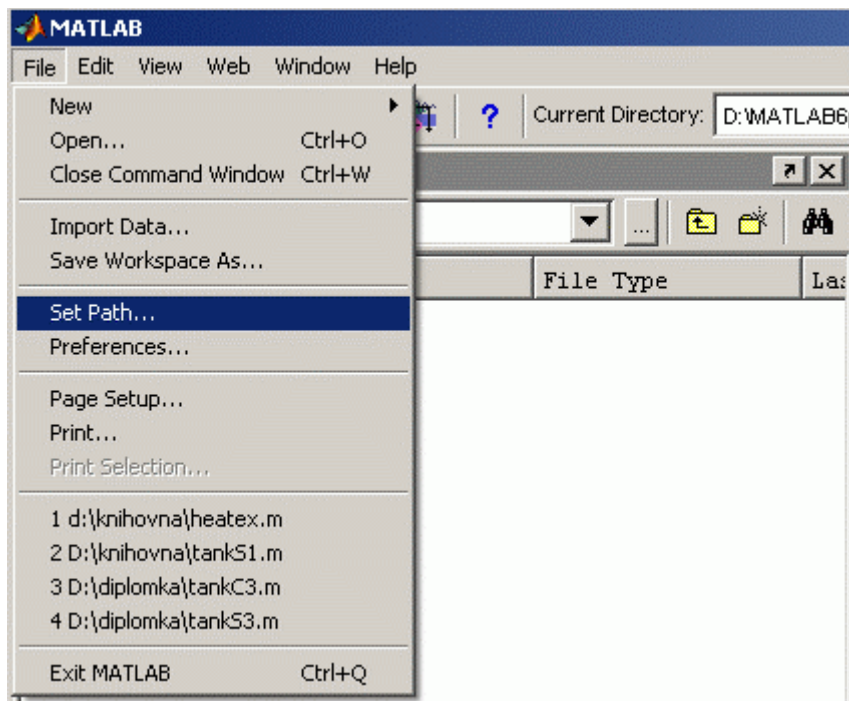
```

Obr. 22 Ukázka příkazu `help tankF2`

Na řádcích 15 -32 se testuje proměnná *flag*, podle které se volají jednotlivé procedury. Na řádcích 44-64 se nachází definice inicializace- zde se definují počty vstupů, výstupů, stavů, zda jde o systém diskrétní nebo spojitý. Taky jsou zde počáteční podmínky. Na řádcích 69- 95 je definována diferenciální rovnice popisující dynamiku daného procesu. Jsou zde také ošetřeny podmínky, kdy vycházejí výšky hladin menší jak definovaná mez, nebo větší jak výška zásobníku. Na řádcích 101 až 112 je definován výstup z s-funkce. Všechny další bloky technologických procesů jsou realizovány obdobným zápisem s-funkce.

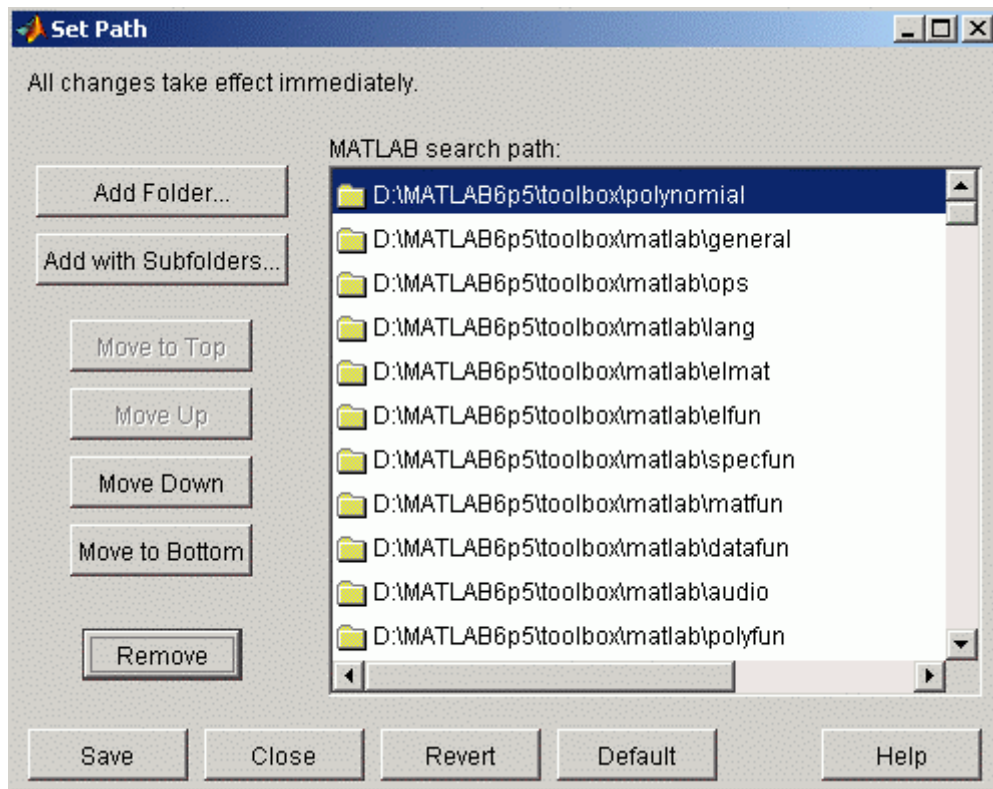
4.3 Instalace knihovny

Získání knihovny: Knihovna se nachází na CD, které je přiložené k této diplomové práci. Dále je možné si o ni napsat na pisanr@seznam.cz. Do budoucna, po důkladném otestování, se počítá její umístění na univerzitní web. Vlastní instalace spočívá v tom, že vezmete soubor *knihovna_tech_procesu.zip* a rozbalíte ho buď přímo do Matlabu na obvyklé místo, kde se nachází toolboxy do adresáře který si tam vytvoříte např. *matlabroot/toolbox*, nebo je možné kdekoli na disku si vytvořit adresář a do toho knihovnu rozbalit. Po té se spustí programové prostředí Matlab. V něm klikněte na *file* a vyberte položku *Set Path* viz Obr.23.



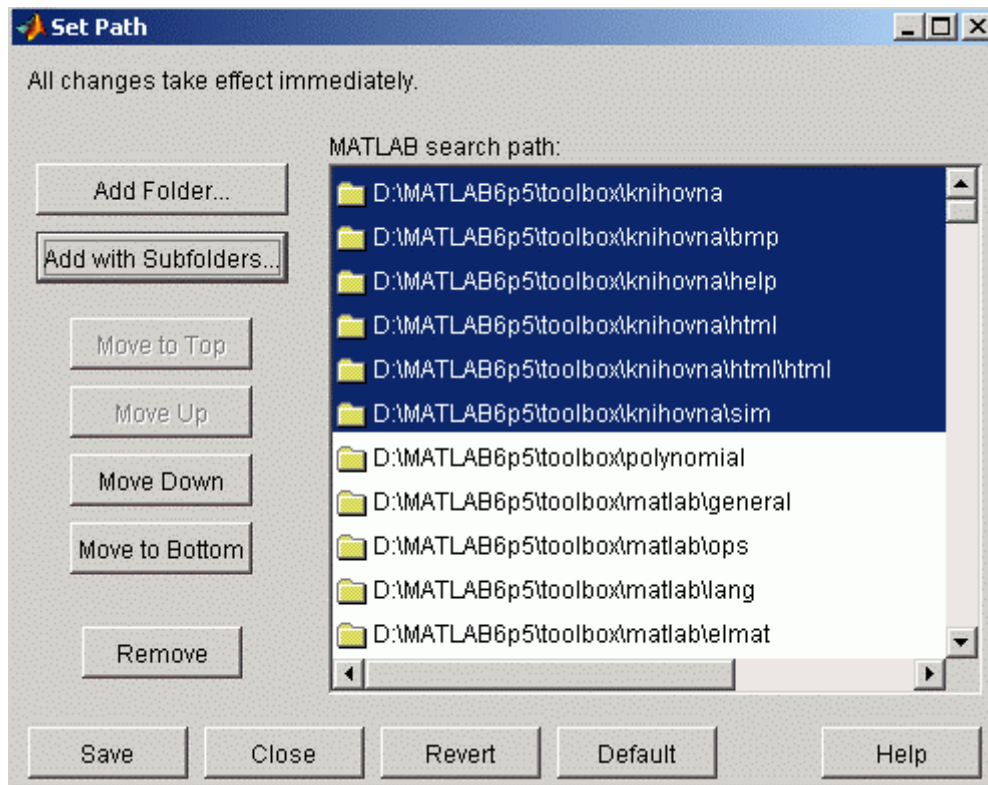
Obr. 23 Položka file v Matlabu

Po té se zobrazí nové okno, které je na Obr.24



Obr. 24 Okno Set Path

Tady z nabídky na pravé straně vyberete *Add with Subfolders*, vložíte tak cestu k adresáři kde máte knihovnu rozbalenou - v našem případě *matlabroot/toolbox/knihovna*, potvrdíte tlačítkem *Ok* a do *Set Path* se vám vloží cesty ke knihovně, jak můžete vidět na Obr.25.

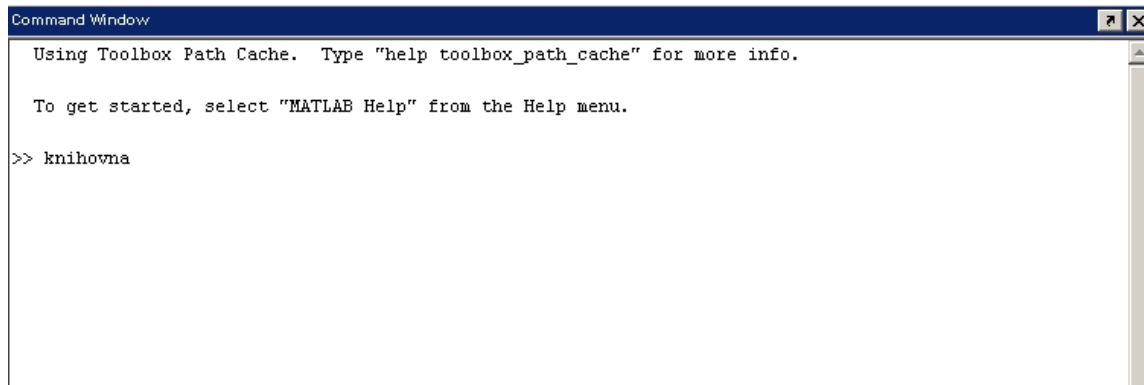


Obr. 25 Okno Set Path s instalovanou cestou ke knihovně

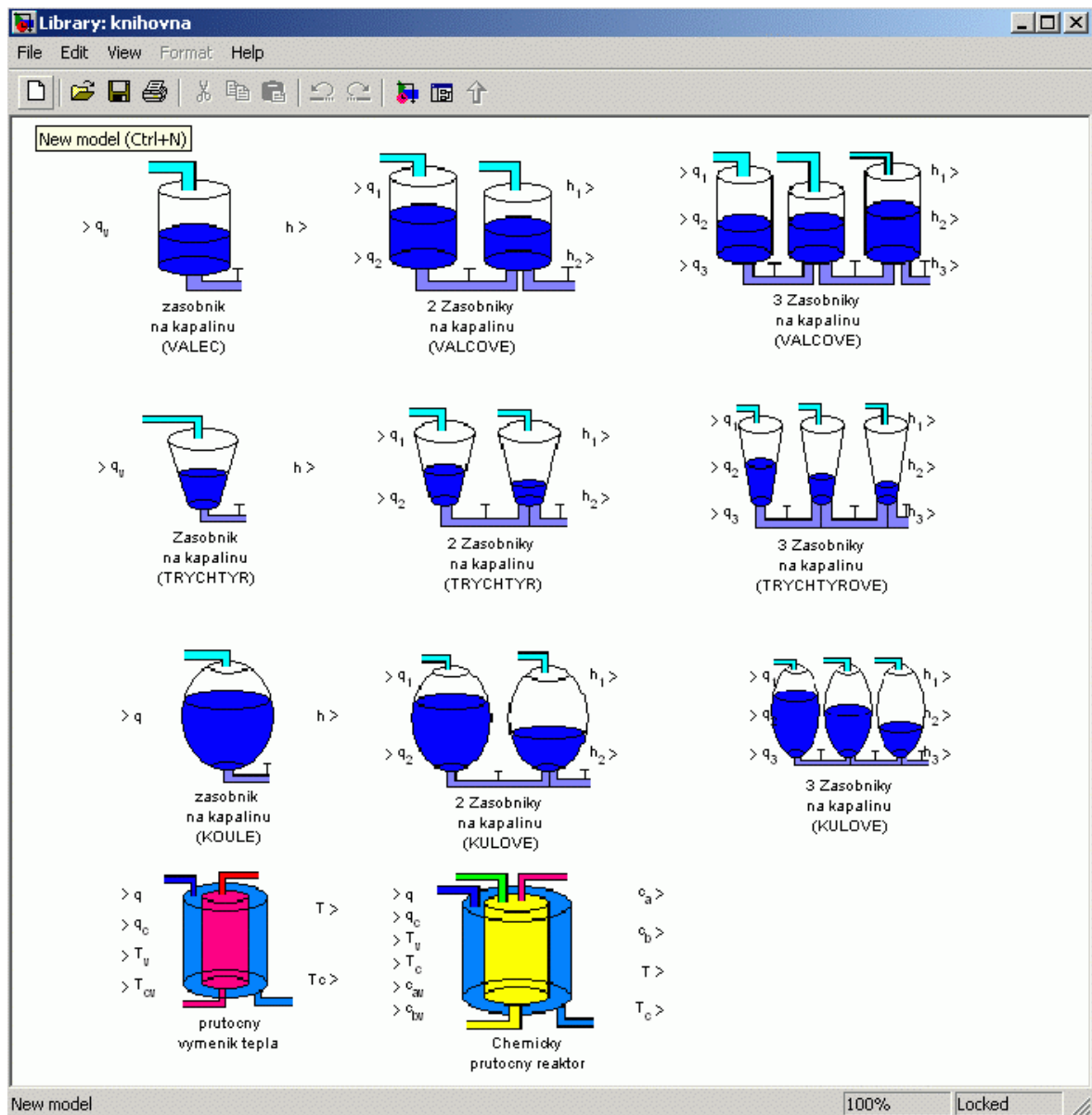
Nyní pro uložení zmáčkne tlačítko *Save* a pak tlačítko *Close* tím byla instalace knihovny dokončena

4.4 Práce s knihovnou

Spustíme programové prostředí Matlab. Bloky modelů se nachází v souboru *knihovna.mdl*. Proto stačí napsat do command window *knihovna* viz Obr.26, potvrdit enterem a knihovna se otevře. Pak už stačí otevřít nové Simulinkové schéma *file- new- Model*, nebo kliknout na ikonu prázdného bílého papíru viz Obr.27, nebo použít klávesovou zkratku CTL+N. Po otevření nového okna stačí blok z knihovny vzít a přetáhnout do nového simulačního okna. Pak k němu připojit další bloky s prostředí Matlab/Simulink. Parametry bloku se mění kliknutím myši na blok



Obr. 26 Spuštění knihovny



Obr. 27 Knihovna modelů

5 UKÁZKY SIMULACÍ

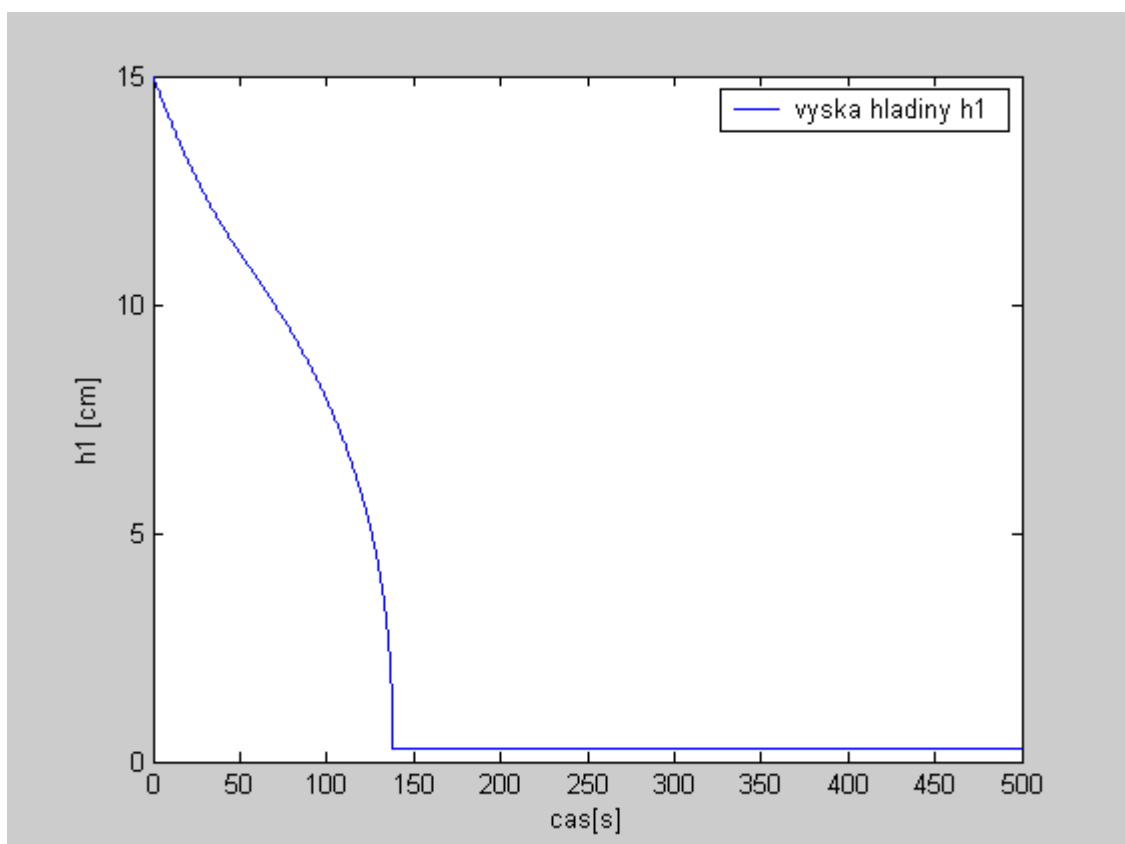
5.1 Dva trychtýřové zásobníky na kapalinu

Nastavení parametrů bloku:

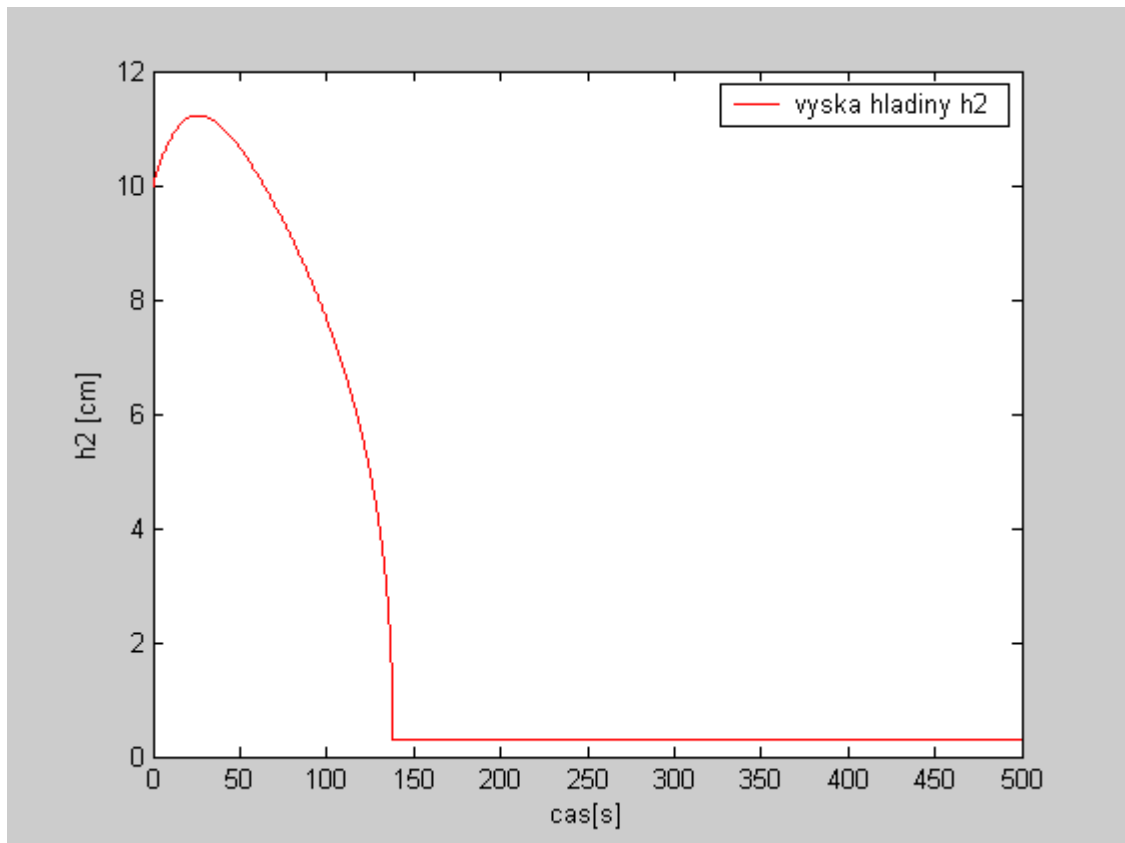
Název	Hodnota
Vrchní průměry zásobníků	[15 15]cm
Výšky zásobníků	[30 30]cm
Počáteční výšky hladin	[15 10]cm
Ustálené přítoky	[2 1]cm ³ /s
Ustálené výšky hladin odpovídající zadaným q_{1v}^s, q_{2v}^s	[3 2]cm

Tab. 14 Nastavení parametrů bloku pro dva trychtýřové zásobníky

Jako vstupní průtoky byly zvoleny nulové přítoky, jde o vypouštění zásobníku.



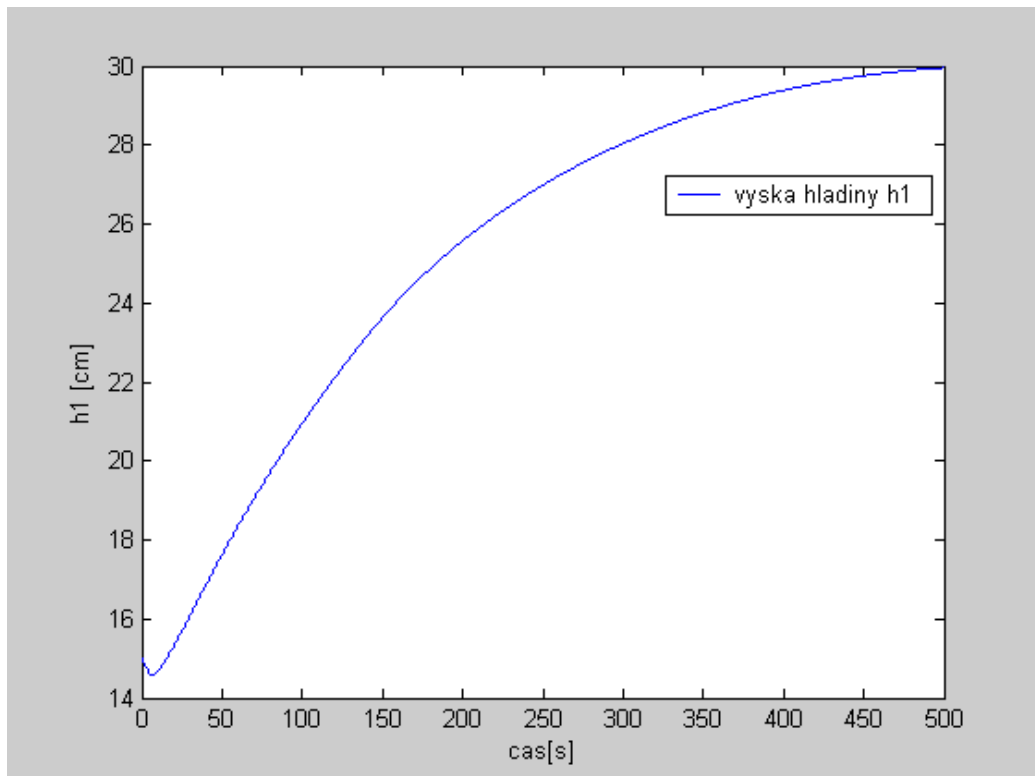
Obr. 28 Výška hladiny v prvním zásobníku při nulovém průtoku



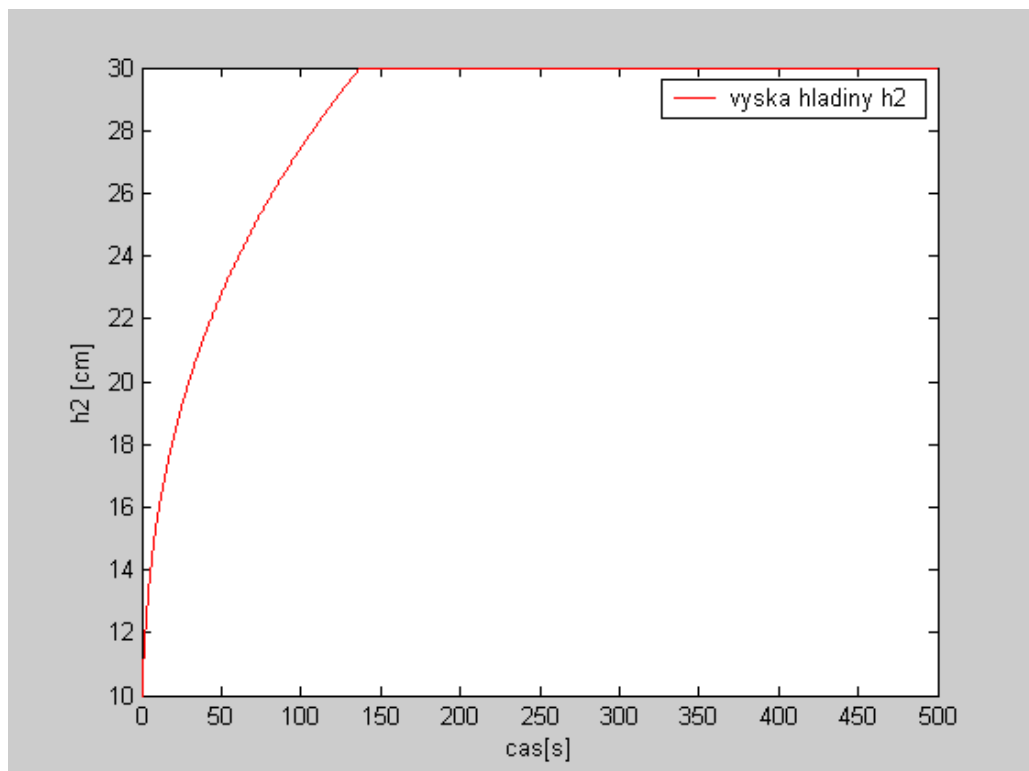
Obr. 29 Výška v zásobníku dva při nulovém průtoku

Jak jde vidět z Obr. 28 a Obr. 29 jsou počáteční výšky hladin různé, první zásobník se vypouští, ale druhý zásobník se ještě nějakou dobu napouští, než se výšky hladin vyrovnají.

Parametry zůstávají stejné, přítok do prvního zásobníku je roven nule přítok do druhého zásobníku je $20 \text{ cm}^3/\text{s}$. Výsledky simulace jsou na Obr.30 a 31



Obr.30 Výška hladiny v prvním zásobníku při nulovém prvním průtoku a nenulovém druhém přítoku



Obr. 31 Výška hladiny ve druhém zásobníku při nulovém prvním přítoku a nenulovém druhém přítoku

Jak je vidět z Obr.30 a Obr.31 je model udělán tak, že pokud je výška hladiny ve druhém zásobníku větší, průtok mezi nimi se mění a kapalina přetéká zpět do prvního zásobníku, který se napouští.

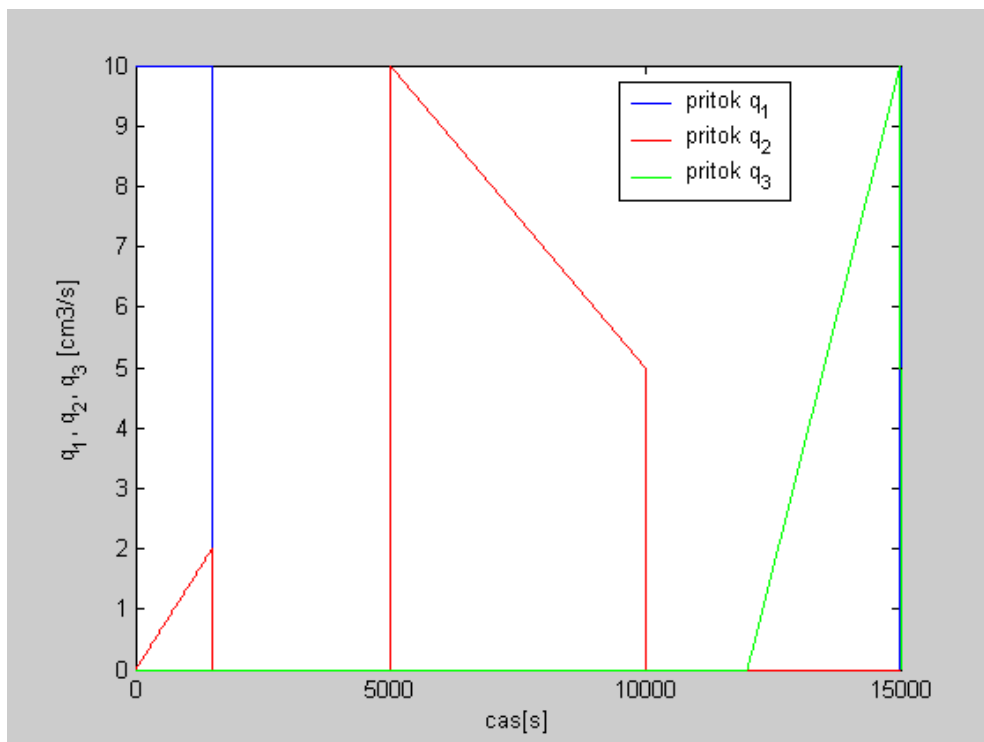
5.2 Tři válcové zásobníky na kapalinu

Nastavení parametrů bloku:

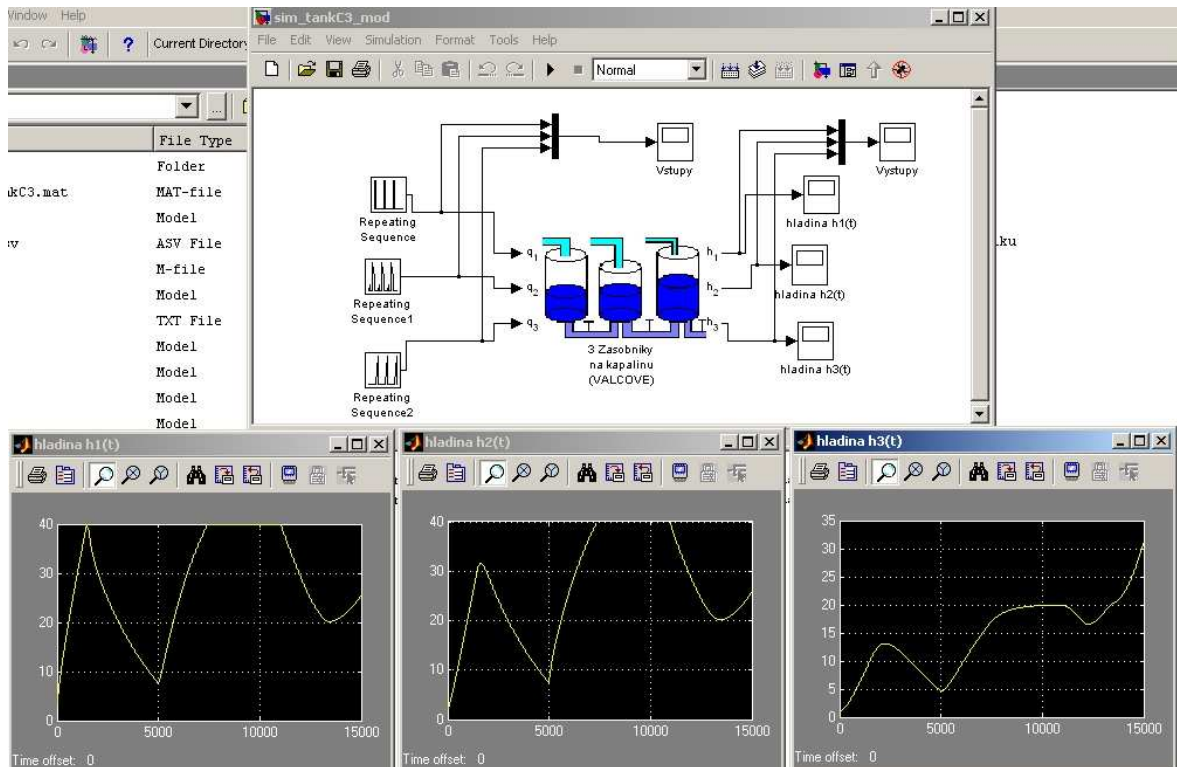
Název	Hodnota
Průměry zásobníků	[15 15 15]cm
Výšky zásobníků	[40 40 40]cm
Počáteční výšky hladin	[3 2 1]cm
Ustálené přítoky	[2 1 1]cm ³ /s
Ustálené výšky hladin odpovídající zadaným $q_{1v}^s, q_{2v}^s, q_{3v}^s$	[3 2 1]cm

Tab. 15 Parametry bloku pro tři válcové zásobníky

Časové průběhy jednotlivých vstupních průtoků můžete vidět na Obr.32

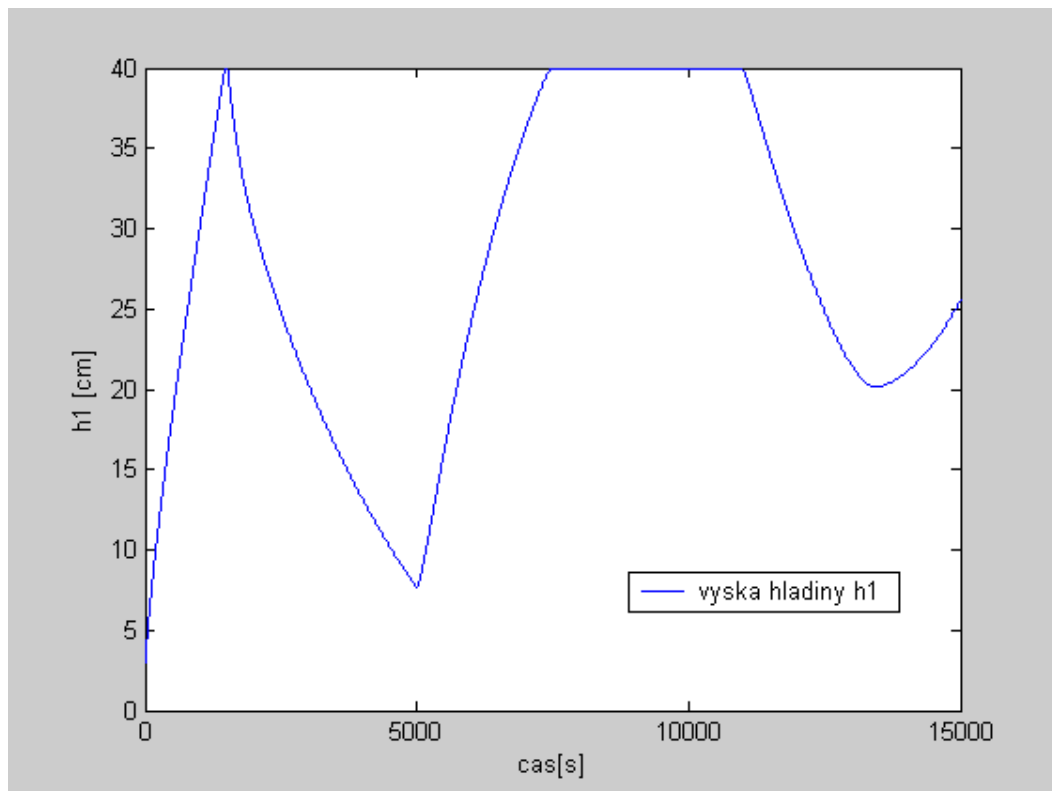


Obr. 32 Vstupy do bloku tři válcové zásobníky na kapalinu

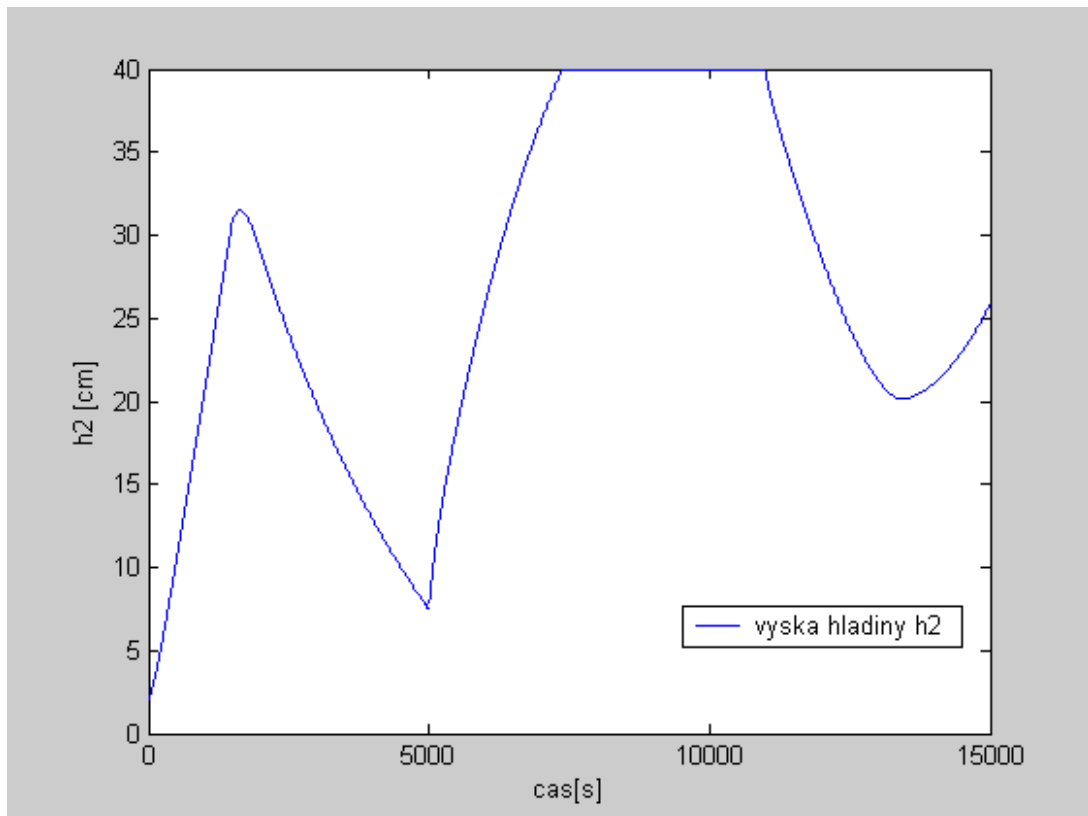


Obr. 33 Simulinkové schéma modelu

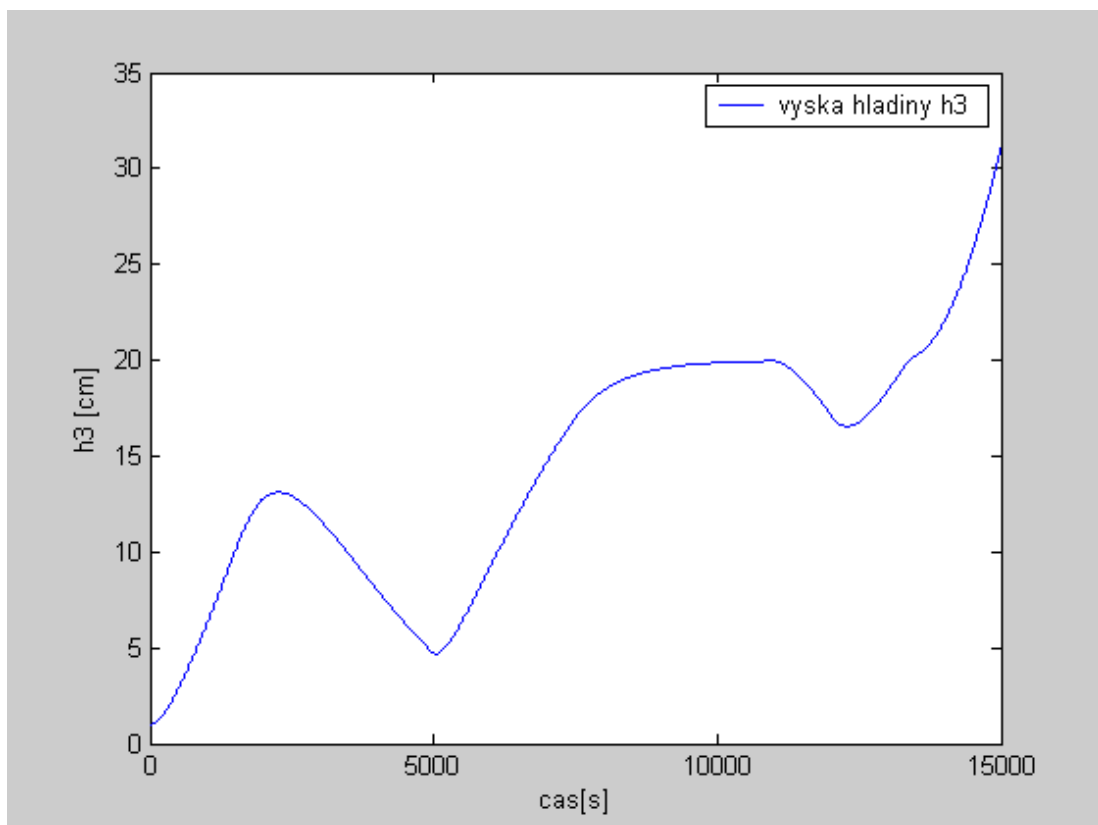
Výsledky simulace a zobrazení výšek hladin:



Obr. 34 Výška hladiny v prvním zásobníku



Obr. 35 Výška hladiny v druhém zásobníku



Obr. 36 Výška hladiny ve třetím zásobníku

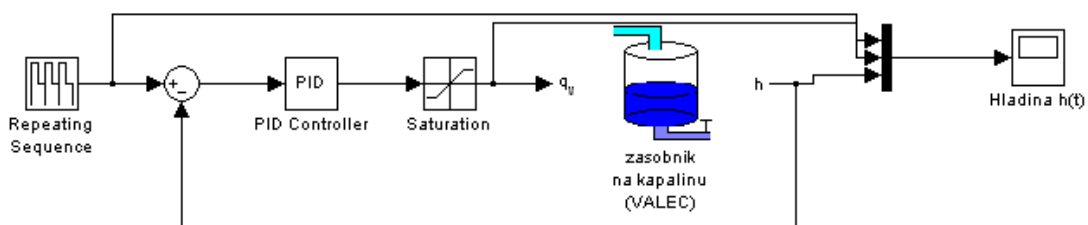
Na Obr.33- 36 se nachází grafický průběh výšek hladin jednotlivých zásobníku, pro různé vstupní průtoky.

5.3 Experiment na reálném modelu

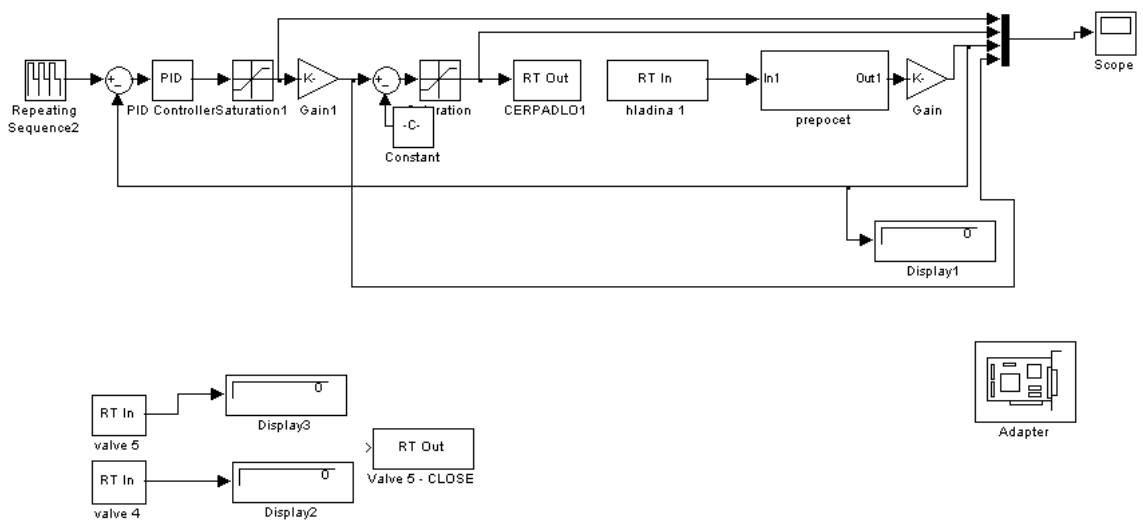
Pro ověření chování vytvořeného matematického modelu s reálným systémem byl zvolen laboratorní model DTS 200 [1], což je systém tří nádrží, u kterého byl vybrán jen jeden zásobník – ten byl porovnán s odpovídajícím matem. modelem (zásobník na kapalinu-VÁLEC). Ovládání nádrže je prostřednictvím programu Matlab/Simulink a to použitím Real-time toolbox. Na Obr.38 je vidět schéma, které bylo použito pro regulaci výšky hladiny. Pro určení konstanty ventilu byla pro ustálený vstupní přítok naměřena ustálená výška hladiny. Ustálený přítok byl $44.51 \text{ cm}^3/\text{s}$ a ustálená výška 21.8 cm. Dále byl použit PID regulátor, který měl stejné parametry jak u simulačního, tak u laboratorního modelu.

Název	Hodnota
Průměr zásobníku	14 cm
Výška zásobníku	60 cm
Počáteční výška hladiny	0 cm
Ustálený přítok	$44.51 \text{ cm}^3/\text{s}$
Ustálená výška hladiny odpovídající zadanému q_v^3	21.8 cm

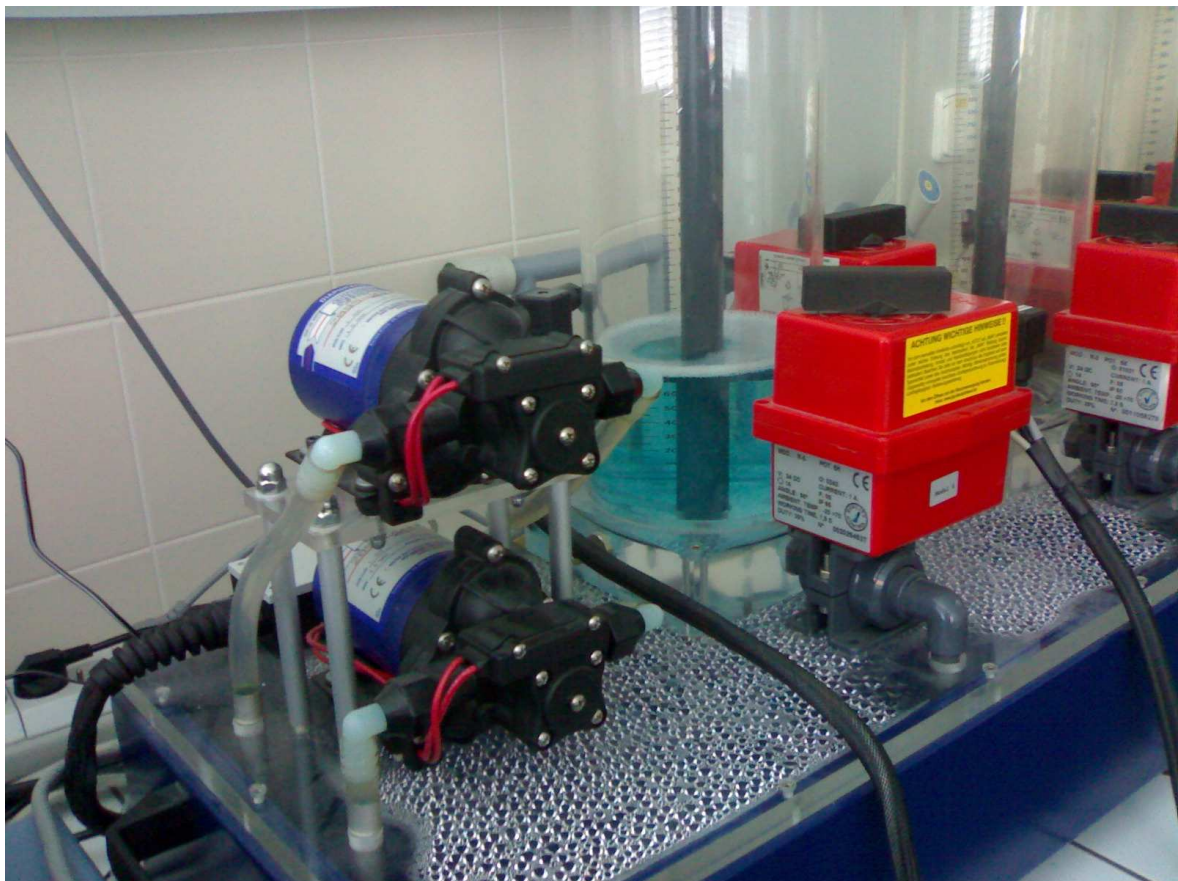
Tab. 16 Parametry zásobníku



Obr. 37 Zapojení bloku zásobník na kapalinu do regulačního schématu

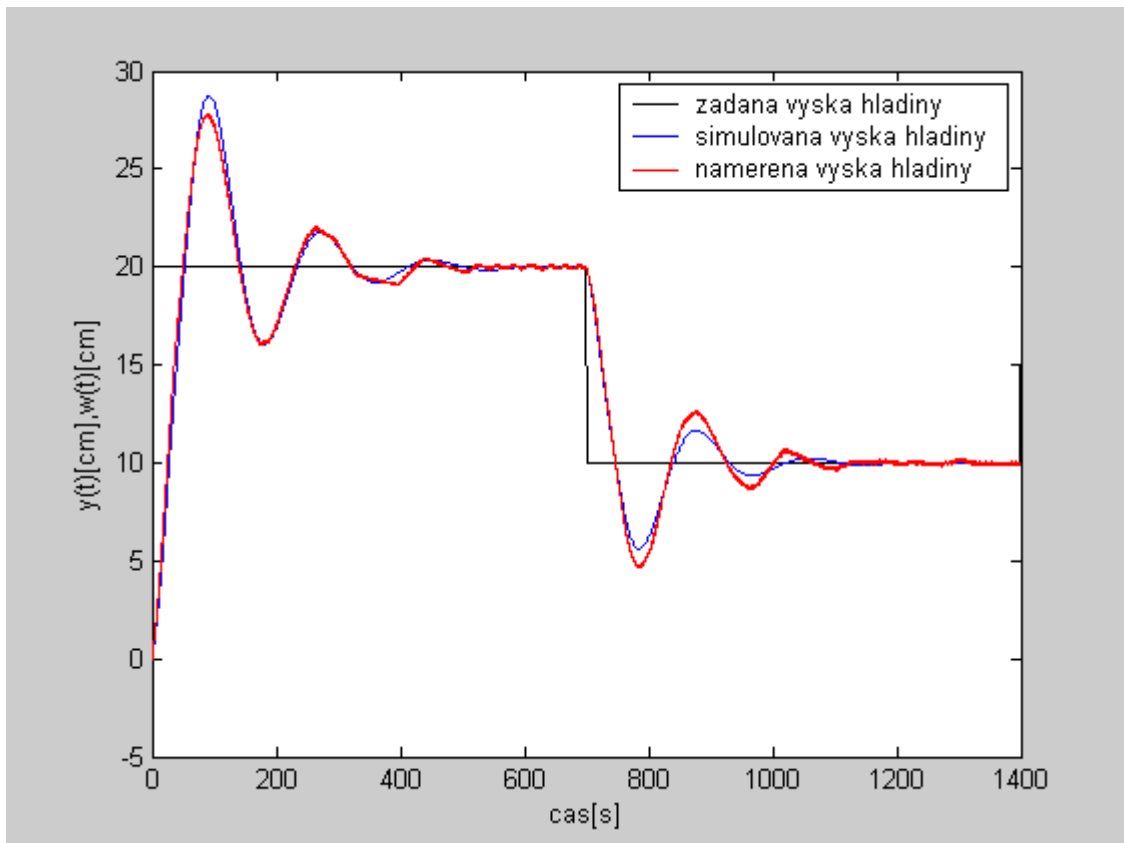


Obr. 38 Vytvořené schéma pro měření na zásobníku



Obr. 39 Laboratorní model DTS 200

Na Obr. 40 se nachází porovnání regulace mezi simulačním modelem a reálným laboratorním zařízením. Z průběhů můžeme usoudit, že navržený matematický model se chová velmi podobně jako reálný laboratorní model.



Obr. 40 Porovnání simulace s reálným měřením

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření knihovny vybraných technologických procesů. Jako programové prostředí pro tuto knihovnu byl zvolen program Matlab/Simulink. Knihovna je vytvořena na základě matematických modelů popsanych v teoretické části.

Na základě principů modelování jsou odvozeny matematické modely. Jde o modely průtočného výměníku tepla, průtočného chemického reaktoru a dále zásobníků na kapalinu a to ve tvaru válcovém, trychtýřovém a kulovém. Zásobníky jsou v zapojení jedna, dva a tři za sebou.

Protože se jedná o matematické modely simulované numerickými metodami na PC je nutné testovat proměnné tak, aby nedocházelo k nestabilitě řešení, proto u některých modelů jako jsou trychtýřové a kulové zásobníky je nutné volit určitou definovanou mez pro stavové proměnné (aby např. nedocházelo k dělení nulou). Dále je nutné testovat zda hodnoty, které uživatel zadá do bloku, jsou vůbec v příslušném rozsahu, kde je model definován, např. počáteční výška v zásobníku nemůže být větší jak výška zásobníku. Pokud jde o fyzikální realizovatelnost zadaných vlastností, to v této práci řešeno není, tudíž při určitých nastaveních parametrů bloku, může dojít k problémům při simulaci.

V praktické části se zabývám implementací matematických modelů do programu Matlab/Simulink. Pro tvorbu bylo použito s-funkce, která umožňuje tvorbu vlastních bloků. Je zde popsán postup, jak postupovat při vytváření s-funkce a modelu. To bylo ukázáno na dvou trychtýřových zásobnících. Ke každému bloku byla vytvořena podpora ve formě nápovědy. V té lze najít jak matematický model, tak i rozsah zadávaných hodnot a příklad použití v Simulinku. Je zde uveden i návod na instalaci knihovny a také její používání.

Nad rámec této diplomové práce byl realizován experiment. Tento experiment srovnával reálný laboratorní model s matematickým simulačním modelem vytvořený analytickou metodou. S porovnání plyne, že se porovnávané modely výrazně neliší.

Knihovna je koncipována jako otevřená, tudíž bude volně přístupná. Její využití je zejména pro pedagogické účely na naší fakultě, ale lze ji použít i pro testování a návrh řídicích algoritmů. Do knihovny se mohou volně a vcelku jednoduše přidávat další modely. Do budoucna, po řádném otestování, se předpokládá umístění knihovny na univerzitní web a také s její anglickou mutací.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The Aim of this diploma work was the creation of a library of selected technological processes. As programming environment, the Matlab/Simulink program was chosen. The library is created on the basis of mathematical models described in the theoretical part of this work.

Based on the principles of modelling, the mathematical models are deduced. They are models of continuous stirred heat exchanger, continuous stirred tank reactor and further on of tanks for liquid in cylinder, funnel, and spherical shapes. The tanks are in the consecutive circuit of one, two and three.

Because the mathematical models are simulated by numerical methods on a PC, it was necessary to test the variables so as not to create an instable solution. Therefore for some models, such as the funnel and spherical tanks, it was necessary to select a certain defined limit for state variables (so that e.g. division by zero does not occur). Further on it is necessary to test whether the values, which the user inputs into the block, are in the relevant range where the model is defined, e.g. the initial liquid height in the tank cannot be higher than the height of the tank. The physical feasibility of the set values is not dealt with in this work; therefore problems during simulation can occur if certain settings of block parameters are used.

The practical part of the work deals with implementation of the mathematical models into the Matlab/Simulink program. For the creation I used the s-function, which enables the creation of one's own's blocks. A procedure how to go on when creating an s-function and a model is described here. This was shown on the two-funnel tanks. For each block, support help was created. There you can find the mathematical model and also the range of the set values and an example of use in the Simulink. It also contains directions for installation of the library and its use.

Above the aim of this diploma work, an experiment was realised. This experiment was comparing a real laboratory model with a mathematical simulation model created by the analytical method. It follows from the comparison that the compared models do not differ markedly.

The library is conceived as open, therefore freely accessible. Its use is especially for pedagogical purposes of our faculty, but it can also be used for testing and design of

control algorithms. Other models can be freely and easily added into the library. In future, after proper testing, the library will be placed on the university web site, together with its English mutation.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Amira* [online]. 2006 [cit. 2008-05-28]. Dostupný z WWW:
<http://www.amira.de/dts200_engl.html>
- [2] DOSTÁL, P. – GAZDOŠ F. *Řízení technologických procesů*. Zlín, 2006. 98 s.t
- [3] DUŠEK, F. *Matlab a simulink - úvod do používání*. Univerzita Pardubice, 2000. 146 s. ISBN 80-7194-273-1
- [4] Humusoft. *Matlab* [online]. 1997 [cit. 2008-05-16]. Dostupný z WWW:
<<http://www.humusoft.cz/matlab/matlab.htm>>.
- [5] Humusoft. *Simulink* [online]. 1997 [cit. 2008-05-16]. Dostupný z WWW:
<<http://www.humusoft.cz/matlab/simulink.htm>>.
- [6] JANOVSKEÝ, Dušan . *Jakpsatweb* [online]. 2003-2008 , 07. května 2008
[cit. 2008-05-10]. Dostupný z WWW: <www.jakpsatweb.cz>
- [7] MIKLEŠ, J. - FIKAR, M. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I*. 1999. Vydavateľstvo STU: Bratislava.
- [8] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. 1999. Montanex a.s.: Ostrava.
- [9] Olbert, V. *Realizace rekurzivních metod identifikace v prostředí MATLAB&SIMULINK*. (Diplomová práce):UTB 2006.
- [10] Simulink –Model-based and systém- based design. Version 5.The MathWorks, 2002
- [11] WELLSTEAD, P.E. *Introduction to physical system modelling*. 1979. Academic Press Ltd: London.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

k_i	Konstanta ventilu
q_i	Přítok, odtok
h_i	Výška hladiny v zásobníku
D_i	Průměr zásobníku
H_i	Výška zásobníku
h^s	Ustálená výška hladiny
q^s	Ustálený přítok
F_i	Obsah dna zásobníku
V	Objem
α	Koeficient přestupu tepla
F	Přestupná plocha
T	Teplota
ρ	Hustota
c_p	Měrné teplo
c_i	Koncentrace
r_{ij}	Rychlost i-té složky v j-té reakci
r_j	Rychlost j-té reakce
h_j	Reakční rychlost j-té reakce
k	Rychlostní konstanta
R	Plynová molová konstanta
E	Aktivační energie

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Válcový zásobník na kapalinu	14
<i>Obr. 2</i> Dva válcové zásobníky na kapalinu	16
<i>Obr. 3</i> Tři válcové zásobníky na kapalinu	18
<i>Obr. 4</i> Trychtýřový zásobník na kapalinu	21
<i>Obr. 5</i> Dva trychtýřové zásobníky na kapalinu	22
<i>Obr. 6</i> Tři trychtýřové zásobníky na kapalinu	24
<i>Obr. 7</i> Kulový zásobník na kapalinu	26
<i>Obr. 8</i> Dva kulové zásobníky na kapalinu	27
<i>Obr. 9</i> Tři kulové zásobníky na kapalinu	29
<i>Obr. 10</i> Průtočný výměník s promícháváním	31
<i>Obr. 11</i> Průtočný chemický reaktor	33
<i>Obr. 12</i> Matematický popis bloku	38
<i>Obr. 13</i> Grafické zobrazení průběhu simulace [9]	39
<i>Obr. 14</i> Schéma s-funkce s parametry	43
<i>Obr. 15</i> S-funkce pro dva trychtýřové zásobníky	44
<i>Obr. 16</i> Vytvořený blok se 2 vstupy a 2 výstupy a konfigurační okno mask editoru	45
<i>Obr. 17</i> Vytvoření menu	45
<i>Obr. 18</i> Záložka Intialization	46
<i>Obr. 19</i> Chybová hláška	47
<i>Obr. 20</i> Záložka Documentation a její vliv na popis bloku	47
<i>Obr. 21</i> Náповěda pro dva trychtýřové zásobníky na kapalinu	48
<i>Obr. 22</i> Ukázka příkazu help tankF2	52
<i>Obr. 23</i> Položka file v Matlabu	53
<i>Obr. 24</i> Okno Set Path	54
<i>Obr. 25</i> Okno Set Path s instalovanou cestou ke knihovně	55
<i>Obr. 26</i> Spuštění knihovny	56
<i>Obr. 27</i> Knihovna modelů	56
<i>Obr. 28</i> Výška hladiny v prvním zásobníku při nulovém průtoku	57
<i>Obr. 29</i> Výška v zásobníku dva při nulovém průtoku	58
<i>Obr.30</i> Výška hladiny v prvním zásobníku při nulovém prvním průtoku a nenulovém druhém průtoku	59

<i>Obr. 31</i> Výška hladiny ve druhém zásobníku při nulovém prvním přítoku a nenulovém druhém přítoku	59
<i>Obr. 32</i> Vstupy do bloku tři válcové zásobníky na kapalinu.....	60
<i>Obr. 33</i> Simulinkové schéma modelu.....	61
<i>Obr. 34</i> Výška hladiny v prvním zásobníku	61
<i>Obr. 35</i> Výška hladiny v druhém zásobníku.....	62
<i>Obr. 36</i> Výška hladiny ve třetím zásobníku	62
<i>Obr. 37</i> Zapojení bloku zásobník na kapalinu do regulačního schématu	63
<i>Obr. 38</i> Vytvořené schéma pro měření na zásobníku	64
<i>Obr. 39</i> Laboratorní model DTS 200.....	64
<i>Obr. 40</i> Porovnání simulace s reálným měřením	65

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Parametry válcového zásobníku</i>	14
<i>Tab. 2 Parametry dvou válcových zásobníků</i>	16
<i>Tab. 3 Parametry tří válcových zásobníků</i>	19
<i>Tab. 4 Parametry trychtýřového zásobníku</i>	21
<i>Tab. 5 Parametry dvou trychtýřových zásobníků</i>	23
<i>Tab. 6 Parametry tří trychtýřových zásobníků</i>	25
<i>Tab. 7 Parametry kulového zásobníku</i>	26
<i>Tab. 8 Parametry dvou kulových zásobníků</i>	28
<i>Tab. 9 Parametry tří kulových zásobníků</i>	29
<i>Tab. 10 Parametry výměníku tepla</i>	31
<i>Tab. 11 Parametry chemického reaktoru</i>	33
<i>Tab. 12 Hodnoty flagů</i>	40
<i>Tab. 13 Parametry bloku a jejich přípustné hodnoty</i>	46
<i>Tab. 14 Nastavení parametrů bloku pro dva trychtýřové zásobníky</i>	57
<i>Tab. 15 Parametry bloku pro tři válcové zásobníky</i>	60
<i>Tab. 16 Parametry zásobníku</i>	63

SEZNAM PŘÍLOH

P1 CD-ROM se záznamem této práce ve formátu Adobe Acrobat, dále se zde nachází knihovna jako *knihovna_tech_procesu.zip*