

Simulační modely do předmětu Analýza a simulace technologických procesů

Simulation models for the course Analysis and simulation of technological processes

Bc. Pavlína Tomašková



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavlína TOMAŠKOVÁ**
Osobní číslo: **A10891**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Simulační modely do předmětu Analýza a simulace technologických procesů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. V programovém systému MATLAB/Simulink implementujte modely procesů probírané v předmětu Analýza a simulace technologických procesů.
3. Pro implementaci využijte standardních bloků Simulinku spolu s jednoduchým, uživatelsky příjemným způsobem zadávání vstupních údajů.
4. Podobným způsobem realizujte další vybrané modely procesů.
5. Ke každému z vytvořených modelů navrhnete vhodné úkoly pro studenty uvedeného předmětu a také do předmětu Stavová a algebraická teorie řízení.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. DOSTÁL, Petr. **Matematické modely vybraných technologických procesů: Studijní materiál do předmětu Analýza a simulace technologických procesů.** Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011.
2. NOSKIEVIČ, Petr. **Modelování a identifikace systémů.** Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2.
3. FARANA, Radim et al. **Programová podpora simulace dynamických systémů: Sbíрка řešených příkladů.** Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 978-80-251-1448-3.
4. KARBAN, Pavel. **Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink.** Praha: BEN-technická literatura, 2007. ISBN 978-80-251-1448-3.
5. PERŮTKA, Karel. **MATLAB – Základy pro studenty automatizace a informačních technologií.** Zlín : UTB ve Zlíně, 2005. ISBN 80-7318-355-2.
6. WELLSTEAD, Peter. **Introduction to Physical Modelling.** London : Academic Press Ltd, 1979. ISBN 0-12-744380-0.

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

Datum zadání diplomové práce: **24. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **6. června 2012**

Ve Zlíně dne 24. února 2012


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá vytvorením simulačných modelov vybraných technologických procesov, ktoré budú použité ako podpora výučby predmetu Analýza a simulácia technologických procesov na Fakulte aplikovanej informatiky UTB v Zlíne. Ide o simulačné modely zásobníkov na kvapalinu tvarov valec, guľa a lievnik, výmenníkov tepla, chemického reaktoru, rekuperátora pre ohrev vzduchu a jednosmerných motorov. Modely sú vytvorené v programovom prostredí Matlab/Simulink s jednoduchým užívateľsky príjemným spôsobom zadávania vstupných údajov a ku každému modelu sú navrhnuté simulačné úlohy pre študentov uvedeného predmetu a do nadväzujúceho predmetu Stavová a algebraická teória riadenia.

Kľúčová slova: simulácia, model, modelovanie, technologické procesy, MATLAB, Simulink.

ABSTRACT

This thesis deals with the creation of simulation models of selected technological processes that will be used as an aid to teaching the course Analysis and simulation of technological processes at the Faculty of Applied Informatics TBU in Zlín. There are simulation models of the liquid storage tanks of the cylinder, sphere and funnel shapes in various configurations, heat exchangers, a continuous stirred tank reactor and DC motors. Models are created in the Matlab/Simulink environment with a simple user-friendly input data interface. Further, simulation tasks for students of the mentioned course and a related course State-space and algebraic control theory were designed for each of the models.

Keywords: simulation, model, modelling, technological processes, MATLAB, Simulink.

Na tomto mieste by som chcela poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce pánovi Ing. Františkovi Gazdošovi, Ph.D. za pomoc pri vzniku tejto práce, za odborné vedenie a čas, ktorý mne a mojej práci venoval.

Taktiež by som chcela poďakovať mojim rodičom za podporu a trpezlivosť, ktorú so mnou počas štúdia mali.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČASŤ	10
1 LITERÁRNA REŠERŠ	11
2 MODELOVANIE A SIMULÁCIA.....	13
2.1 MODELOVANIE.....	13
2.1.1 Klasifikácia modelov	14
2.1.2 Vytváranie matematických modelov	15
2.2 SIMULÁCIA	17
3 MODELY VYBRANÝCH PROCESOV A ICH ODVODENIE	19
3.1 VALCOVÝ ZÁSOBNÍK NA KVAPALINU	19
3.2 GUŤOVÝ ZÁSOBNÍK NA KVAPALINU	20
3.3 LIEVIKOVÝ ZÁSOBNÍK NA KVAPALINU.....	22
3.4 VALCOVÝ ZÁSOBNÍK NA KVAPALINU V SÉRII.....	24
3.5 GUŤOVÝ ZÁSOBNÍK NA KVAPALINU V SÉRII.....	26
3.6 LIEVIKOVÝ ZÁSOBNÍK NA KVAPALINU V SÉRII	27
3.7 PRIETOKOVÝ VÝMENNÍK TEPLA S PREMIEŠAVANÍM	29
3.8 JEDNOKAPACITNÝ RÚRKOVÝ VÝMENNÍK TEPLA.....	31
3.9 JEDNOSMERNÝ MOTOR RIADENÝ PRÚDOM	33
3.10 JEDNOSMERNÝ MOTOR RIADENÝ NAPÄTÍM KOTVY	34
3.11 REKUPERÁTOR PRE OHREV VZDUCHU.....	35
3.12 PRIETOKOVÝ CHEMICKÝ REAKTOR S CHLADENÍM V PLÁŠTI.....	36
II PRAKTICKÁ ČASŤ.....	40
4 SIMULINK A JEHO ŠTANDARDNÉ BLOKY	41
4.1 SIMULINK	41
4.2 VYUŽITÉ BLOKY SIMULINKU.....	42
4.2.1 Integrátor (integrator).....	42
4.2.2 Saturácia (saturation)	43
4.2.3 Absolútna hodnota (abs)	44
4.2.4 Zosilnenie (gain)	45
4.2.5 Matematická funkcia (math function)	45
4.2.6 Súčin (product).....	46
4.2.7 Súčet, rozdiel, suma (add, subtract, sum)	47
4.2.8 Subsystém (subsystem)	48
4.2.9 Vstup, výstup (inport, outport)	48
4.2.10 Zlučovač (mux).....	49
4.2.11 Grafický výstup (scope)	50
4.2.12 Konštanta (constant).....	50

5	UKÁŽKY TVORBY MODELU	52
5.1	GUŤOVÝ ZÁSOBNÍK NA KVAPALINU V SÉRII.....	52
5.1.1	Vytvorenie modelu a nastavenie blokov.....	53
5.1.2	Vytvorenie subsystému	54
5.1.3	Simulácia modelu.....	58
5.2	JEDNOKAPACITNÝ RÚRKOVÝ VÝMENNÍK TEPLA.....	58
5.2.1	Vytvorenie modelu a nastavenie blokov.....	59
5.2.2	Vytvorenie subsystému	60
5.2.3	Simulácia modelu.....	63
5.3	REKUPERÁTOR PRE OHREV VZDUCHU.....	64
5.3.1	Vytvorenie modelu a nastavenie blokov.....	64
5.3.2	Vytvorenie subsystému	65
5.3.3	Simulácia modelu.....	68
	ZÁVER	69
	ZÁVER V ANGLIČTINE	71
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	72
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	74
	ZOZNAM OBRÁZKOV	76
	ZOZNAM TABULIEK	78
	ZOZNAM PRÍLOH	79

ÚVOD

Simulácia je v dnešnej dobe neoddeliteľnou súčasťou mnohých odvetví, či už technologických, spoločenských alebo prírodných. S rozvíjajúcimi sa prostriedkami výpočtovej techniky sa čoraz viac využíva počítačová simulácia, prostredníctvom ktorej sa simuluje správanie reálnych procesov. K simulácii sa uchýľujeme v prípadoch, kedy reálny systém nie je fyzicky dostupný, prípadne by experiment na reálnom systéme bol veľmi nebezpečný, časovo náročný alebo neprijateľný. Príkladom môže byť simulácia havárie v atómovej elektrárni. Simulácia a simulačné modely sa hojne využívajú aj v oblasti výučby. Je to vhodný nástroj pre ľahšie porozumenie rôznym procesom a reálnym modelom. Výhodou používania simulácií ako pedagogického nástroja je rýchlejšia a oveľa lacnejšia výučba ako pri použití experimentu na reálnom systéme.

Cieľom tejto diplomovej práce je vytvorenie simulačných modelov vybraných technologických procesov pre účely výučby a k nim navrhnutie simulačných a výpočtových úloh pre študentov do predmetu Analýza a simulácia technologických procesov a Stavová a algebraická teória riadenia – predmetov vyučovaných v 1. ročníku nadväzujúceho magisterského štúdia na Fakulte aplikovanej informatiky UTB v Zlíne odboru Automatické riadenie a informatika. Prvá časť práce oboznamuje čitateľa s problematikou modelovania, simulácií a tiež obsahuje odvodenie matematických modelov jednotlivých procesov, z ktorých sú následne vytvorené jednotlivé simulačné modely.

Druhá časť práce oboznámi čitateľa s blokmi použitými pri modelovaní v prostredí MATLAB/Simulink a s možnosťou ich nastavenia, pričom podľa zadania museli byť použité len základné štandardné bloky Simulinku z dôvodu jednoduchej prenositeľnosti. Ďalej táto časť práce popisuje vytvorenie simulačných modelov a to na troch vybraných modeloch. Ku každému simulačnému modelu bolo vytvorené jednoduché a užívateľsky príjemné menu pre zadávanie vstupných parametrov modelu. K vytvoreným modelom sú tu vložené aj ukážky simulácií, ktoré zobrazujú správanie modelov v dynamickom alebo ustálenom stave. Prílohou sú stručné ukážky všetkých vytvorených modelov, spolu s vytvorenými úlohami do oboch spomínaných predmetov. Posledná verzia simulačných modelov je priložená na CD.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 LITERÁRNA REŠERŠ

Problematika výukových materiálů do predmetu Analýza a simulácia technologických procesov je riešená v bakalárskej práci [13]. Táto práca rieši analýzu a simuláciu prietokového výmenníka tepla s premiešavaním, valcových zásobníkov na kvapalinu zapojených v sérii, lievikového zásobníka na kvapalinu a guľového zásobníka na kvapalinu. Pri tvorbe modelov autor využíva ich matematického popisu, pričom pre simuláciu dynamických charakteristík využíva metódu Runge-Kutta a pre simuláciu statických charakteristík využíva metódu prostej iterácie. Pomocou týchto metód autor vytvoril výpočtové programy, tzv. M-file súbory, v prostredí Matlabu. M-file súbory týchto modelov sú prepojené cez webové rozhranie Matlab web server.

Ďalšia práca [12] nerieši priamo výukový materiál do predmetu Analýza a simulácia technologických procesov, ale zaoberá sa vytvorením knižnice modelov technologických procesov, ktoré je však možné vo výučbe tohto predmetu použiť. Výsledkom tejto diplomovej práce je knižnica obsahujúca bloky pre simuláciu dynamiky guľového, lievikového a valcového zásobníka na kvapalinu a tiež bloky pre simuláciu dynamiky prietokového výmenníka tepla a prietokového chemického reaktoru. Knižnica obsahuje zásobníky na kvapalinu v prevedení jeden zásobník, dva zásobníky v sérii a tri zásobníky zapojené za sebou. Podobne ako v predchádzajúcej práci, autor využíva prostredia Matlab a jeho nadstavby Simulink. Pri modelovaní využíva bloky s-funkcií. Bloky, predstavujúce jednotlivé technologické procesy, je možné zapojiť do regulačného obvodu a sledovať jeho správanie.

Autor v práci [3], na rozdiel od predchádzajúcich dvoch, nerieši zásobníky na kvapalinu, ale zaoberá sa skúmaním dynamiky a ustálených stavov procesov prietokových chemických reaktorov s chladením v plášti pre rôzne typy chemických reakcií. Podobne ako v práci [13], aj tu autor využíva metódu Runge-Kutta pre skúmanie dynamiky a metódu prostej iterácie pre skúmanie ustálených stavov chemických reaktorov. Autor opäť pracuje v programovom prostredí Matlab, kde vytvoril program, ktorý umožňuje zobrazenie statických charakteristík a taktiež aj skúmanie dynamických charakteristík.

Oproti uvedeným zdrojom je v tejto diplomovej práci riešená daná problematika len pomocou základných štandardných blokov Simulinku bez ďalších pripojených súborov alebo s-funkcií. Výsledkom sú celkom bez problémov prenositeľné simulačné modely

procesov vo forme jednoduchých blokov Simulinku s užívateľsky príjemným spôsobom zadávania vstupných údajov pomocou menu tak, ako je to v Simulinku zvykom. Každý proces je vo výsledku realizovaný len jedným zamaskovaným blokom v jednom súbore, s ktorým sa dá jednoduchým spôsobom simulačne experimentovať, tzn. vykonávať analýzu, prípadne syntézu návrhu riadenia.

2 MODELOVANIE A SIMULÁCIA

2.1 Modelovanie

Modelovanie predstavuje spôsob zobrazenia vonkajšieho sveta, ktorý slúži k skúmaniu v ňom existujúcich objektívnych zákonitostí. Modelovanie je experimentálny informačný proces, pri ktorom sa originálu (skúmanému systému) na základe určitých kritérií jednoznačne priraduje iný systém tzv. model. Môže sa jednať o fyzický alebo abstraktný model. [9]

Ak pomocou geometrickej podobnosti priradíme originálu model tak, že zachováva tvarovú podobnosť, jedná sa o model hmatateľný, čiže fyzický. Príkladom takéhoto modelu môže byť model automobilu, ktorý sa používa pre aerodynamické skúšky pri meraní v aerodynamickom tunely. Fyzický model umožňuje vykonávať experimenty s modelom a skúmať tak vlastnosti originálu na modely pomocou dejov rovnakej fyzikálnej podstaty.[10]

Matematický model, nazývaný tiež abstraktný model, umožňuje skúmať javy prebiehajúce na originálnom objekte pomocou matematického popisu ich priebehov.

Spôsoby modelovania sú odlišné v závislosti na kritériách priradenia modelu k originálnemu objektu. Môžeme vychádzať z dvoch kritérií:

- analógia – tento pojem určuje matematickú podobnosť fyzikálne odlišných procesov a systémov. V analógii rozlišujeme dva typy modelov a to fyzický model, ktorý predstavuje umelý alebo prirodzený hmotný systém a abstraktný model, ktorý predstavuje nehmotný systém alebo grafické vyjadrenie skúmaného systému. Abstraktný model zahŕňa matematické modely, ktoré sú predstavované matematickými rovnicami a vzťahmi a simulačné modely, ktoré sú reprezentované programovacími prostriedkami.
- podobnosť – je jednoznačné vzájomné priradenie medzi rôznymi systémami v ich štruktúre, správaní a vlastnostiach. Rozlišujeme fyzikálnu, matematickú a kybernetickú podobnosť. Fyzická podobnosť je podobnosť medzi procesmi rovnakej podstaty a systémami a zároveň vedľa geometrickej podobnosti zahŕňa aj podobnosť parametrov a stavových veličín. Matematická podobnosť je podobnosť

medzi procesy a systémami, ktoré majú rovnaký matematický popis. Kybernetická podobnosť vyjadruje matematickú podobnosť vo vonkajšom správaní systémov.[10]

2.1.1 Klasifikácia modelov

Model je chápaný ako výsledok prevedenia reálneho problému najčastejšie do počítačovej podoby s možnosťou modifikácie jeho vnútornej štruktúry. Je potrebné si uvedomiť, že model je vždy chápaný ako „zjednodušenina“ originálu. Ak by to tak nebolo, nedokázali by sme rozlíšiť rozdiel medzi modelom a jeho originálom.[2]

Pre klasifikáciu modelov [1] existuje veľa hľadísk, ktoré rešpektujú špecifické stránky odrazu reálnej skutočnosti. Z pohľadu väzby medzi poznaním experimentálnym a teoretickým:

- *interné* – ide o konceptuálne modely,
- *externé* – sú konkretizáciou konceptuálnych modelov.

Z pohľadu použitých výrazových prostriedkov sa jedná o modely:

- *materiálne* – patria sem modely s fyzikálnou podstatou,
- *abstraktné* – obsahuje modely vytvorené opisom formy alebo obsahu.

Ďalšie delenie modelov je na :

- *morfologické* – pri vytváraní modelu sa zachováva jeho forma, teda geometrická stránka,
- *kybernetické* – dominuje zhoda alebo podobnosť správania štruktúry.

Matematické modely systémov pre účely riadenia delíme na:

- *statické* – jedná o vzťah medzi ustálenými hodnotami vstupov a výstupov. Čas tu vystupuje ako nezávisle premenná. Vyjadrenie algebrickými rovnicami
- *dynamické* – vzťah medzi vstupmi a výstupmi je reprezentovaný diferenciálnymi alebo diferenčnými rovnicami.

Podľa závislosti na čase delíme modely na *t-invariantné*, teda časovo nezávislé a *t-variantné*, teda časovo závislé. Z hľadiska linearity rozlišujeme modely *lineárne* a *nelineárne*. V prípade, že uvažujeme len spojité zmeny veličín, tak sa jedná o model

spojitý, ak uvažujeme zmeny v diskrétnych časových okamžikoch, jedná sa o model *diskrétny*.

V závislosti na charaktere väzy medzi vstupmi a výstupmi sa modely delia na:

- *vonkajšie* – tieto popisujú vzťah vstup - výstup,
- *vnútorné* – reprezentujú vzťah vstup – stav - výstup.

Delenie modelov na:

- *neparametrické* – vyjadrujú reláciu medzi nezávisle a závisle premennou,
- *parametrické* – sú vyjadrené analyticky ako funkcie nezávisle premennej a konečného počtu parametrov.

Ak vezmeme do úvahy rozloženie sledovaného parametra vo vyšetrovaní objektu, potom rozlišujeme

- *modely so sústredenými parametrami* – majú rovnaké hodnoty sledovaných parametrov v celom priestore objektu. Tieto modely popisujeme sústavou diferenciálnych rovníc,
- *modely s rozloženými parametrami* – majú rôzne hodnoty sledovaných parametrov podľa polohy v objekte. Modely popisujeme sústavou parciálnych diferenciálnych rovníc.

Z pohľadu identifikácie delíme modely na *analytické* (využíva sa prístup dedukcie) a *experimentálne* (využíva sa indukčný prístup).

V závislosti na správaní procesu, delíme experimentálne modely na *deterministické* a *stochastické*. Deterministický model vykazuje pri opakovanom pokuse za rovnakých počiatočných podmienok rovnaké správanie, avšak model stochastický pri tých istých počiatočných podmienkach vykazuje známky náhodného správania, čiže je tu prítomná stochastická zložka.

2.1.2 Vytváranie matematických modelov

Pre získanie matematického modelu určitého technologického procesu je možné obecné využiť dve metódy. Prvou z nich je **metóda experimentálna** (v literatúre [8] označovaná ako metóda čiernej schránky). Cieľom tejto metódy je získať model tak, že v celom rozsahu

podmienok experimentálne určíme vzťahy medzi výstupmi a vstupmi a tieto popíšeme vhodným matematickým modelom. Táto metóda sa nazýva aj ako metóda čiernej skrinky a to preto, lebo experimentovaním je získaný vonkajší popis skúmaného objektu a nie je možné nazrieť do jeho vnútornej štruktúry. Objekt teda považujeme len za zdroj vzťahov medzi výstupom a vstupom.

Výhodou experimentálnej metódy je, že nie je potrebné študovať vnútornú štruktúru a deje objektu, postačí len sledovať vstupy a výstupy. V dnešnej dobe, kedy výpočtová technika je na vysokej úrovni a za prijateľné ceny, je táto metóda hojne využívaná. Nevýhodou tejto metódy je, že získaný matematický model popisuje správanie len tohto konkrétneho objektu a nie je možné tento model použiť pre iný objekt. Ďalšou nevýhodou je, že sledované veličiny objektu musia byť merateľné a objekt musí byť prístupný experimentu.[1]

Využitie experimentálnej metódy je vhodné práve vtedy [8], ak:

- je veľmi zložitý popísať deje prebiehajúce vo vnútri objektu,
- je k dispozícii cieľový objekt a je možné na ňom vykonávať experimentálne meranie,
- je cieľom vypracovať matematický model len pre určitý objekt a nie je potrebné prenášať tento model na iný objekt.

Druhý spôsob, ktorým je možné získať matematický model technologického procesu (objektu) je **analytická metóda** (v literatúre [8] označovaná ako metóda založená na predstave o mechanizme procesu). Matematický model je v tomto prípade zostavený na základe matematicko-fyzikálnej analýzy skúmaného objektu, pričom sa vychádza z technologických, konštrukčných a prevádzkových údajov o objekte. Vzťahy medzi sledovanými veličinami sa získavajú matematickým popisom javov prebiehajúcich v objekte, podľa chemických alebo fyzikálnych zákonov. Je potrebné si uvedomiť do akých podrobností je vhodné objekt analyzovať, aby získaný model objektu bol dostatočne presný ale nie príliš zložitý a nákladný. Model objektu je presnejší, čím hlbšiu vykonávame analýzu. Cieľom pri použití analytickej metódy je určiť, čo sa deje vo vnútri sledovaného objektu. Pri veľmi rozsiahlych objektoch je vhodné ich rozdelenie na menšie časti, pre ktoré je jednoduchšie určiť akými zákonmi sa riadia. V technologických procesoch sa jedná najmä o javy zdieľania tepla, chemických reakcií a iné. Ak je model vhodne navrhnutý, dokáže odpovedať na otázky, čo sa stane ak sa zmení objem kvapaliny vo výmenníku, alebo ak použijeme inú koncentráciu látky v reaktore a podobne. V analytickom modeli sa teda

vyskytujú veličiny s fyzikálnou podstatou ako sú: rýchlosť, objem, merné teplo, koeficient prestupu tepla a iné.

Hlavnou výhodou tejto metódy je, že vytvorený matematický model povoľuje prenos dát, keďže dokáže predpovedať správanie objektu, na ktorom nebol vykonaný priamy experiment. Veľkou nevýhodou je potrebná znalosť matematiky a technológie daného procesu. Analýza je často veľmi zložitá, výsledné vzťahy sú komplikované a je potrebné modely zjednodušovať.[1]

Využitie tejto metódy je vhodné ak:

- nie je možné uskutočniť experiment na cieľovom objekte,
- chceme vytvorený matematický model použiť pre iný objekt,
- je možné popísať kvantitatívne deje vo vnútri objektu. [8]

Veľmi častým spôsobom identifikácie reálneho objektu je citlivé spojenie experimentálnej a analytickej metódy. Je možné navrhnutý matematický model porovnať s reálnym objektom prostredníctvom dát získaných simuláciou matematického modelu pomocou počítača s dátami získanými experimentom. Kombinácia týchto dvoch metód umožňuje model objektu spresniť a korigovať.[1]

2.2 Simulácia

Simulácia je overenie funkčnosti modelovaného problému. Najčastejšie prebieha pomocou matematického aparátu implementovaného do počítača. Simuláciu teda môžeme chápať ako aplikovanú metodológiu, ktorá popisuje správanie reálneho systému s využitím matematického alebo symbolického modelu. Inak povedané, je to proces transformácie konceptuálneho modelu popisujúceho reálny systém na simulačný model. K simulácii sa uchýľujeme najmä vtedy ak reálny systém a jeho konceptuálny model nie sú fyzicky dostupné, ak reálny systém a jeho model neexistujú, ak je experiment na reálnom systéme nebezpečný alebo neprijateľný. K počítačovej simulácii je potrebné vysvetliť pojem simulačný model. Je to model, ktorý je reprezentovaný spustiteľným počítačovým programom.[6]

Výhody počítačovej simulácie sú nasledujúce:

- umožňuje optimálne nastavenie a riadenie reálneho procesu bez nutnosti jeho narušenia,
- umožňuje diagnostikovať problémy a pochopiť vzťahy medzi charakteristikami reálneho systému,
- umožňuje špecifikovať požiadavky na návrh konceptuálneho systému, následne ich modifikovať tak, aby bol čo najefektívnejšie dosiahnutý cieľ,
- poskytuje možnosť zrýchliť alebo spomaliť správanie javov a dejov a tým urýchliť výskum.

Počítačová simulácia má aj určité nevýhody, avšak je ich menej ako výhod. Jednou z nevýhod je, že v niektorých prípadoch je jednoduchšie, lacnejšie a aj časovo menej náročné použiť analytické riešenie konceptuálneho modelu, ako vykonať transformáciu na simulačný model.

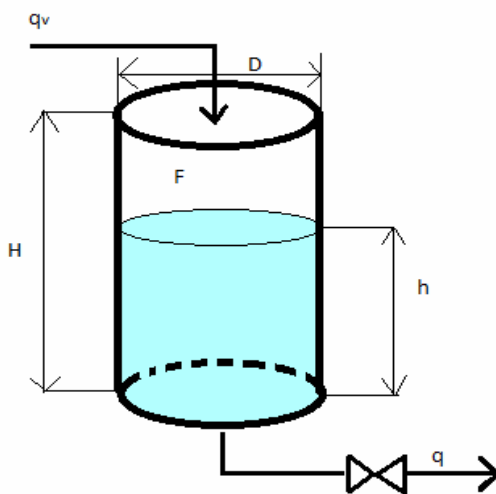
Simulácie sa v dnešnej dobe využívajú ako

- technika skúmania – dovoľuje skúmať dopodrobna dynamiku reálneho systému a procesu,
- heuristický nástroj – hrá dôležitú rolu v procese vytvárania modelov, hypotéz a dokonca aj nových teórií,
- náhrada reálneho experimentu,
- pedagogický nástroj – uľahčuje chápanie danej problematiky pomocou vizualizácie výsledkov simulácií.[6]

3 MODEL Y VYBRANÝCH PROCESOV A ICH ODVODENIE

3.1 Valcový zásobník na kvapalinu

Na obrázku (Obr. 1) sa nachádza valcový zásobník na kvapalinu o priemere D [m] a výške H [m] s prierezom F [m²] a objemovým prietokom kvapaliny q [m³/min]. Vstupom do systému je objemový prietok $q_v(t)$ a stavovou veličinou, totožnou s výstupnou veličinou, je výška hladiny kvapaliny h [m] $h(t)$.



Obr. 1 Valcový zásobník na kvapalinu

Zjednodušujúce predpoklady

- zásobník je otvorený,
- prierez zásobníka a atmosférický tlak sú konštantné.

Bilancia a odvodenie matematického modelu [4]

Prítok do zásobníka = Odtok zo zásobníka + Akumulácia kvapaliny v zásobníku

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

Keďže prierez zásobníka je konštantný, môžeme zmenu objemu vyjadriť ako zmenu výšky hladiny $dV = F dh$, po dosadení do rovnice (1) a dostaneme

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{F}(q_v - q) \quad (2)$$

počiatočná podmienka $h(0)=h^s$. Prietok q vypočítame z rovnice

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

kde k je konštanta ventilu v jednotkách $\text{m}^{2.5}/\text{min}$.

Rovnica (3) plynie z definície, ktorá hovorí, že prietok média cez ventil je úmerný druhej odmocnine z rozdielu tlakov média pred a za ventilom. V tomto prípade sa jedná o hydrostatický tlak, ktorý je úmerný výške hladiny kvapaliny v zásobníku.

Výsledný matematický model pre tvorbu modelu v Simulinku má tvar:

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

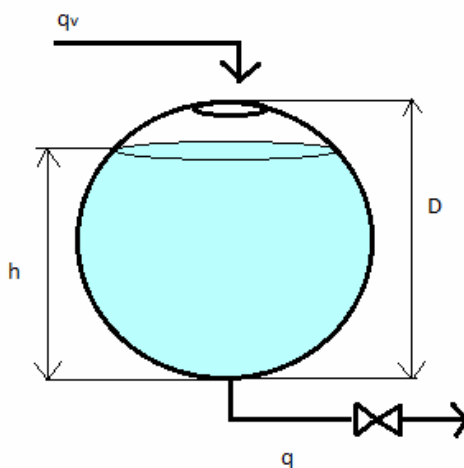
Ošetrenie chybových stavov saturáciou

- $\min h(t) = 0$
- $\max h(t) = H$

3.2 Gul'ový zásobník na kvapalinu

Na obrázku (Obr. 2) je vidieť príklad zásobníka na kvapalinu s nekonštantným prierezom. Ide o gul'ový zásobník na kvapalinu s priemerom D [m], vstupným prítokom q_v [m^3/min], výstupným odtokom q [m^3/min] a výškou hladiny kvapaliny h [m].

Vstupom do systému je vstupný prietok q_v , stavovou a zároveň aj výstupnou veličinou je výška hladiny h .



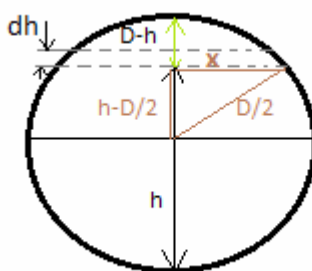
Obr. 2 Gul'ový zásobník na kvapalinu

Zjednodušujúce predpoklady

- zásobník je otvorený s konštantným atmosférickým tlakom, ktorý pôsobí na hladinu kvapaliny v zásobníku.

Bilancia a odvodenie matematického modelu

Bilancia a odvodenie matematického modelu sú rovnaké ako u valcového zásobníka na kvapalinu, rozdiel je len vo výpočte prierezu zásobníka F . [4]



Obr. 3 Prierez guľového zásobníka

Keďže sa jedná o zásobník s nekonštantným prierezom, je zrejmé, že prierez zásobníka sa bude meniť pri rôznych výškach hladiny kvapaliny. Pre výpočet prierezu zásobníka potrebujeme zistiť vzťah úseku x (pozri Obr. 3), ktorý získame z Pythagorovej vety

$$x^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(h - \frac{D}{2}\right)^2 = h(D - h) \quad (5)$$

Zmena objemu zásobníka sa potom bude riadiť vzťahom

$$dV = Fdh = \pi x^2 \cdot dh = \pi h(D - h)dh \quad (6)$$

Dosadením do rovnice (2)

$$q_v = q + \frac{\pi h(D - h)dh}{dt} \quad (7)$$

Pre účely modelovania presunieme deriváciu na ľavú stranu a získame výsledný matematický model s počiatočnou podmienkou $h(0)=h^s$

$$\frac{dh(t)}{dt} = [q_v(t) - k\sqrt{h(t)}] \frac{1}{\pi h \cdot (D - h)} \quad (8)$$

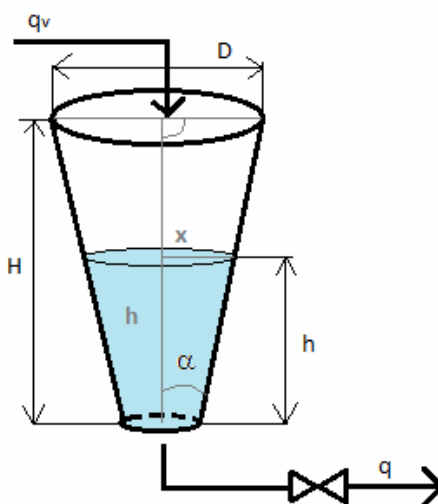
Ošetrenie chybových stavov saturáciou

Keďže sa výška hladiny vyskytuje v menovateli, boli obmedzenia nastavené nasledovne:

- $\min h(t) = 0,01D$
- $\max h(t) = 0,99D$

3.3 Lievikový zásobník na kvapalinu

Na obrázku (Obr. 4) sa nachádza lievnikový zásobník na kvapalinu o hornom priemere D [m] a výške H [m] s výškou hladiny h [m]. Do zásobníka vteká kvapalina vstupným prietokom q_v [m³/min] a na výstupe vyteká prietokom q [m³/min] cez ventil. Lievikový zásobník patrí do skupiny zásobníkov s nekonštantným prierezom tak, ako aj guľový zásobník na kvapalinu.



Obr. 4 Lievikový zásobník na kvapalinu

Na vstupe do systému je vstupný prítok q_v , stavovou a zároveň aj výstupnou veličinou je výška hladiny kvapaliny.

Zjednodušujúce predpoklady

- zásobník je otvorený,
- atmosférický tlak pôsobiaci na hladinu kvapaliny je konštantný.

Bilancia a odvodenie matematického modelu

Bilancia a postup pri odvodzovaní je taký istý ako u predchádzajúcich dvoch zásobníkov, opäť sa líši len odvodením prierezu zásobníka F [4]. Vychádzame z pravouhlého trojuholníka (viď Obr. 4), v ktorom platí

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{h} \Rightarrow x = \operatorname{tg} \alpha \cdot h \quad (9)$$

a súčasne platí

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{D}{2}}{H} = \frac{D}{2H} \quad (10)$$

Dosadením do rovnice (9) získame vzťah pre výpočet úseku x

$$x = \frac{D}{2H} \cdot h \Rightarrow x^2 = \frac{D^2}{4H^2} \cdot h^2 \quad (11)$$

Zmenu objemu kvapaliny vyjadríme potom vzťahom

$$dV = Fdh = \pi x^2 \cdot dh = \pi h^2 \frac{D^2}{4H^2} dh \quad (12)$$

Rovnicu (12) dosadíme do rovnice (2) a získame

$$q_v = q + h^2 \frac{\pi D^2}{4H^2} \frac{dh}{dt} \quad (13)$$

Deriváciu presunieme na ľavú stranu a získame výsledný matematický model s počiatočnou podmienkou $h(0)=h^s$ vhodný pre modelovanie systému v Simulinku

$$\frac{dh(t)}{dt} = \left[q_v(t) - k\sqrt{h(t)} \right] \frac{4H^2}{h^2 \pi D^2} \quad (14)$$

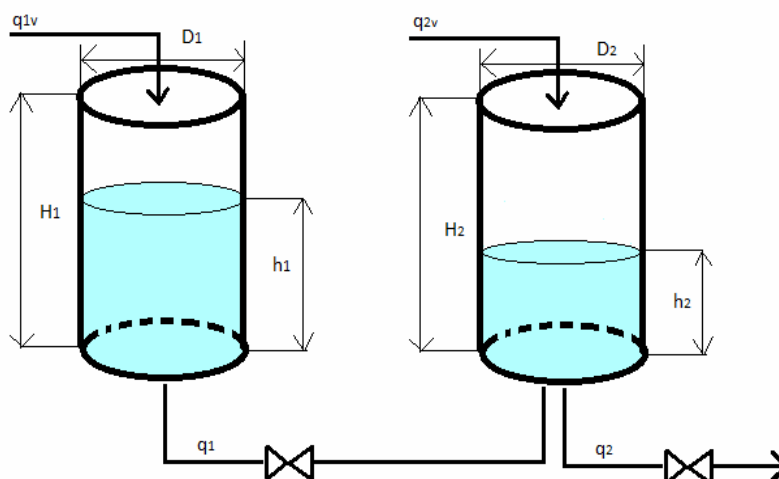
Ošetrenie chybových stavov saturáciou

Keďže sa výška hladiny vyskytuje v menovateli, boli obmedzenia nastavené nasledovne:

- $\min h(t) = 0,01H$
- $\max h(t) = H$

3.4 Valcový zásobník na kvapalinu v sérii

Na obrázku (Obr. 5) sa nachádzajú zásobníky na kvapalinu zapojené do série. Ide o valcové zásobníky s priemerom D [m], výškou H [m] a výškou hladiny kvapaliny h [m]. Na vstupe oboch zásobníkov je vstupný prítok q_v [m³/min]. Kvapalina opúšťa zásobník odtokom q [m³/min] cez ventil. Odtok q_1 privádza kvapalinu do druhého zásobníka.



Obr. 5 Valcové zásobníky na kvapalinu v sérii

Vstupom do systému sú vstupné prítoky q_{v1} a q_{v2} , stavovými veličinami a zároveň aj výstupnými veličinami sú výšky hladín prvého a druhého zásobníka. Z tohto vyplýva, že sa jedná o mnohorozmerný systém (2 vstupy – 2 výstupy).

Zjednodušujúce predpoklady

- zásobníky sú otvorené s konštantným prierezom,
- atmosférický tlak pôsobiaci na hladinu kvapaliny je konštantný,
- dna zásobníkov sa nachádzajú v rovnakej výške.

Bilancia a odvodenie matematického modelu[4]

$$\text{Prítok do zásobníka} = \text{Odtok zo zásobníka} + \text{Akumulácia kvapaliny v zásobníku}$$

Bilancia pre prvý zásobník:

$$q_{1v} = q_1 + \frac{dV_1}{dt} \quad (15)$$

Bilancia pre druhý zásobník:

$$q_{2v} + q_1 = q_2 + \frac{dV_2}{dt} \quad (16)$$

Prierezy oboch zásobníkov sú konštantné, a preto je možné vyjadriť zmeny objemov ako zmeny výšok hladín $dV = F dh$, kde $F [m^2]$ sa počíta z rovnice pre plochu kruhu

$$F_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}$$

$$F_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \quad (17)$$

Dosadením do rovníc (15) a (16) získame matematické modely oboch zásobníkov

$$q_{1v} = q_1 + F_1 \frac{dh_1}{dt}$$

$$q_{2v} = q_2 - q_1 + F_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (18)$$

a počiatočné podmienky budú $h_1(0) = h_1^s$, $h_2(0) = h_2^s$. Prietoky q vypočítame z rovníc

$$q_1 = k_1 \sqrt{|h_1 - h_2|}$$

$$q_2 = k_2 \sqrt{h_2} \quad (19)$$

kde $k_1 [m^{2,5}/min]$ je konštanta ventilu prvého zásobníka, $k_2 [m^{2,5}/min]$ je konštanta ventilu druhého zásobníka.

Výsledné matematické modely pre oba zásobníky sú:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{F_1} [q_{1v}(t) - q_1(t)]$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{1}{F_2} [q_{2v}(t) + q_1(t) - q_2(t)] \quad (20)$$

ak $h_2(t) > h_1(t)$, potom $q_1(t) = -q_1(t)$

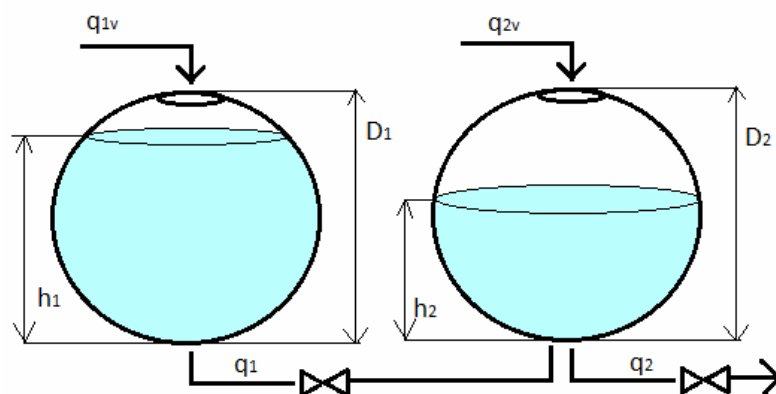
Ošetrenie chybových stavov saturáciou

- $\min h_1(t) = 0$

- $\min h_2(t) = 0$
- $\max h_1(t) = H_1$
- $\max h_2(t) = H_2$

3.5 Gul'ový zásobník na kvapalinu v sérii

Na obrázku (Obr. 6) sa nachádzajú dva gul'ové zásobníky s nekonštantným prierezom zapojené do série. Vstupom do prvého zásobníka je vstupný prítok q_{1v} [m^3/min] a výstupom je odtok q_1 [m^3/min]. Prítokom do druhého zásobníka je vstupný prítok q_{2v} [m^3/min] a výstupný odtok q_2 [m^3/min] z druhého zásobníka. Výstupom druhého zásobníka je odtok q_2 [m^3/min]. Oba zásobníky majú nasledujúce parametre: priemer zásobníka D [m] a výšku hladiny h [m]. Medzi týmito zásobníkmi a na výstupe druhého zásobníka sa nachádzajú ventily.



Obr. 6 Gul'ové zásobníky na kvapalinu v sérii

Vstupnými veličinami systému sú vstupné prítoky, stavovými a taktiež aj výstupnými veličinami sú výšky hladín.

Zjednodušujúce predpoklady

- zásobník je otvorený s nekonštantným prierezom,
- atmosférický tlak pôsobiaci na hladinu kvapaliny je konštantný,
- dna zásobníkov sa nachádzajú v rovnakej výške.

Bilancia a odvodenie matematického modelu[4]

Bilancia a odvození matematického modelu je totožné s modelem valcových zásobníků zapojených do série. Odvození prierezov F [m²] zásobníků je podľa rovníc (5) a (6).

Výsledný matematický model má nasledujúci tvar

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{F_1} [q_{1v}(t) - q_1(t)]$$

$$q_1(t) = k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}, \quad F_1 = \pi h_1(t) [D_1 - h_1(t)]$$
(21)

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{1}{F_2} [q_{2v}(t) + q_1(t) - q_2(t)]$$

$$q_2(t) = k_2 \sqrt{h_2(t)}, \quad F_2 = \pi h_2(t) [D_2 - h_2(t)]$$
(22)

ak $h_2(t) > h_1(t)$, potom $q_1(t) = -q_1(t)$

Ošetrenie chybových stavov saturáciou

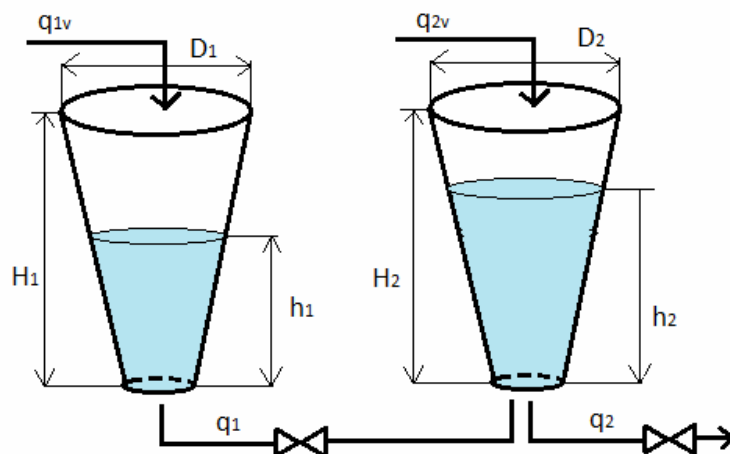
Keďže sa výšky hladín vyskytujú v menovateli, boli obmedzenia nastavené nasledovne:

- $\min h_1(t) = 0,01 * D_1$
- $\min h_2(t) = 0,01 * D_2$
- $\max h_1(t) = 0,99 * D_1$
- $\max h_2(t) = 0,99 * D_2$

3.6 Lievikový zásobník na kvapalinu v sérii

Na obrázku (Obr. 7) je schéma dvoch za sebou zapojených lieviových zásobníkov na kvapalinu o priemere D [m] a výške H [m] s výškou hladiny h [m]. Indexy $(.)_1$ a $(.)_2$ určujú, o ktorý zásobník sa jedná. Prvý zásobník má na vstupe prítok q_{1v} [m³/min] a na výstupe odtok q_1 [m³/min]. Druhý zásobník má dva vstupy a to prítok q_{2v} [m³/min] a odtok q_1 [m³/min] z prvého zásobníka, na výstupe má odtok q_2 [m³/min].

Vstupnými veličinami systému sú vstupné prítoky q_{1v} , q_{2v} , výstupnými a zároveň stavovými veličinami sú výšky hladín h_1 a h_2 . Podobne ako aj dva predchádzajúce zásobníky, aj tento patrí do skupiny mnohorozmerných systémov.



Obr. 7 Lievikový zásobník na kvapalinu v sérii

Zjednodušující předpoklady

- zásobník je otevřený s nekonztantným prierezom,
- atmosférický tlak pôsobiaci na hladinu kvapaliny je konštantný,
- dna zásobníkov sa nachádzajú v rovnakej výške.

Bilancia a odvodenie matematického modelu[4]

Bilancia a odvodenie matematického modelu je totožné s modelom valcových zásobníkov zapojených do série. Odvodenie prierezov F [m²] zásobníkov je podľa rovníc (9) až (12).

Výsledný matematický model má nasledujúci tvar

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{F_1} [q_{1v}(t) - q_1(t)]$$

$$q_1(t) = k_1 \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|}, \quad F_1 = \frac{\pi D_1^2}{4H_1^2} h_1^2(t) \quad (23)$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{1}{F_2} [q_{2v}(t) + q_1(t) - q_2(t)]$$

$$q_2(t) = k_2 \sqrt{h_2(t)}, \quad F_2 = \frac{\pi D_2^2}{4H_2^2} h_2^2(t) \quad (24)$$

ak $h_2(t) > h_1(t)$, potom $q_1(t) = -q_1(t)$

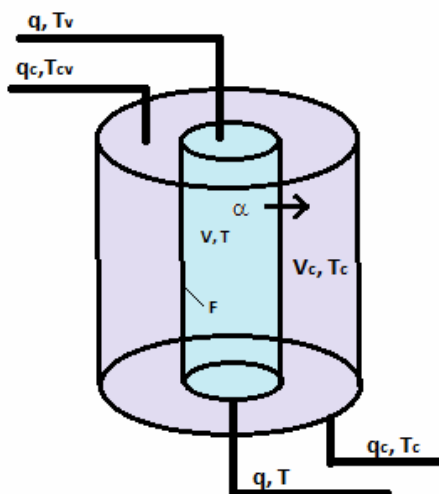
Ošetrenie chybových stavov saturáciou

Výšky hladín sa vyskytujú v menovateli, z tohto dôvodu sú obmedzenia nasledujúce:

- $\min h_1(t) = 0,01 * H_1$
- $\min h_2(t) = 0,01 * H_2$
- $\max h_1(t) = H_1$
- $\max h_2(t) = H_2$

3.7 Prietokový výmenník tepla s premiešavaním

Na obrázku (Obr. 8) sa nachádza prietokový výmenník tepla, ktorý obsahuje chladiacu kvapalinu v plášti a chladenú vo vnútri výmenníka. Vstupmi do výmenníka sú teda chladiaca (index c) a chladená kvapalina (bez indexu) o vstupnej teplote T_{cv} [°C] a T_v [°C] so vstupnými prítokmi q_c [m³/min] a q [m³/min]. Parametre kvapalín sú: hustota ρ [kg/m³], merné teplo c_p [kJ/kgK] a objem V [m³]. Prestup tepla udáva koeficient prestupu tepla α [W/m²K], prestupná plocha je určená parametrom F [m²].



Obr. 8 Prietokový výmenník tepla
s premiešavaním

Vstupnými veličinami sú vstupné teploty chladiacej T_{cv} a chladenej T_v kvapaliny a tiež prietoky chladenej q a chladiacej q_c kvapaliny. Stavovými a zároveň aj výstupnými veličinami sú teploty kvapalín T_c a T .

Zjednodušující predpoklady

- chlazená aj chladiaca kvapalina sú dokonalo premiešavané,
- tepelná kapacita steny oddeľujúca kvapaliny je zanedbaná,
- objemy, prietoky, koeficient prechodu tepla, merné teploty i hustoty oboch kvapalín sú konštantné.

Bilancia a odvodenie matematického modelu[4]

Bilancia tohto modelu sa skladá z bilancie chladenej a chladiacej kvapaliny:

$$\begin{array}{l} \text{Teplo vstupujúce} \\ \text{v prúde kvapaliny} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Teplo odchádzajúce} \\ \text{v prúde kvapaliny} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Teplo prestupujúce do} \\ \text{chladiacej kvapaliny} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Teplo v objeme} \\ \text{V akumulované} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Teplo vstupujúce} \\ \text{v prúde kvapaliny} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Teplo prestupujúce z} \\ \text{chladiacej kvapaliny} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Teplo odchádzajúce} \\ \text{v prúde kvapaliny} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Teplo v objeme} \\ \text{V}_c \text{ akumulované} \end{array}$$

$$q\rho c_p T_v = q\rho c_p T + F\alpha(T - T_c) + V\rho c_p \frac{dT}{dt} \quad (25)$$

$$q_c \rho_c c_{p_c} T_{c_v} + F\alpha(T - T_c) = q_c \rho_c c_{p_c} T_c + V_c \rho_c c_{p_c} \frac{dT_c}{dt} \quad (26)$$

V rovniciach (25) a (26) osamostatníme derivácie a vykonáme úpravy, aby boli rovnice ľahšie použiteľné pri modelovaní v Simulinku. Týmto získame výsledný matematický model s počiatočnými podmienkami $T(0) = T^s$ a $T_c(0) = T_c^s$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{qa_1 T_v(t) - qa_1 T(t) - a_2 [T(t) - T_c(t)]}{a_3} \quad (27)$$

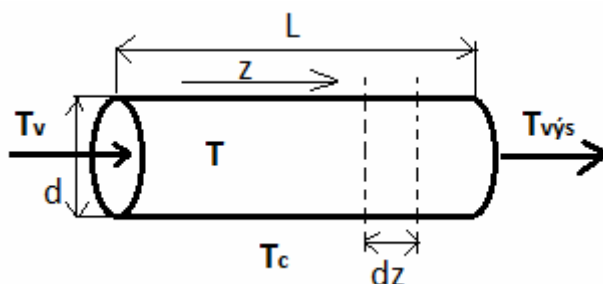
$$\text{kde } a_1 = \rho c_p ; a_2 = F\alpha ; a_3 = V\rho c_p$$

$$\frac{dT_c(t)}{dt} = \frac{q_c b_1 T_{c_v}(t) - q_c b_1 T_c(t) + a_2 [T(t) - T_c(t)]}{b_2} \quad (28)$$

$$\text{kde } b_1 = \rho_c c_{p_c} ; b_2 = V_c \rho_c c_{p_c}$$

3.8 Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla

Na obrázku (Obr. 9) sa nachádza rúrkový výmenník tepla o priemere d [m] a dĺžke L [m], v ktorom prúdi chladená kvapalina o teplote T [°C]. Kvapalina je chladená prestupom tepla cez steny trubky do jej okolia (teplota okolia T_c [°C]). Priestorová nezávisle premenná z patrí do intervalu $\langle 0, L \rangle$.



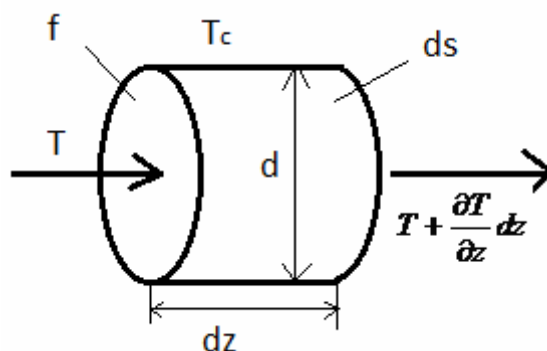
Obr. 9 Jednokapacitný rúrkový výmenník tepla

Ide o model systému so spojito rozloženými parametrami, čo znamená, že teplota kvapaliny sa mení pozdĺž rúrky a v dynamickom stave je funkciou priestorovej nezávisle premennej a zároveň aj funkciou času.

Do systému vstupujú dve veličiny, a to teplota okolia $T_c(t)$ a teplota kvapaliny na vstupe $T_v(t)$. Stavovou veličinou je teplota kvapaliny vo vnútri rúrky $T(z,t)$ a na výstupe je teplota kvapaliny $T_{vys}(t)$.

Zjednodušujúce predpoklady

- hustota ρ [kg/m³] , koeficient prestupu tepla α [W/m²K] , merné teplo c_p [kJ/kgK] a prietok q [m³/min] chladenej kvapaliny sú konštantné,
- ideálny piestový tok kvapaliny,
- tepelná kapacita steny rúrky je zanedbaná.



Obr. 10 Objemový element rúrky

Bilancia a odvodenie matematického modelu[4]

Matematický model jednodukapacitného rúrkového výmenníka vytvoríme z bilancie objemového elementu rúrky (pozri Obr. 10), kde je ds [m²] priestupná plocha objemového elementu rúrky a f [m²] je jeho prierez.

$$\begin{array}{l} \text{Teplo vstupujúce} \\ \text{do elementu} \\ \text{v prúde kvapaliny} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Teplo odchádzajúce} \\ \text{z elementu} \\ \text{v prúde kvapaliny} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Teplo} \\ \text{prestupujúce} \\ \text{do okolia} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Teplo akumulované} \\ \text{v objeme } dV \end{array}$$

$$q\rho c_p T = q\rho c_p \left(T + \frac{\partial T}{\partial z} dz \right) + ds\alpha(T - T_c) + dV\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29)$$

Dosadením $ds = \pi d dz$, $dV = f dz = \pi \frac{d^2}{4} dz$ a po úpravách dostaneme model výmenníku, ktorý je vyjadrený parciálnou diferenciálnou rovnicou

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} = a(T_c - T) \quad (30)$$

pričom rýchlosť prúdenia kvapaliny v rúrke je $v = \frac{q}{f}$ a konštanta $a = \frac{4\alpha}{d\rho c_p}$. Počiatočné

a okrajové podmienky sú $T(z, 0) = T^s(z)$, $T(0, t) = T_v(t)$.

Model ustáleného stavu

Tento model získame anulovaním derivácie podľa času z rovnice (30), čím získame obyčajnú diferenciálnu rovnicu

$$v \frac{dT^s}{dz} = a(T_c^s - T^s) \quad (31)$$

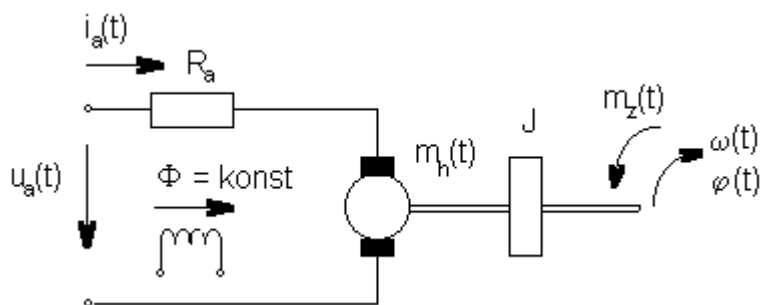
ktorej okrajová podmienka je $T_v(0) = T_v^s$.

Výsledný matematický model použitý pre modelovanie ustáleného stavu v Simulinku je

$$\frac{dT^s}{dz} = \frac{a}{v}(T_c^s - T^s) \quad (32)$$

3.9 Jednosmerný motor riadený prúdom

Na obrázku (Obr. 11) je vidieť schéma jednosmerného motoru s konštantným buđením[5]. Táto podkapitola je venovaná jednosmernému motoru, ktorý je riadený prúdom kotvy. Parametre motora sú: prúd kotvy $i_a(t)$ [A], záťažový moment $m_z(t)$ [Nm], hnací moment $m_h(t)$ [Nm], celkový moment zotrvačnosti J [kgm²], uhlová rýchlosť $\omega(t)$ [rad/s], uhlové natočenie $\varphi(t)$ [rad].



Obr. 11 Jednosmerný motor s konštantným buđením[5]

Vstupom do systému je prúd kotvy $i_a(t)$ a záťažový moment $m_z(t)$, stavovými a zároveň aj výstupnými veličinami je uhlové natočenie $\varphi(t)$ a uhlová rýchlosť $\omega(t)$.

Zjednodušujúce predpoklady

- buďenie kotvy je konštantné,
- celková indukčnosť kotvy je zanedbaná.

Odvodenie matematického modelu

Uhlová rýchlosť je určená pohybovou rovnicou

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_h(t) - m_z(t) \quad (33)$$

pričom hnací moment získame zo vzťahu

$$m_h(t) = k_m \cdot i_a(t) \quad (34)$$

kde k_m je momentová konštanta motora a udáva sa v jednotkách [Nm/A].

Výsledný matematický model má po osamostatnení derivácie tento tvar

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{m_h(t) - m_z(t)}{J} \quad (35)$$

Vzťah medzi uhlovou rýchlosťou a uhlovým natočením je nasledovný

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) \quad (36)$$

3.10 Jednosmerný motor riadený napätím kotvy

Na obrázku (Obr. 11) je vidieť schéma jednosmerného motoru s konštantným buđením[5]. Táto podkapitola je venovaná jednosmernému motoru, ktorý je riadený napätím kotvy. Parametre motora sú: napätie kotvy $u_a(t)$ [V], celkový odpor kotvy R_a [Ω], prúd kotvy $i_a(t)$ [A], záťažový moment $m_z(t)$ [Nm], hnací moment $m_h(t)$ [Nm], celkový moment zotrvačnosti J [kgm²], uhlová rýchlosť $\omega(t)$ [rad/s], uhlové natočenie $\varphi(t)$ [rad].

Vstupom do systému je napätie kotvy $u_a(t)$ a záťažový moment $m_z(t)$, stavovými a zároveň aj výstupnými veličinami je, tak ako aj u predchádzajúceho modelu, uhlové natočenie $\varphi(t)$ a uhlová rýchlosť $\omega(t)$.

Zjednodušujúce predpoklady

- buďenie kotvy je konštantné,
- celková indukčnosť kotvy je zanedbaná.

Odvedenie matematického modelu

Uhlová rýchlosť je určená opäť pohybovou rovnicou

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_h(t) - m_z(t) \quad (37)$$

pričom hnací moment získame zo vzťahu

$$m_h(t) = k_m \cdot i_a(t) \quad (38)$$

kde k_m je momentová konštanta motora a udáva sa v jednotkách [Nm/A]. Prúd $i_a(t)$ získame z nasledujúceho vzťahu

$$i_a(t) = \frac{u_a(t) - k_m \cdot \omega(t)}{R_a} \quad (39)$$

Vzťah medzi uhlovou rýchlosťou a uhlovým natočením je opäť taký istý ako v predchádzajúcom modeli (viď rovnica (36)).

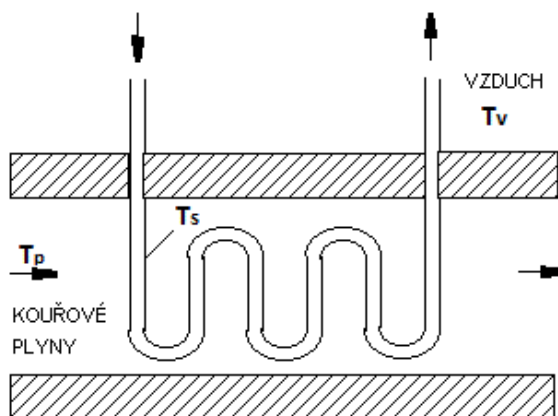
3.11 Rekuperátor pre ohrev vzduchu

Obrázok (Obr. 12) zobrazuje schému rekuperátora pre ohrev vzduchu [5], v ktorom prebieha výmena tepla vedením od dymových plynov cez stenu trubky (súčiniteľ prestupu tepla α_1 [W/m²K]) a od steny trubky k vzduchu (súčiniteľ prestupu tepla α_2 [W/m²K]).

Parametre trubky a ohrievaného vzduchu sú: hustota ρ [kg/m³], merné teplo c_p [kJ/kgK] a objem V [m³]. Indexy použité pri parametroch:

- dymové plyny - $(.)_p$,
- stena trubky - $(.)_s$,
- vzduch - $(.)_v$.

Na vstupe systému je teplota dymových plynov T_p [°C] a na výstupe zo systému je teplota vzduchu T_v [°C]. Stavovými veličinami je teplota steny trubky T_s [°C] a teplota vzduchu T_v .



Obr. 12 Rekuperátor pre ohrev vzduchu[5]

Zjednodušující predpoklady

- rozdiel teplôt na stenách trubky sa zanedbá.

Matematický model

Pre vzťah dymové plyny – stena trubky platí

$$V_s \rho_s c_{ps} \frac{dT_s(t)}{dt} = \alpha_1 F_1 [T_p(t) - T_s(t)] \quad (40)$$

kde F_1 je vonkajší povrch trubky v $[m^2]$.

Pre vzťah stena trubky – vzduch platí

$$V_v \rho_v c_{pv} \frac{dT_v(t)}{dt} = \alpha_2 F_2 [T_s(t) - T_v(t)] \quad (41)$$

kde F_2 je vnútorný povrch trubky v $[m^2]$.

Úpravou rovníc (40) a (41) získame výsledný matematický model, ktorý bude použitý pri modelovaní rekuperátora v Simulinku

$$\frac{dT_s(t)}{dt} = a_s [T_p(t) - T_s(t)] \quad (42)$$

$$a_s = \frac{\alpha_1 F_1}{V_s \rho_s c_{ps}}$$

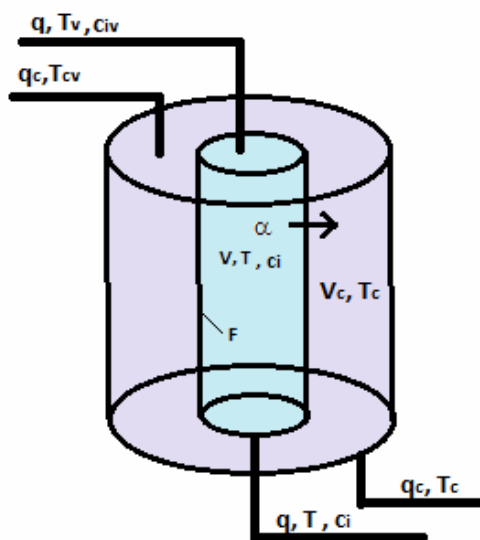
$$\frac{dT_v(t)}{dt} = a_v [T_s(t) - T_v(t)] \quad (43)$$

$$a_v = \frac{\alpha_2 F_2}{V_v \rho_v c_{pv}}$$

3.12 Prietokový chemický reaktor s chladením v plášti

Na obrázku (Obr. 13) sa nachádza prietokový chemický reaktor s reakčnou zmesou v reaktore a s chladiacou kvapalinou v plášti[4]. Budeme uvažovať obecnú exotermickú reakciu, v ktorej reaguje i zložiek v j reakciách, pričom určitá zložka nemusí reagovať vo všetkých reakciách súčasne. Na vstupe do reaktora je vstupný prítok reakčnej zmesi q $[m^3/min]$, jej teplota T_v $[m^3/min]$ a vstupné koncentrácie zložiek c_{iv} $[kmol/m^3]$. Na vstupe do

plášť'a je vstupný prítok chladiacej kvapaliny q_c [m^3/min] a jej teplota T_{cv} [$^{\circ}\text{C}$]. Stavovými veličinami sú koncentrácia jednotlivých zložiek v reaktore $c_i(t)$ pre $i=1,2,\dots,i_0$, teplota reakčnej zmesi v reaktore $T(t)$ [$^{\circ}\text{C}$] a teplota chladiacej kvapaliny $T_c(t)$ [$^{\circ}\text{C}$] v plášti. Parametre reakčnej zmesi v reaktore a chladiacej kvapaliny: objem V [m^3], hustota ρ [kg/m^3], merné teplo c_p [kJ/kgK].



Obr. 13 Prietokový chemický reaktor
s chladením v plášti

Zjednodušujúce predpoklady

- reakčná zmes aj chladiaca kvapalina sú dokonalo premiešavané,
- tepelná kapacita steny oddeľujúca reakčnú zmes od kvapaliny je zanedbaná,
- objemy, koeficient prechodu tepla, merné teploty aj hustoty reakčnej zmesi a chladiacej kvapaliny sú konštantné.

Bilancia a odvodenie matematického modelu

Bilancia pre jednotlivé zložky:

$$\begin{array}{l} \text{Množstvo zložky} \\ \text{vstupujúce do} \\ \text{reaktoru} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Množstvo zložky} \\ \text{odchádzajúce z} \\ \text{reaktoru} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Množstvo zložky} \\ \text{v reaktore} \\ \text{zreagované} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Množstvo zložky} \\ \text{v objeme } V \\ \text{akumulované} \end{array}$$

$$qc_{iv} = qc_i - V \sum_{j=1}^{j_0} r_{ij} + V \frac{dc_i}{dt}, \text{ pre } i = 1, \dots, i_0 \quad (44)$$

s počiatocnou podmienkou $c_i(0) = c_i^s, i = 1, \dots, i_0$. r_{ij} je rýchlosť reakcie i -tej zložky v j -tej reakcii.

Tepelná bilancia reakčnej zmesi:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Teplo} & & \text{Teplo} & & \text{Teplo} \\ \text{vstupujúce} & + & \text{vznikajúce} & = & \text{odchádzajúce} \\ \text{v prúde} & & \text{v priebehu} & & \text{v prúde reakčnej} \\ \text{reakčnej zmesi} & & \text{reakcií} & & \text{zmesi} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Teplo} \\ \text{prestupujúce} \\ \text{do chladiwa} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Teplo} \\ \text{v objeme } V \\ \text{akumulované} \end{array}$$

$$q\rho c_p T_v + V \sum_{j=1}^{j_0} h_j r_j = q\rho c_p T + F\alpha(T - T_c) + V\rho c_p \frac{dT}{dt} \quad (45)$$

s počiatocnou podmienkou $T(0) = T^s$. h_j je reakčná entalpia j -tej reakcie [kJ/kmol], r_j je rýchlosť j -tej reakcie.

Tepelná bilancia chladiacej zmesi:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Teplo} & & \text{Teplo} & & \text{Teplo} \\ \text{vstupujúce} & + & \text{prestupujúce} & = & \text{odchádzajúce} \\ \text{do plášťa v prúde} & & \text{z reakčnej zmesi} & & \text{z plášťa v prúde} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Teplo} \\ \text{v objeme} \\ \text{V}_c \text{ akumulované} \end{array}$$

$$q_c \rho_c c_{p_c} T_{cv} + F\alpha(T - T_c) = q_c \rho_c c_{p_c} T_c + V_c \rho_c c_{p_c} \frac{dT_c}{dt} \quad (46)$$

s počiatocnou podmienkou $T_c(0) = T_c^s$. V rovniciach (45) a (46) je F prestupná plocha [m²] a α je koeficient prestupu tepla [W/ m²K]. Rýchlostná konštanta k_m je daná vzťahom

$$k_m = k_{m0} e^{-\frac{E_m}{RT}}, \text{ pre } m=1, \dots, m_0 \quad (47)$$

kde k_{m0} je pre-exponenciálny faktor a E_m je aktivačná energia.

Pre modelovanie v Simulinku bol použitý dvojzložkový (zložka A a B, pričom žiadaným produktom je látka B) prietokový chemický reaktor s chladením v plášti. Rovnice reakčných rýchlostí pre zložku A a B sú:

$$r_A = \frac{dc_A}{dt} = -k_1 c_A, \quad r_B = \frac{dc_B}{dt} = k_1 c_A - k_2 c_B \quad (48)$$

Reakčné rýchlosti pre obe reakcie sú:

$$r_1 = k_1 c_A, \quad r_2 = k_2 c_B \quad (49)$$

Úpravou rovníc (44) až (47) získame výsledný matematický model chemického reaktoru.

$$\frac{dc_A}{dt} = \frac{qc_{Av} - qc_A - V k_1 c_A}{V} \quad (50)$$

$$\frac{dc_B}{dt} = \frac{qc_B - qc_B + V(k_1 c_A - k_2 c_B)}{V}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(q\rho c_p T_v + V(h_1 k_1 c_A + h_2 k_2 c_B)) - q\rho c_p T - F\alpha(T - T_c)}{V\rho c_p} \quad (51)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{q_c \rho_c c_{pc} T_{cv} + F\alpha(T - T_c) - q_c \rho_c c_{pc} T_c}{V_c \rho_c c_{pc}} \quad (52)$$

$$k_1 = k_{10} e^{-\frac{E_1}{RT}}, \quad k_2 = k_{20} e^{-\frac{E_2}{RT}} \quad (53)$$

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

4 SIMULINK A JEHO ŠTANDARDNÉ BLOKY

4.1 Simulink

Je nadstavbou Matlabu a používa sa pre modelovanie a simuláciu dynamických systémov, pričom využíva algoritmy Matlabu pre numerické riešenie nelineárnych diferenciálnych a diferenčných rovníc. Práca v Simulinku je veľmi intuitívna a jednoduchá, keďže schémy modelov sa vytvárajú jednoduchým prenášaním funkčných blokov z knižnice do oblasti, kde sa vytvára schéma modelu. Okrem bežných úloh poskytuje Simulink vhodné prostredie pre vytváranie veľmi zložitých modelov s využitím pamäte PC. Pre zložitejšie systémy umožňuje rozdelenie systému na menšie časti – vytvorenie tzv. subsystémov, čím sa schéma systému zjednoduší a bude prehľadnejšia. Simulink ponúka možnosť spustiť simuláciu len na určitej časti simulačného modelu na základe výsledku logickej podmienky. Veľkou výhodou Simulinku je jeho otvorená architektúra, ktorá umožňuje užívateľom vytvárať nové bloky a obohatiť tak jeho rozsiahlu knižnicu. Taktiež dovoľuje vkladať funkcie napísané užívateľom v jazyku C (táto možnosť platí aj u Matlabu). Simulink je podporovaný na platformách ako je Windows, Macintosh a Linux. Oblasti, v ktorých je možné využiť Simulink sú:

- aplikovaná matematika,
- automatické riadenie a regulácia,
- spracovanie signálu a komunikácie,
- spracovanie obrazu,
- meranie a testovanie,
- výpočtová biológia,
- finančné modelovanie a analýza,
- modelovanie fyzikálnych sústav. [14]

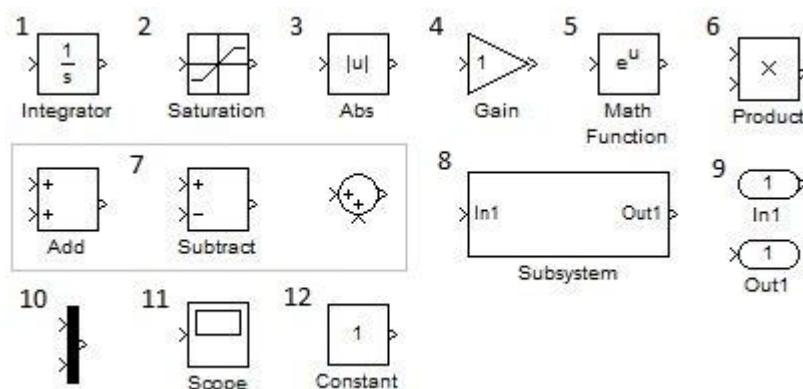
Matlab a Simulink pochádzajú z dielne spoločnosti The MathWorks, ktorá má sídlo v Massachusetts, USA. Výhradným zástupcom firmy MathWorks je pre Slovensko a Českú republiku spoločnosť Humusoft s.r.o. Firma zabezpečuje distribúciu a užívateľskú podporu

softvéru pre vedeckotechnické výpočty a simuláciu dynamických systémov Matlab a Simulink. Najnovšia verzia, ktorá je ponúkaná na českom a slovenskom trhu je R2012a.

Pri vytváraní modelov bola použitá verzia Matlabu R2008a a verzia Simulinku 7.6.0. Keďže na Fakulte aplikovanej informatiky UTB v Zlíne sa v učebniach a laboratóriách nachádzajú staršie verzie tohto programu, boli všetky modely uložené do verzie Matlabu R13 a verzie Simulinku 5.0. Týmto by mala byť zabezpečená funkčnosť všetkých modelov v učebniach a laboratóriách fakulty.

4.2 Využitie bloky Simulinku

Simulink ponúka nespočetné množstvo preddefinovaných blokov, ktoré sú zaradené do 16 knižníc. Základné knižnice Simulinku sú pomenované podľa typov blokov, a sú to napríklad spojité, nespojité, diskkrétne, logické a bitové operácie, matematické funkcie, porty a subsystemy, signálové znaky, smerovanie signálu, užívateľsky definované funkcie, zdroje, a iné. V tejto kapitole je uvedený základný popis blokov, ktoré boli použité pri tvorbe modelov (pozri kapitola 3).

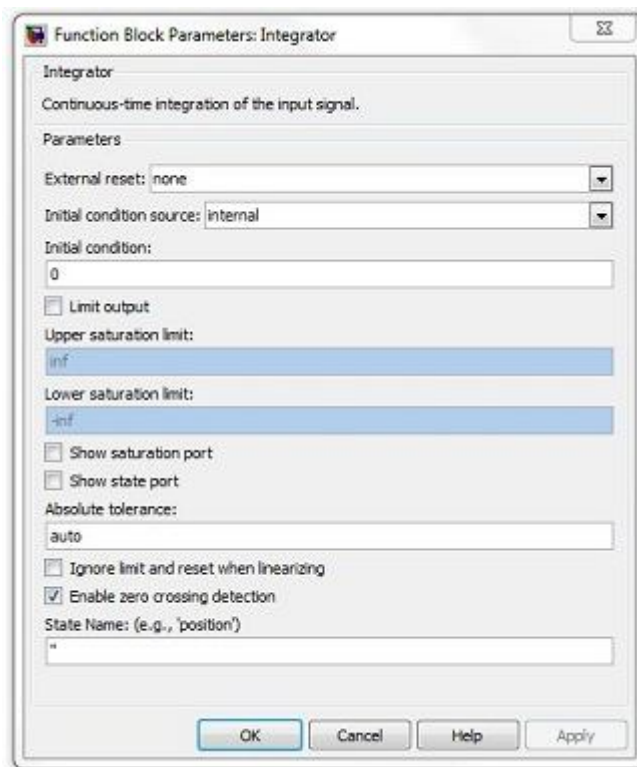


Obr. 14 Použité bloky Simulinku

4.2.1 Integrátor (integrator)

Blok číslo 1 (pozri Obr. 14), knižnica Continuous. Úlohou tohto bloku je zintegrovať vstupnú veličinu a predať ju na výstup. Ponukou External reset je možné nastaviť vynulovanie integrátora pomocou externého signálu, ktorý reaguje na vzostupnú alebo zostupnú hranu. Initial condition source určuje akým spôsobom sa zadá počiatočná hodnota integrátora. Ponúka dve možnosti, a to priame zadanie hodnoty v parametroch bloku

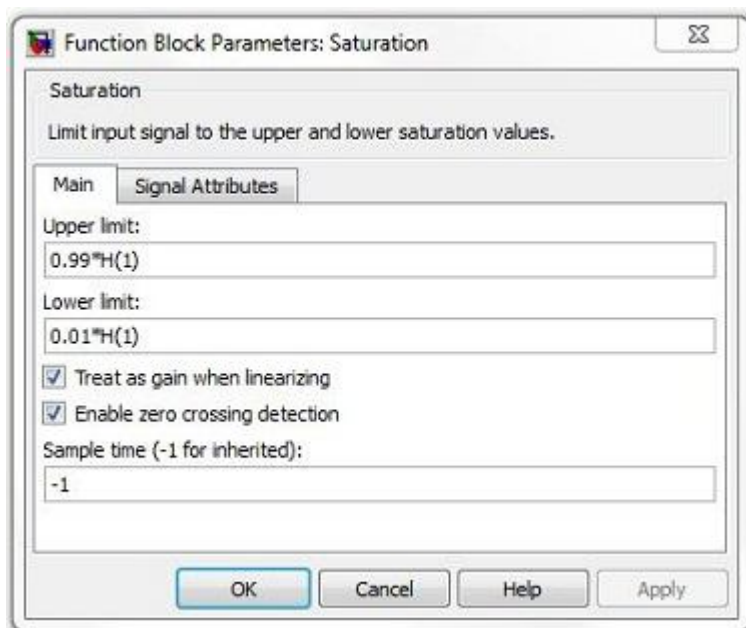
(internal) alebo vonkajšou veličinou (external). V prípade prvej varianty sa počiatočná hodnota zadáva do poľa Initial condition. Výstupnú hodnotu môžeme obmedziť nastavením parametrov Upper saturation limit a Lower saturation limit.



Obr. 15 Nastavenie integrátora

4.2.2 Saturácia (saturation)

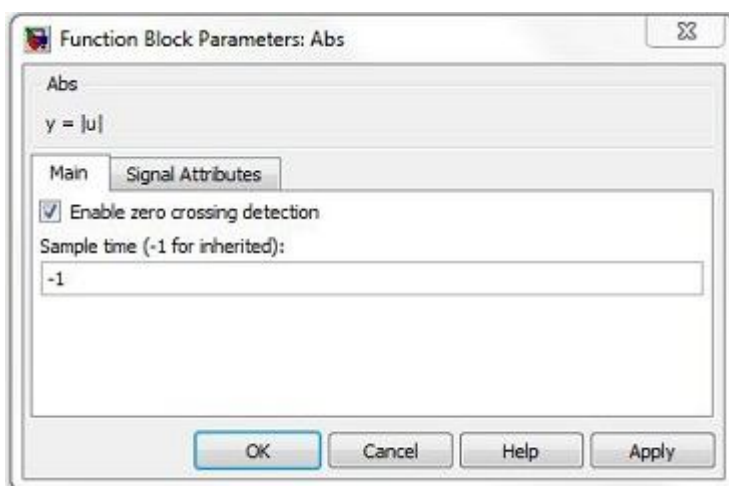
Blok číslo 2 (pozri Obr. 14), knižnica Discontinuities. Tento blok umožňuje obmedziť vstupný signál hornou a dolnou hodnotou. Napríklad pri tvorbe modelu guľového zásobníka na kvapalinu v sérii (pozri kapitola 3.5) bola saturácia použitá na obmedzenie výstupnej výšky hladiny, pričom dolná hranica bola nastavená na 1% výšky zásobníku a horná hranica na 99% výšky zásobníku.



Obr. 16 Nastavenie bloku Saturation

4.2.3 Absolútna hodnota (abs)

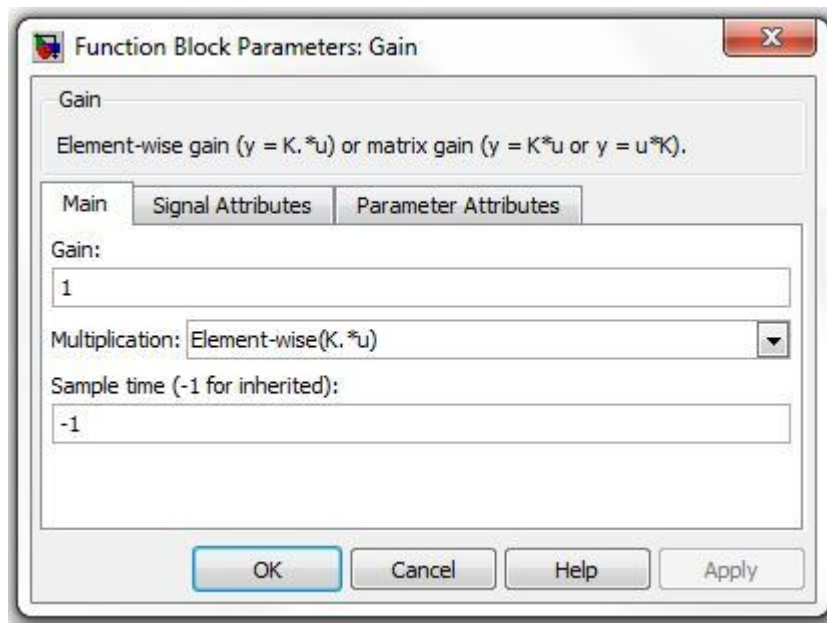
Blok číslo 3 (pozri Obr. 14), Patrí do knižnice Math Operations a jeho úlohou je z hodnoty na vstupe vytvoriť absolútnu hodnotu na výstupe. Tento blok podporuje detekciu prechodu nulou, ktorá sa dá zapnúť alebo vypnúť v dialógovom okne s názvom Enable zero crossing detection.



Obr. 17 Nastavenie bloku Abs

4.2.4 Zosilnenie (gain)

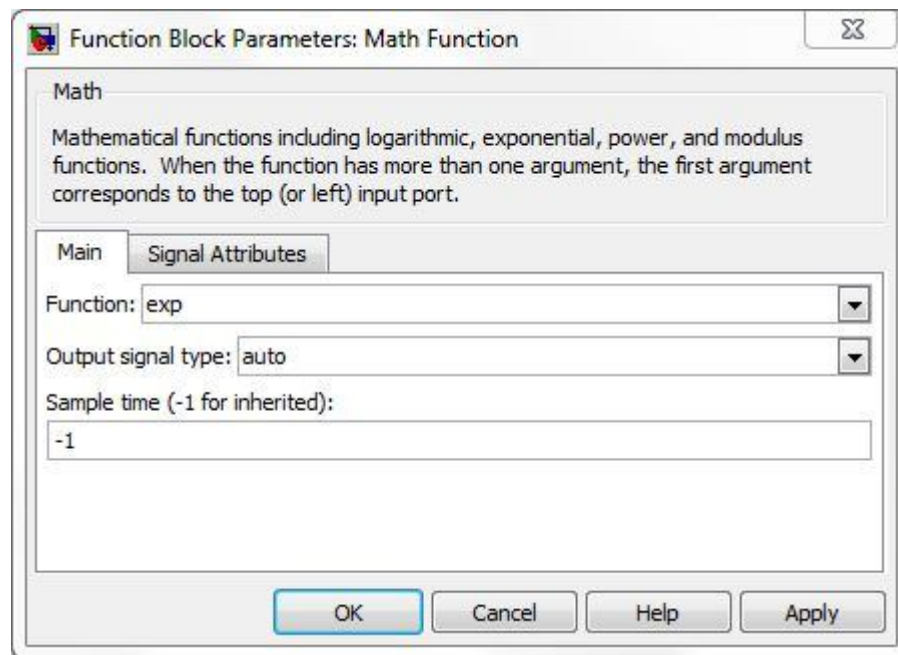
Blok číslo 4 (pozri Obr. 14), knižnica Math Operations. Blok Gain zosilňuje (násobí) vstupnú hodnotu konštantou. Zosilňujúcim parametrom môže byť skalár, vektor alebo matica. Pri vektore či matici sa ponúka možnosť výberu typu násobenia v parametre Multiplication.



Obr. 18 Nastavenie zosilnenia

4.2.5 Matematická funkcia (math function)

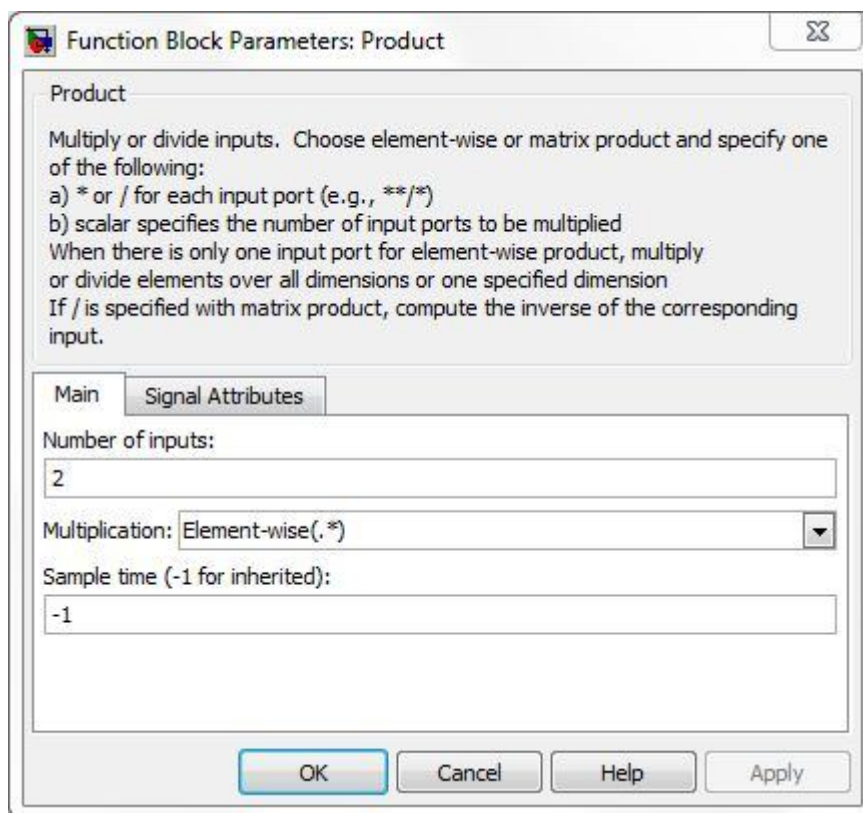
Blok číslo 5 (pozri Obr. 14), knižnica Math Operations. Blok vykonáva bežné matematické funkcie ako sú napríklad: exponenciálna (exp) a logaritmická (log) funkcia, mocnina základu 10 (10^u), druhá mocnina (square), odmocnina (sqrt), a iné. Typ funkcie sa nastavuje v parametre Function a typ výstupného signálu sa dá nastaviť na automatický, reálne čísla alebo komplexné čísla. Pri vytváraní modelov boli použité tieto typy matematických funkcií: exponenciálna funkcia, druhá mocnina, odmocnina a recipročná funkcia.



Obr. 19 Nastavenie matematických funkcií

4.2.6 Súčin (product)

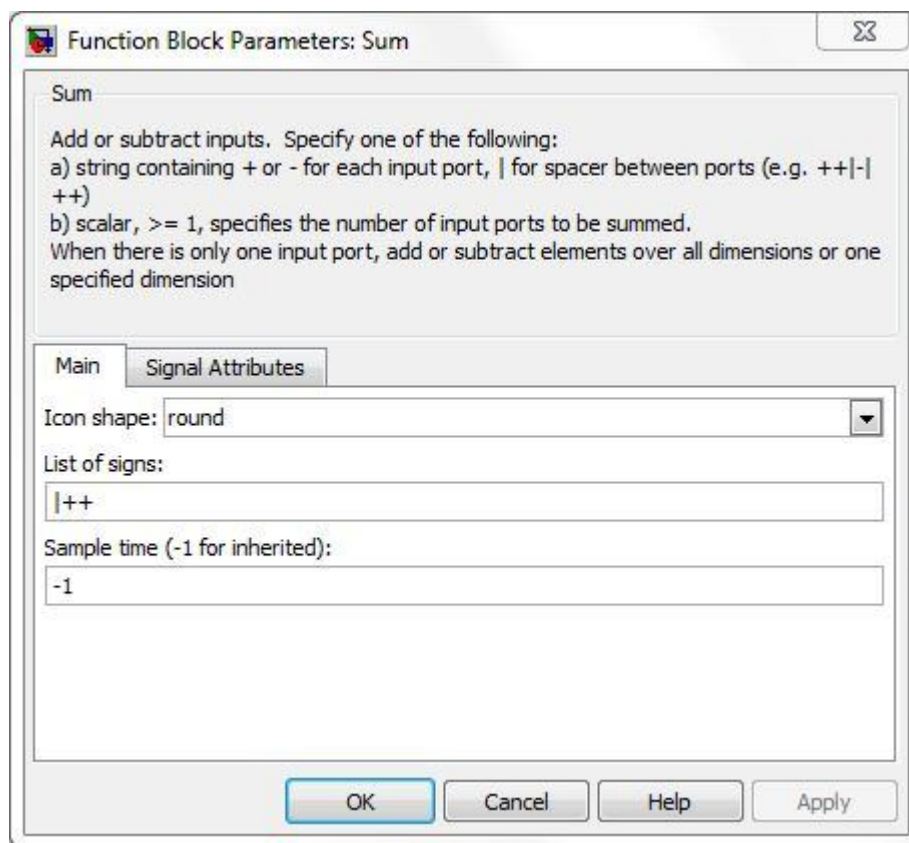
Blok číslo 6 (pozri Obr. 14), knižnica Math Operations. Úlohou bloku Product je násobenie (znamienko $*$) alebo delenie (znamienko $/$) hodnôt privedených na vstup bloku. Počet vstupov sa nastavuje v parametre Number of inputs. V prípade, že chceme napríklad 4 vstupy, z toho 2 chceme deliť a 2 násobiť, tak zadáme miesto počtu vstupov nasledovné $*/*$. Typ násobenia sa určuje v parametre Multiplication, ktorý ponúka dve varianty, a to násobenie po prvkoch alebo maticovo.



Obr. 20 Nastavenie bloku Product

4.2.7 Súčet, rozdiel, suma (add, subtract, sum)

Bloky označené číslom 7 (pozri Obr. 14), knižnica Math Operations. Sú to tri rôzne bloky, ktoré však majú tú istú funkciu. Používajú sa na sčítavanie a odčítavanie vstupov. Nastavenia týchto troch blokov sú úplne totožné, používajú sa tu znaky + pre sčítanie, - pre odčítanie a | pre medzeru medzi jednotlivými vstupmi. Týmito znakmi sa nastavuje počet a typ vstupov v parametre List of signs. Pomocou Icon shape sa dá nastaviť tvar daného bloku, buď na kruhový alebo obdĺžnikový.



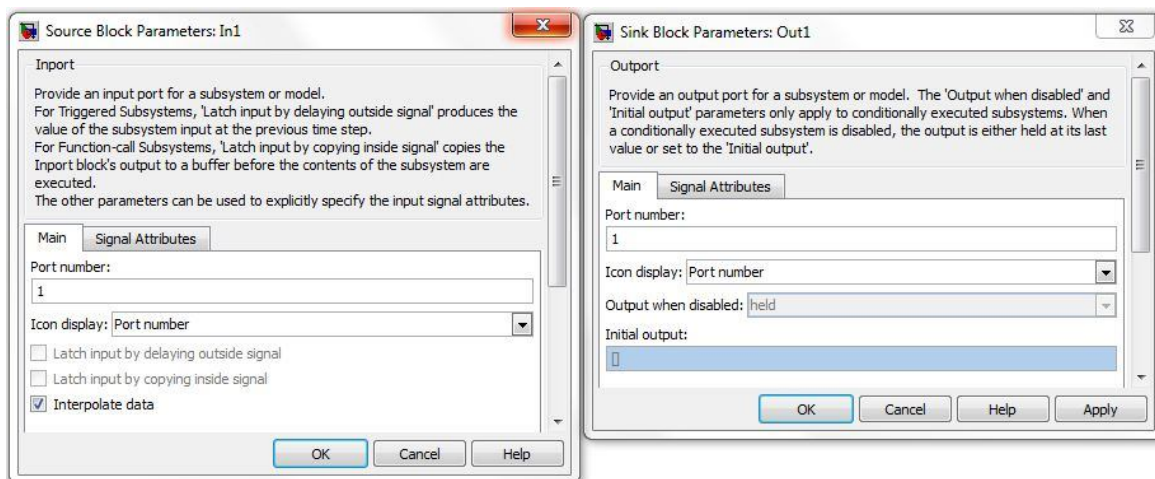
Obr. 21 Nastavenie bloku Sum

4.2.8 Subsystem (subsystem)

Blok číslo 8 (pozri Obr. 14), knižnica Port and subsystems. Je to blok reprezentujúci systém, ktorý v sebe skrýva. Využíva sa najmä pre zjednodušenie a sprehl'adnenie zložitých modelov a najmä vtedy, ak sa model skladá z viacerých podobných alebo rovnakých častí. Subsystem komunikuje s okolím prostredníctvom vstupov (inport) a výstupov (outport). Výhodou tohto bloku je možnosť vytvoriť užívateľsky príjemný spôsob zadávania vstupných údajov. Podrobný postup vytvorenia subsystemu a masky je uvedený v kapitolách 5.1.2, 5.2.2, 5.3.2.

4.2.9 Vstup, výstup (inport, outport)

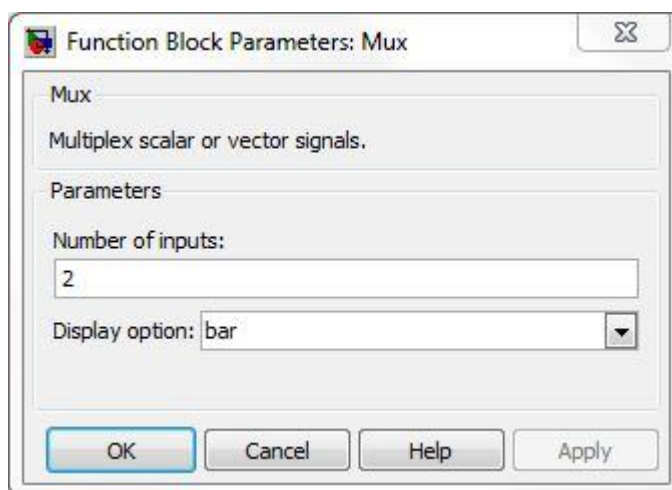
Blok číslo 9 (pozri Obr. 14), knižnica Port and subsystems. Inport poskytuje vstup pre subsystem alebo model. Outport poskytuje výstup pre subsystem alebo model. V parametroch je možné nastaviť číslo vstupu alebo číslo výstupu (pre prípad bloku outport) v parametre Port number.



Obr. 22 Nastavenie vstupu a výstupu

4.2.10 Zlučovač (mux)

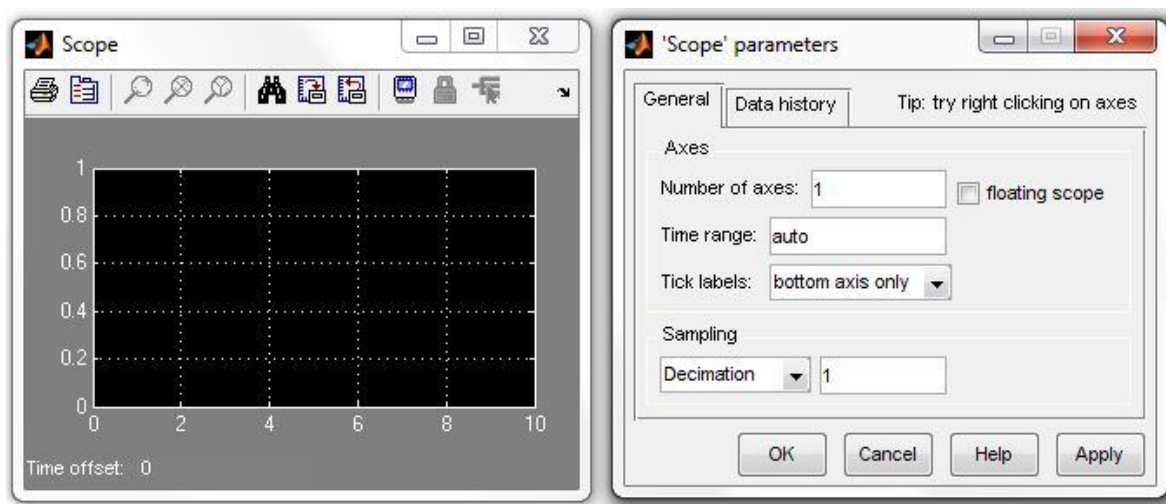
Blok číslo 10 (pozri Obr. 14), knižnica Signal routing. Tento blok zlučuje niekoľko vstupných signálov do jedného vektorového výstupu. Vstupom môže byť vektor alebo skalár, avšak všetky vstupné signály musia byť rovnakého dátového a číselného typu. Počet vstupných signálov sa nastavuje v parametre Number of inputs. Parametr Display option umožňuje 3 typy zobrazení bloku. Pri modelovaní bol zlučovač použitý pre spojenie viacerých výstupov subsystému do jedného signálu, ktorý bol privedený na grafický výstup.



Obr. 23 Nastavenie bloku Mux

4.2.11 Grafický výstup (scope)

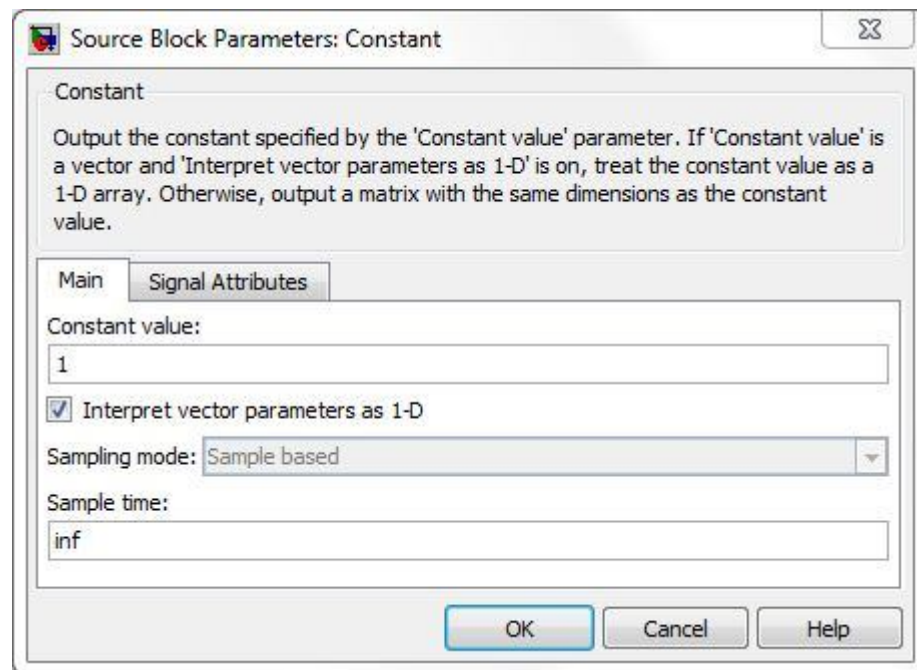
Blok číslo 11 (pozri Obr. 14), knižnica Sinks. Blok Scope zobrazuje dáta získané simuláciou v závislosti na čase vo forme grafu. Nastavenie tohto bloku sa vykonáva cez ikonu Parameters, ktorá obsahuje dve záložky, a to General a Data history. V prvej záložke je možnosť nastaviť počet os (Number of axes), rozsah osi x (Time range), kde sa dá zadať číselná hodnota dĺžky osi, alebo ponechať hodnotu „auto“, čo spôsobí nastavenie osi x na dobu simulácie. Záložka Data history umožňuje zadať rozsah dát, ich názov a formát, v ktorom sa majú uložiť. Dáta je možné následne uložiť do súboru s koncovkou .mat a ďalej s nimi pracovať.



Obr. 24 Nastavenie bloku Scope

4.2.12 Konštanta (constant)

Blok číslo 12 (pozri Obr. 14), knižnica Sources. Je to jeden z najjednoduchších a veľmi používaných blokov, neobsahuje žiaden vstup. Výstupom je konštanta zadaná do parametru Constant value, ktorá môže mať tvar skalára, vektora alebo matice.



Obr. 25 Nastavenie bloku Constant

5 UKÁŽKY TVORBY MODELU

Cieľom tejto diplomovej práce bolo implementovať 12 modelov technologických procesov preberaných v predmete Analýza a simulácia technologických procesov v programovom systéme Matlab/Simulink. V tejto kapitole je uvedený podrobný popis modelovania procesov, ktorý je predvedený na modely guľového zásobníka na kvapalinu v sérii (viď kapitola 3.5), na modely jednodukapacitného rúrkového výmenníka tepla (viď kapitola 3.8) a na modely rekuperátora pre ohrev vzduchu (viď kapitola 3.11).

Pred začatím samotného modelovania je základnou podmienkou mať spustený Matlab, pomocou ktorého spustíme Simulink zadáním príkazu *simulink* do príkazového riadka. Po zadaní tohto príkazu sa nám otvorí okno s knižnicami a cez menu File-New-Model alebo príkazom Ctrl+N vytvoríme okno pre nový model. Ako už bolo spomínané v kapitole 4.1, práca v Simulinku je veľmi jednoduchá a intuitívna. Modely sa vytvárajú jednoduchým prenesením z knižnice do okna modelu. Simulink prideluje každému bloku jednoznačné pomenovanie. Toto pomenovanie je možné zmeniť kliknutím na názov, ktorý chceme zmeniť. Simulink vyžaduje, aby jednotlivé bloky nachádzajúce sa v jednom modeli mali rozlíšiteľné pomenovanie. Tzn., že ak vložíme do modelu dva tie isté bloky Constant, tak prvý bude mať pomenovanie Constant a druhý Constant1.

5.1 Guľový zásobník na kvapalinu v sérii

Vytváranie modelu si predstavíme na príklade guľového zásobníka na kvapalinu zapojeného do série s parametrami uvedenými v tabuľke (Tab. 1). Pri modelovaní bude použitý matematický model zásobníka, ktorý je uvedený v rovniciach (21) a (22).

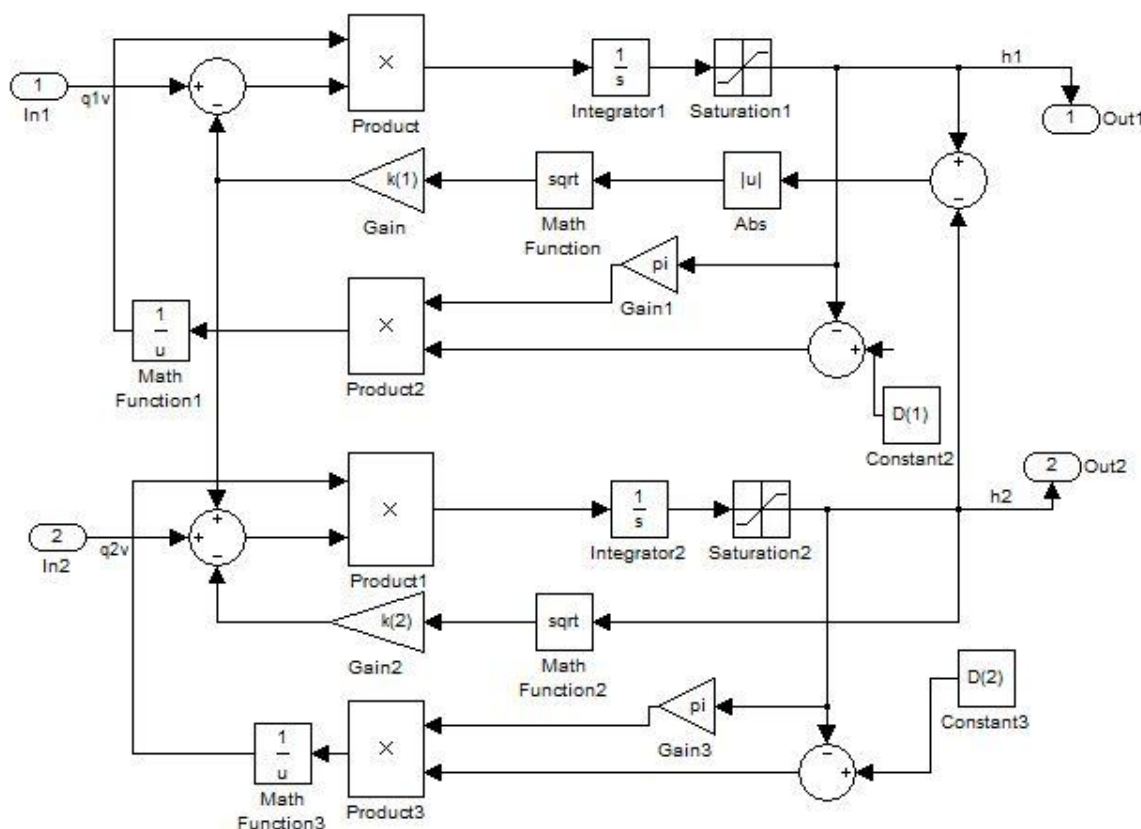
Tab. 1 Parametre pre guľový zásobník na kvapalinu v sérii

Parametre	1. zásobník	2.zásobník
Priemer [m]	3	3
Počiatočná výška hladiny [m]	0,5	0,2
Konštanta ventilu [$\text{m}^{2,5}/\text{min}$]	0,25	0,5
Vstupný prítok [m^3/min]	0,3	0,3

5.1.1 Vytvorenie modelu a nastavenie blokov

Pre vytvorenie modelu potrebujeme nasledujúce bloky: In, Out, Sum, Product, Integrator, Saturation, Abs, Math function, Gain, Constant, Mux, Scope.

Po prenesení všetkých týchto blokov je potrebné nastaviť ich parametre a pospájať s ostatnými blokmi. Parametre bloku nastavíme dvojitém kliknutím ľavého tlačidla myši na konkrétny blok.



Obr. 26 Model guľového zásobníka na kvapalinu v sérii

Cieľom tohto simulačného modelu (viď Obr. 26) je nájsť časové priebehy funkcií výšok hladín h_1 a h_2 , ktoré získame na výstupe integrátorov (Integrator1 a Integrator2). Výstup integrátorov smeruje do bloku Saturation1 (v prípade prvého zásobníka) a do bloku Saturation2 (v prípade druhého zásobníka). Parametre bloku Saturation1 nastavíme na nasledujúce hodnoty: *Upper limit* na hodnotu $0,99 \cdot D(1)$ a *Lower limit* na hodnotu $0,01 \cdot D(1)$. Parametre bloku Saturation2 nastavíme nasledovne: *Upper limit* na hodnotu $0,99 \cdot D(2)$ a *Lower limit* na hodnotu $0,01 \cdot D(2)$. Výstupom celého systému je výška hladiny $h(1)$ (blok Out1) a výška hladiny $h(2)$ (blok Out2). V integrátore1 do položky *Initial condition* vložíme hodnotu $h_0(1)$ a do druhého integrátoru vložíme do tej istej položky

hodnotu $h_0(2)$. Sú to počiatočné výšky hladín v zásobníkoch, pričom číslce 1 a 2 v zátvorkách určujú, o ktorý prvok vektoru sa jedná. Je potrebné uviesť, že parametre modelov sú zadávané vektorovo do menu vytvoreného v maske a sú zadávané cez názvy premenných.

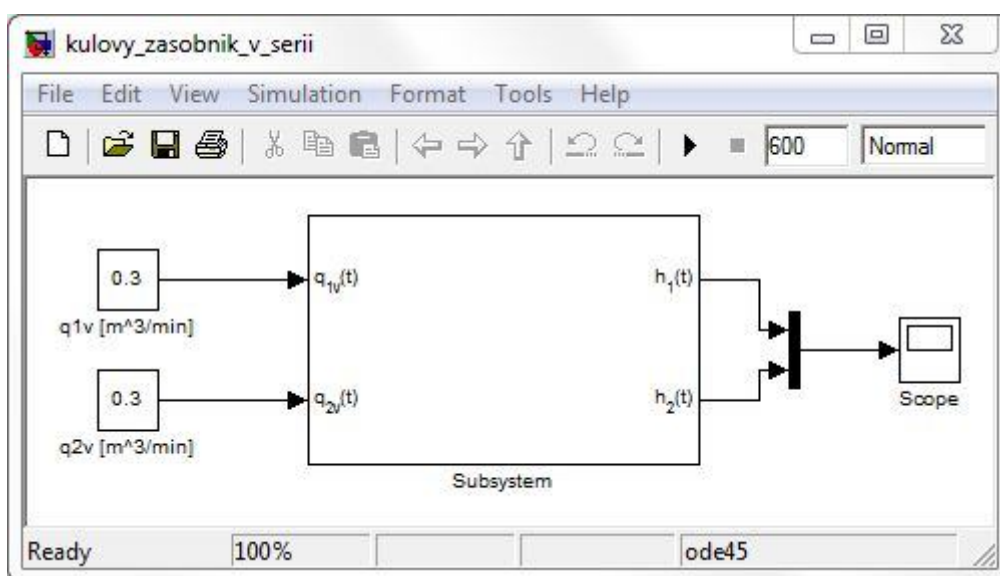
Na vstupe do prvého integrátoru sa nachádza súčin dvoch signálov (blok Product). Prvý signál predstavuje vzťah $\frac{1}{F_1}$, ktorý je získaný nasledovne. Výška hladiny $h(1)$ zosilnená o hodnotu π (Gain1) tvorí prvý vstup do bloku Product2, kde je vynásobená rozdielom priemeru $D(1)$ (Constant2) prvého zásobníka a výšky hladiny $h(1)$ prvého zásobníka. Výstup z bloku Product2 je prevedený do menovateľa pomocou funkcie *reciprocal* vybranej v parametre Function bloku MathFunction1. Druhý signál predstavuje rozdiel vstupného prítoku q_{1v} (blok In1) do prvého zásobníka a odtoku q_1 z prvého zásobníka. Pričom q_1 je získané z rozdielu výšky hladiny $h(1)$ a $h(2)$ privedenej na vstup bloku Abs, ktorého výstup je odmocnený funkciou *sqr*t (MathFunction) a zosilnený o konštantu ventilu $k(1)$ (blok Gain) prvého zásobníka.

Na vstupe do druhého integrátoru sa nachádza súčin (Product1) dvoch signálov. Prvý signál predstavuje vzťah $\frac{1}{F_2}$, ktorý je získaný nasledovne. Výška hladiny $h(2)$ zosilnená o hodnotu π (Gain3) tvorí prvý vstup do bloku Product3, kde je vynásobená rozdielom priemeru $D(2)$ (Constant3) 2. zásobníka a výšky hladiny $h(2)$ 2. zásobníka. Výstup z bloku Product3 je prevedený do menovateľa pomocou funkcie *reciprocal* vybranej v parametre Function bloku MathFunction3. Druhý signál vstupujúci do bloku Product1 je získaný súčtom vstupného prítoku q_{2v} (In2) do druhého zásobníka, odtoku q_1 z prvého zásobníka a odpočítaním odtoku q_2 z druhého zásobníka. q_2 je získané odmocnením (MathFunction2) výšky hladiny $h(2)$ druhého zásobníka zosilnené o konštantu ventilu $k(2)$ (Gain2) 2. zásobníka. Týmto spôsobom sú pospájané a nastavené všetky bloky. Z tohto modelu je potrebné vytvoriť subsystém a masku, pomocou ktorej budú zadávané parametre modelu užívateľmi (viď kapitola 5.1.2).

5.1.2 Vytvorenie subsystému

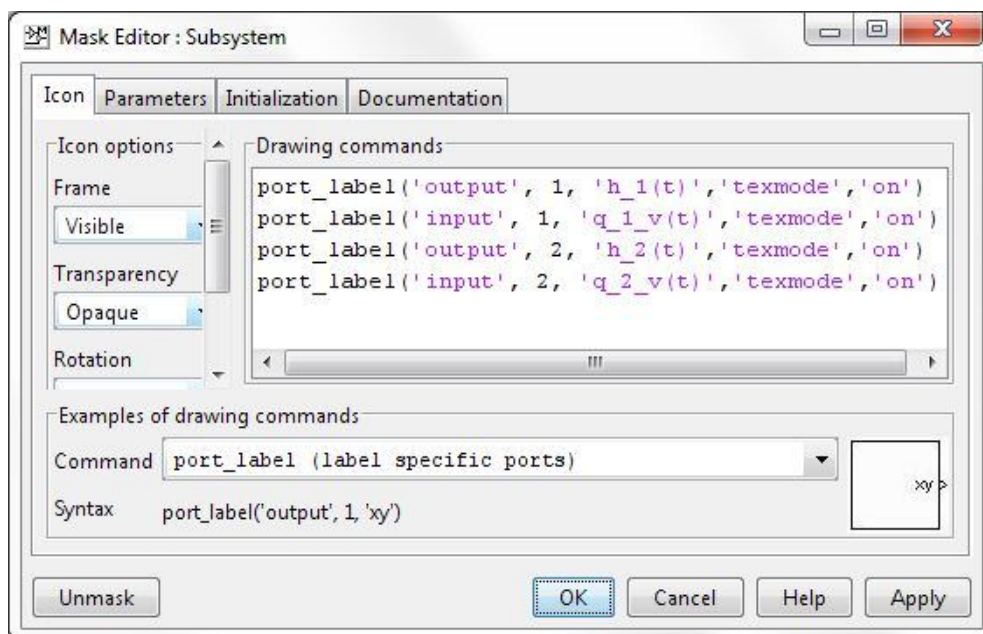
Model, vytvorený v predchádzajúcej podkapitole, si označíme vybraním všetkých blokov a cez pravé tlačidlo myši vyvoláme menu, v ktorom vyberieme Create Subsystem. Druhá

možnosť je cez menu Edit – Create Subsystem alebo príkazom Ctrl+G. Vytvorí sa nové okno, v ktorom sa nachádza subsystem nášho modelu (viď Obr. 27). Na vstupy subsystemu pripojíme bloky Constant a Constant1, do ktorých nastavíme hodnoty vstupných prítokov. Výstupy subsystemu privedieme do bloku Mux a jeho výstup pripojíme k bloku Scope, pomocou ktorého sa budú graficky zobrazovať výsledky simulácií.



Obr. 27 Subsystem guľového zásobníka v sérii

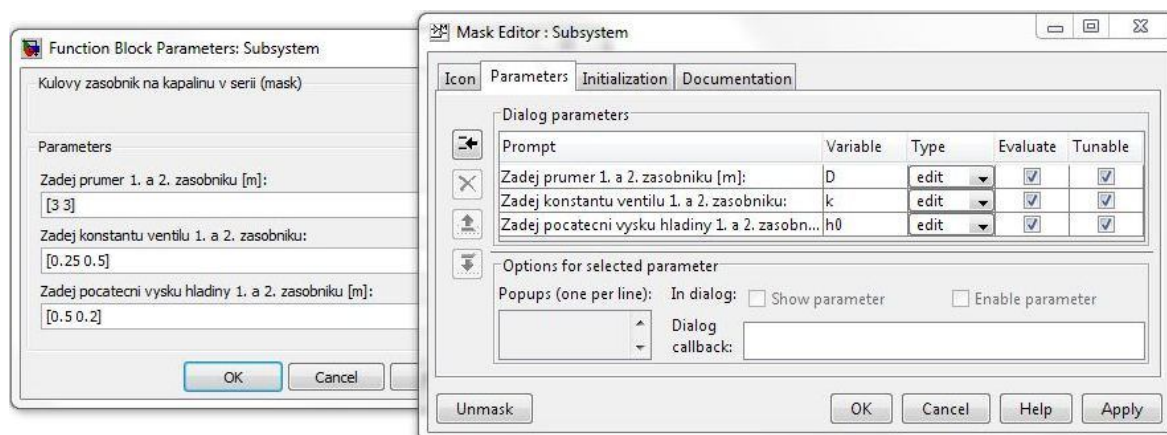
Aby sme mohli vytvoriť menu pre zadávanie parametrov modelu užívateľmi, je potrebné tento subsystem zamaskovať. Masku vybraného subsystemu vytvoríme cez menu Edit – Mask Subsystem. Otvorí sa okno pre úpravu masky, ktoré obsahuje 4 záložky.



Obr. 28 Záložka Icon – guľový zásobník v sérii

Záložka Icon povoľuje vykonávať úpravy na ikone subsystému, napríklad nastaviť rám, transparentnosť, rotáciu a jednotky subsystému. V položke Drawing commands môžeme pomocou štandardných príkazov Matlabu nastaviť názov vstupov a výstupov, vložiť obrázok, prenosovú funkciu, a iné. V tomto prípade boli do tejto položky vložené príkazy pre pomenovanie vstupov a výstupov:

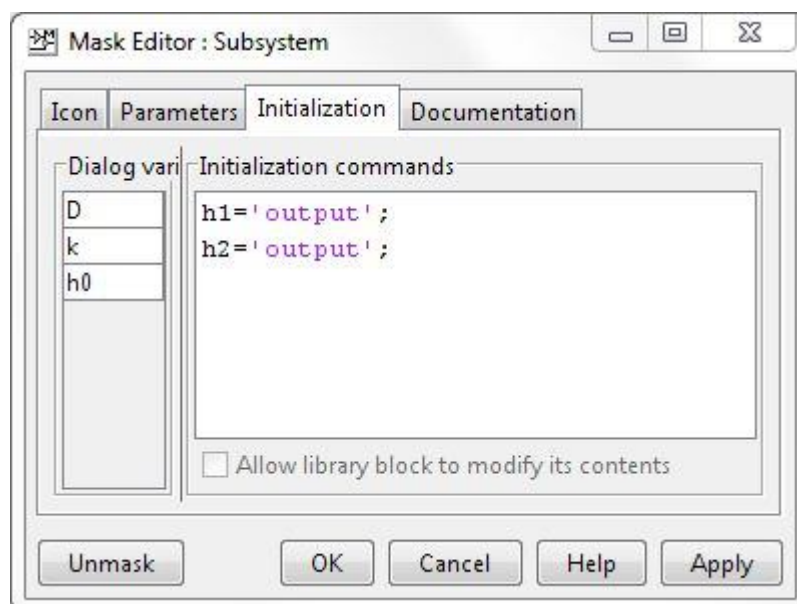
- `port_label('output', 1, 'h_1(t)', 'texmode', 'on')` – príkaz pomenuje prvý výstup ako $h_1(t)$, pričom `texmode` zobrazuje dolný alebo horný index,
- `port_label('input', 1, 'q_1_v(t)', 'texmode', 'on')` – príkaz pomenuje prvý vstup ako $q_{1v}(t)$.



Obr. 29 Záložka Parameters – guľový zásobník v sérii

V záložke Parameters vytvoríme menu pre zadávanie parametrov systému. Ako je vidieť na obrázku (Obr. 29) v pravej časti, pri vytváraní menu zadávame slovný popis do stĺpca Prompt a premennú do stĺpca Variable. Sú tu aj ďalšie možnosti nastavení, ktoré však ponecháme nezmenené. V ľavej časti obrázka (Obr. 29) je vidieť vytvorené menu pre zadávanie parametrov modelu, ktoré sa zobrazí užívateľovi po dvojitom kliknutí na subsystem. Parametre modelu sa zadávajú do hranatých zátvoriek, pričom ako prvý sa zadáva parameter prvého zásobníka, potom nasleduje medzera a hodnota druhého zásobníka. Ide o vektorové zadávanie parametrov.

Záložka Initialization sa používa pre inicializáciu konštánt jednotlivých blokov.



Obr. 30 Záložka Initialization – guľový zásobník v sérii

Posledná záložka s názvom Documentation sa používa pre popis systému (položka Mask type a Mask description) alebo pre vloženie nápovedi (položka Mask help).

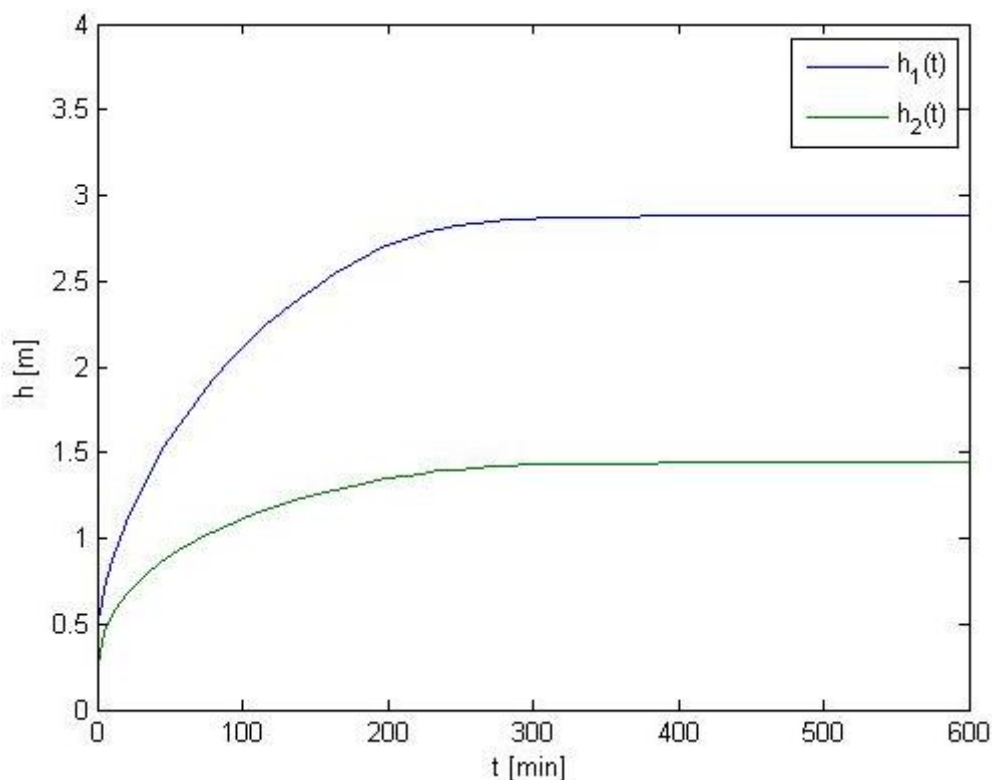
Týmto sme vytvorili masku subsystemu a aj menu pre zadávanie parametrov. K zamaskovanému systému sa teraz nedostaneme dvojitém kliknutím na subsystem, ale cez menu Edit Look Under Mask, kde môžeme model opäť upravovať. Masku subsystemu môžeme upravovať cez menu Edit – Edit Mask.

Model guľového zásobníka na kvapalinu zapojeného v sérii je vytvorený a pred samotnou simuláciou je potrebné nastaviť parametre simulácie a to cez menu Simulation – Configuration Parameters. Otvorí sa nové okno, v ktorom je možné nastaviť čas začiatku

(Start time) a ukončenia (Stop time) simulácie, voľbu riešiteľa a iné. V tomto prípade je čas simulácie nastavený na hodnotu 600 minút.

5.1.3 Simulácia modelu

Pre simuláciu použijeme model *kulovy_zasobnik_v_serii.mdl* a parametre modelu uvedené v tabuľke (Tab. 1).



Obr. 31 Výšky hladín zásobníkov pri konštantných prítokoch

Z obrázka (Obr. 31) vyplýva, že výška hladiny prvého zásobníka sa pri konštantnom prítoku ustáli približne v čase 370 minút a výška hladiny v druhom zásobníku sa ustáli približne v čase 380 minút.

5.2 Jednkapacitný rúrkový výmenník tepla

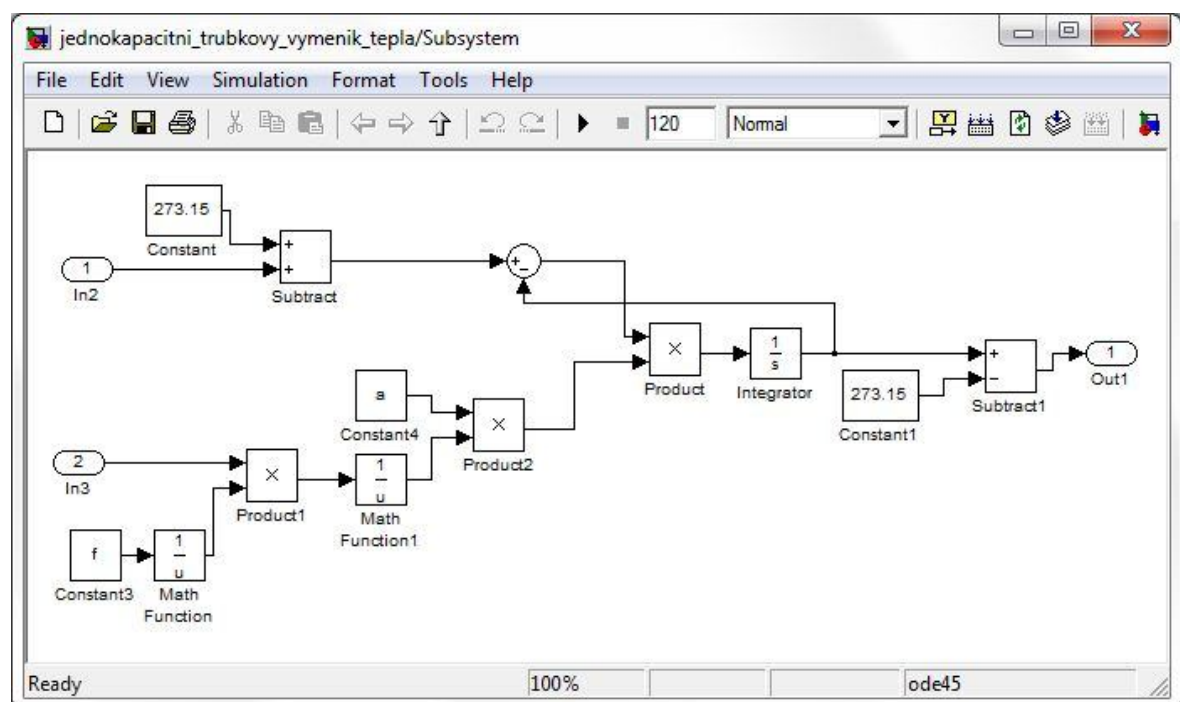
Pri modelovaní budeme uvažovať jednkapacitný rúrkový výmenník tepla s parametrami uvedenými v tabuľke (Tab. 2) a použijeme matematický model ustáleného stavu výmenníka uvedený v rovnici (32).

Tab. 2 Parametre jednokapacitného rúrkového výmenníka tepla

Parametre	Hodnota
Priemer rúry[m]	0,08
Dĺžka rúry [m]	120
Teplota kvapaliny na vstupe [°C]	20
Teplota okolia [°C]	10
Objemový prietok [m ³ /min]	0,05
Hustota kvapaliny [kg/m ³]	985
Merné teplo [kJ/kgK]	4,05
Súčiniteľ prestupu tepla [W/m ² K]	43,5

5.2.1 Vytvorenie modelu a nastavenie blokov

Bloky potrebné pre vytvorenie modelu: In, Out, Scope, Constant, Sum, Subtract, Integrator, Product, MathFunction.



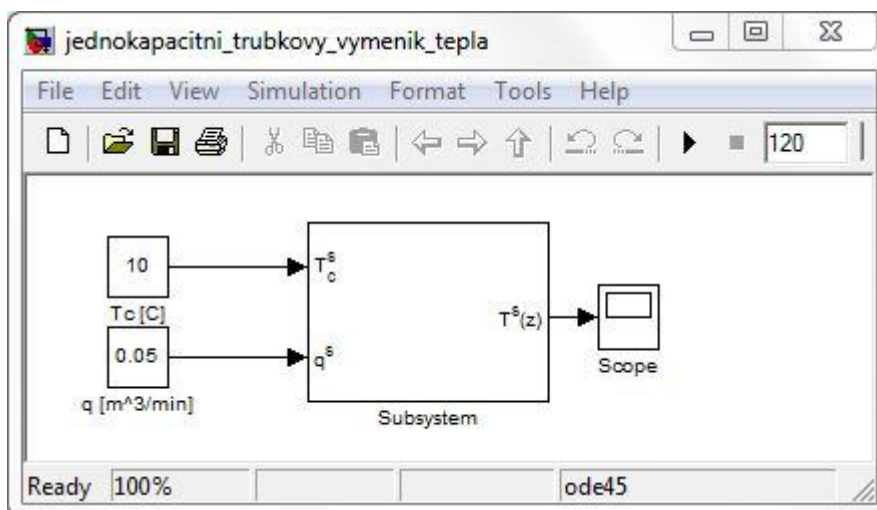
Obr. 32 Model jednokapacitného rúrkového výmenníka tepla

Všetky bloky prenesieme do okna modelu, pospájame ich a nastavíme parametre jednotlivých blokov. Je potrebné uviesť ešte jednu poznámku, a to, že hodnoty teplôt sú udávané v stupňoch Celzia (čo je pre nás prirodzenejšie) a výpočty prebiehajú v kelvinoch. Z tohto dôvodu sú všetky teploty na vstupe prevedené na hodnotu Kelvin vzťahom $K=C+273,15$ a výstup je prevedený na hodnotu v stupňoch Celzia vzťahom $C=K-273,15$.

Cieľom tohto simulačného modelu je získať priebeh ustáleného teplotného profilu v danom rúrkovom výmenníku – teda priebeh teploty kvapaliny T^s v závislosti na priestorovej nezávisle premennej „z“. Tento údaj získame na výstupe bloku Integrator, v ktorom do parametru Initial condition vpíšeme hodnotu $T0+273,15$. Výstup z integrátora je prevedený na stupne Celzia (Subtract1) a je privedený na výstup systému (Out1). Vstupom do integrátora je súčin (Product) dvoch signálov. Prvý signál je získaný ako rozdiel teploty okolia (In1), prevedenej na hodnotu v Kelvinoch (blok Subtract) a výstupnej teploty T . Druhý signál predstavuje súčin (Product2) konštanty a (Constant4) a vzťahu $\frac{q}{F}$ prevedeného do menovateľa funkciou reciprocal (MathFunction1), ktorý je vyjadrený súčinom objemového prietoku q (blok In3) a konštanty F (Constant3) prevedenej do menovateľa funkciou *reciprocal* (blok MathFunction). Na obrázku (Obr. 32) sa nachádza vytvorený model jednokapacitného rúrkového výmenníka tepla.

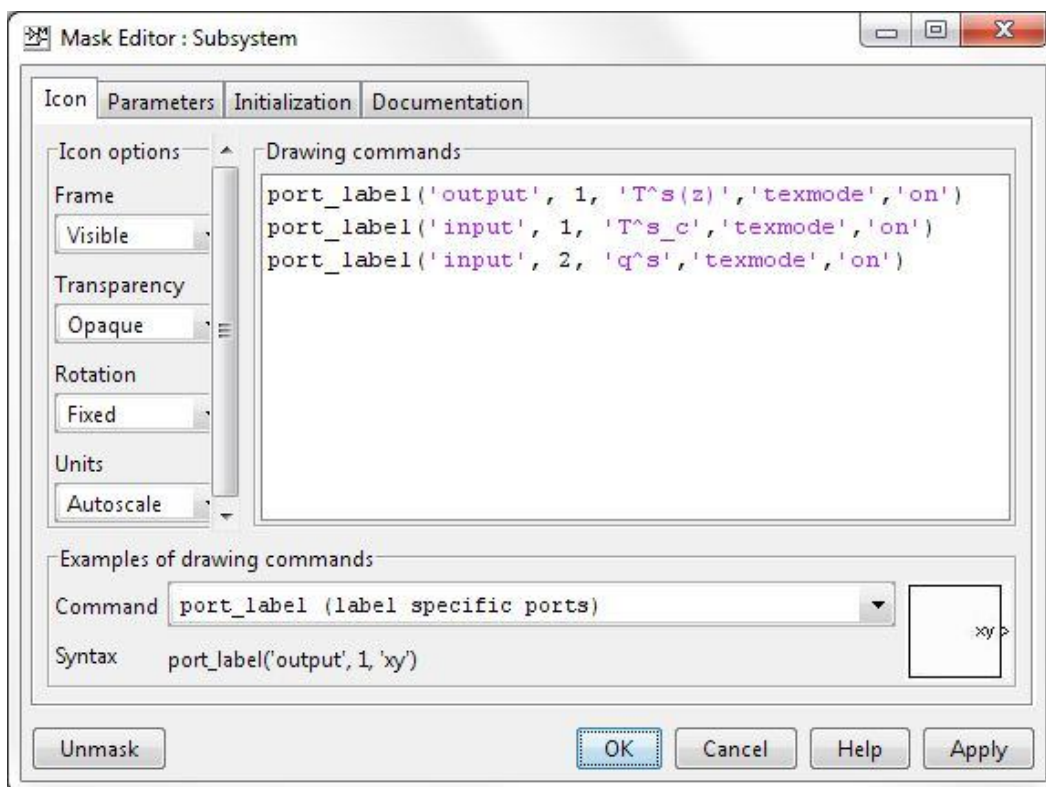
5.2.2 Vytvorenie subsystému

Vyberieme všetky bloky modelu, a tak ako pri prechádzajúcom modeli, vytvoríme jeho subsystém, ktorý je vidieť na nasledujúcom obrázku (Obr. 33). Na prvý vstup subsystému pripojíme blok Constant3, do ktorého vpíšeme teplotu okolia T_c v stupňoch Celzia a na druhý vstup subsystému pripojíme blok Constant4, do ktorého vpíšeme hodnotu objemového prietoku q . Výstup subsystému privedieme na grafický výstup.



Obr. 33 Subsystém jednokapacitného rúrkového výmenníka

Podobne ako u guľového zásobníka na kvapalinu zapojeného do série, aj tento model zamaskujeme a vytvoríme menu pre zadávanie parametrov modelu.

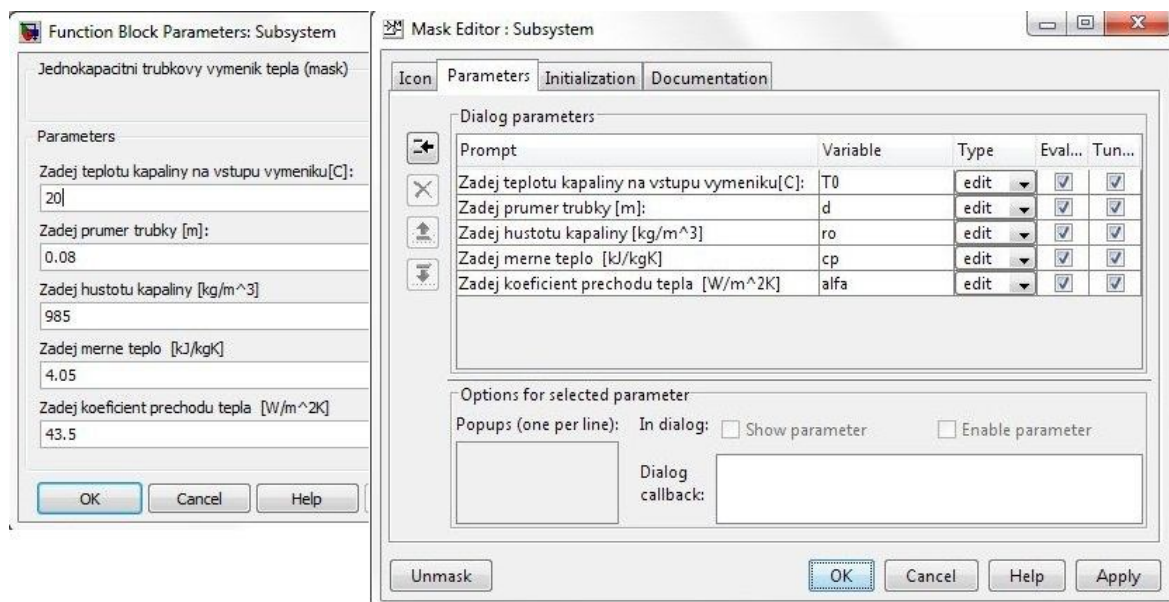


Obr. 34 Záložka Icon – jednokapacitný rúrkový výmenník tepla

V prvej záložke s názvom Icon nastavíme v položke Drawing commands:

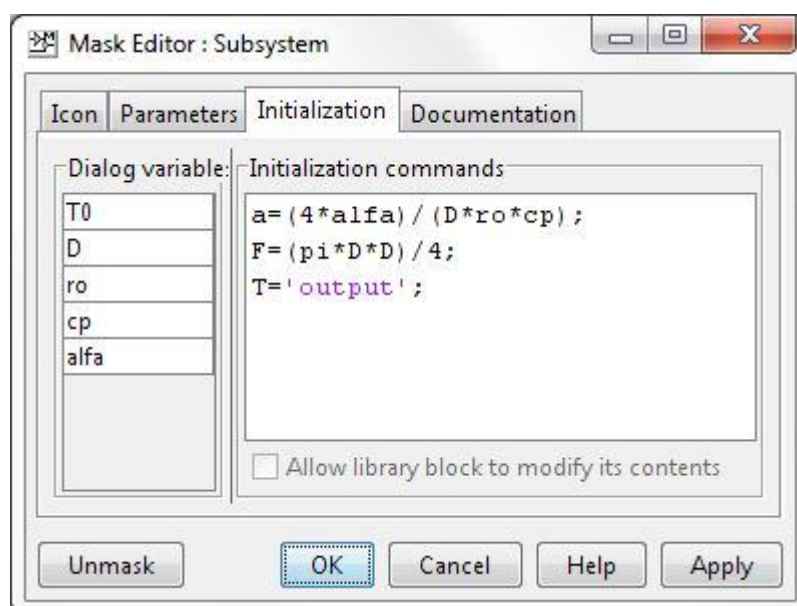
- názov prvého vstupu príkazom `port_label('input', 1, 'Ts_c', 'texmode', 'on')`,
- názov druhého vstupu príkazom `port_label('input', 2, 'q^s', 'texmode', 'on')`,

- názov výstupu príkazom `port_label('output', 1, 'T^s (z)', 'texmode', 'on')`.



Obr. 35 Záložka Parameters a menu – jednokapacitný rúrkový výmenník tepla

Menu pre zadávanie parametrov modelu vytvoríme v záložke Parameters. Do stĺpca Prompt zadáme slovný popis parametru a do stĺpca Variable vložíme premenné $T0$ pre teplotu kvapaliny na vstupe, d pre priemer trubky, ro pre hustotu kvapaliny, cp pre merné teplo a $alfa$ pre koeficient prechodu tepla. V ľavej časti obrázka (viď Obr. 35) je vidieť vytvorené menu.



Obr. 36 Záložka Initialization – jednokapacitný rúrkový výmenník tepla

V záložke Initialization nastavíme vzťahy pre výpočet konštanty a podľa vzťahu

$$a = \frac{4\alpha}{d\rho c_p} \text{ a konštanty } F \text{ podľa vzťahu } F = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Získaná hodnota konštanty a sa predá do

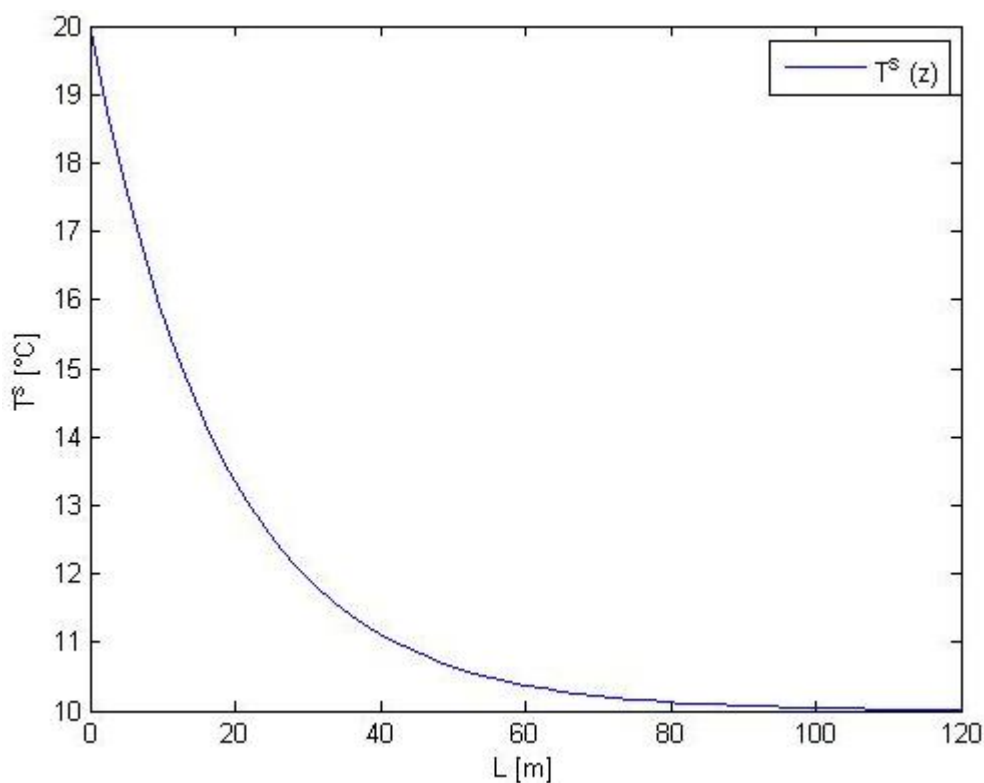
bloku Constant4 a hodnota konštanty F sa predá do bloku Constant3.

Podobne ako v predchádzajúcom modeli, vložíme do záložky Documentation typ masky a jej popis.

Pred simuláciou nastavíme čas simulácie nasledovne: začiatok simulácie nastavíme na hodnotu 0 (Start time) a koniec simulácie nastavíme na hodnotu 120 (Stop time), čo je dĺžka rúrky v metroch podľa zadania v tabuľke (Tab. 2). Všetky ostatné nastavenia ponecháme nezmenené. Výsledky simulácie modelu jednodukapacitného rúrkového výmenníka tepla sa nachádzajú v nasledujúcej kapitole.

5.2.3 Simulácia modelu

K simulácii je použitý model *jednodukapacitni_trubkovy_vymenik_tepla.mdl*. a parametre modelu sú nastavené podľa tabuľky (Tab. 2).



Obr. 37 Teplota kvapaliny vo výmenníku

Výsledok simulácie sa nachádza na obrázku (Obr. 37), kde je vidieť ako sa teplota kvapaliny v rúrke postupne po ustálení ochladzuje na teplotu okolia.

5.3 Rekuperátor pre ohrev vzduchu

Budeme uvažovať rekuperátor pre ohrev vzduchu, v ktorom prebieha výmena tepla vedením od dymových plynov cez stenu trubky (súčiniteľ prestupu tepla je $10\text{W/m}^2\text{K}$) a od steny trubky k vzduchu (súčiniteľ prestupu tepla je $10\text{W/m}^2\text{K}$). Vonkajší povrch trubky je $2,025\text{m}^2$ a vnútorný povrch trubky je $1,668\text{m}^2$. Zvyšné parametre modelu sú uvedené v tabuľke (Tab. 3). Pri modelovaní bude použitý matematický model rekuperátora, ktorý je uvedený v rovniciach (42) a (43).

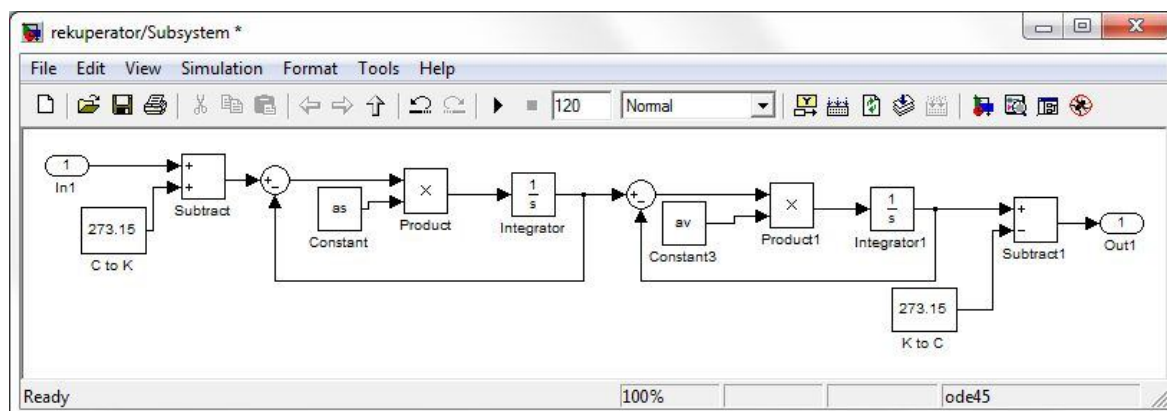
Tab. 3 Parametre rekuperátora

Parameter	Trubka	Ohrievaný vzduch	Dymové plyny
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]			80
Počiatočná teplota [$^{\circ}\text{C}$]	15	10	
Hustota [kg/m^3]	7850	1,29	
Objem [m^3]	0,1413	0,098	
Merné tepelo [kJ/kgK]	0,469	1,1	

5.3.1 Vytvorenie modelu a nastavenie blokov

Pre vytvorenie modelu potrebujeme tieto bloky: In, Out, Scope, Constant, Product, Integrator, Sum.

Všetky uvedené bloky prenesieme do okna modelu, pospájame ich s ostatnými blokmi a nastavíme ich parametre podľa nasledujúceho popisu.

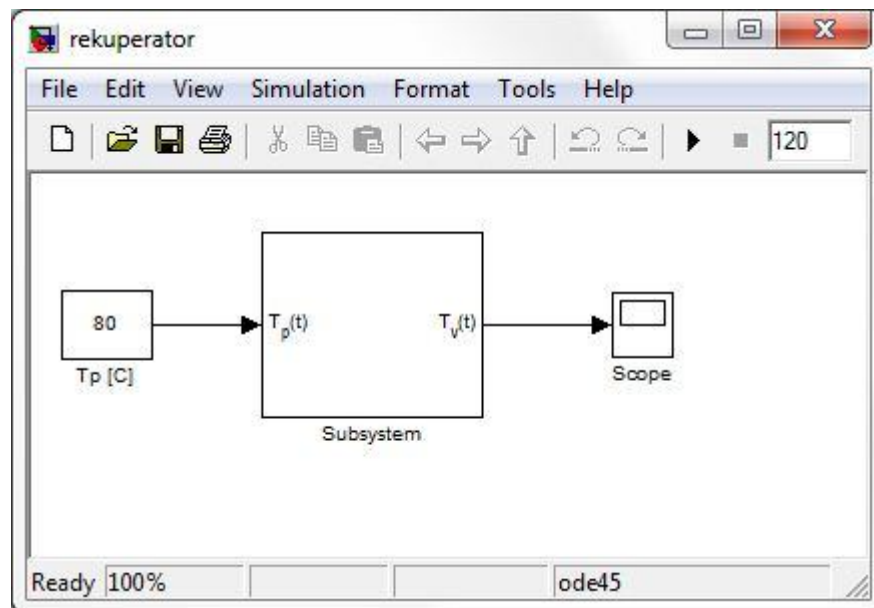


Obr. 38 Model rekuperátora pre ohrev vzduchu

Cieľom tohto simulačného modelu je nájsť časový priebeh funkcie teploty vzduchu $T(2)$, získanej na výstupe bloku Integrator1, ktorý je prevedený zo stupnice Kelvin na stupne Celzia (blok Subtract1) a následne je privedený na výstup systému (blok Out1). V integrátore1 nastavíme v položke Initial condition hodnotu $T0(2)+273,15$ (čo je počiatočná teplota vzduchu v stupňoch Celzia prevedená do stupnice Kelvin). Vstup do integrátoru1 je tvorený súčinom (Product1) prvého signálu a konštanty av (Constant3). Prvý signál vstupujúci do bloku Product1 je získaný ako rozdiel teploty steny (Integrator) a teploty vzduchu. Keďže k ohrevu vzduchu v rekuperátore dochádza prestupom tepla od dymových plynov cez stenu trubky, je potrebné získať časový priebeh funkcie teploty trubky $T(1)$. Tento časový priebeh získame na výstupe bloku Integrator. V integrátore nastavíme do položky Initial condition hodnotu $T0(1)+273,15$, pričom $T0(1)$ je počiatočná teplota steny trubky v stupňoch Celzia prevedená na stupnicu v Kelvinoch. Vstupom do integrátoru je súčin (Product) prvého signálu a konštanty as (Constant), pričom prvý signál je získaný rozdielom teploty dymových plynov (In1) a teploty steny trubky (výstup z bloku Integrator).

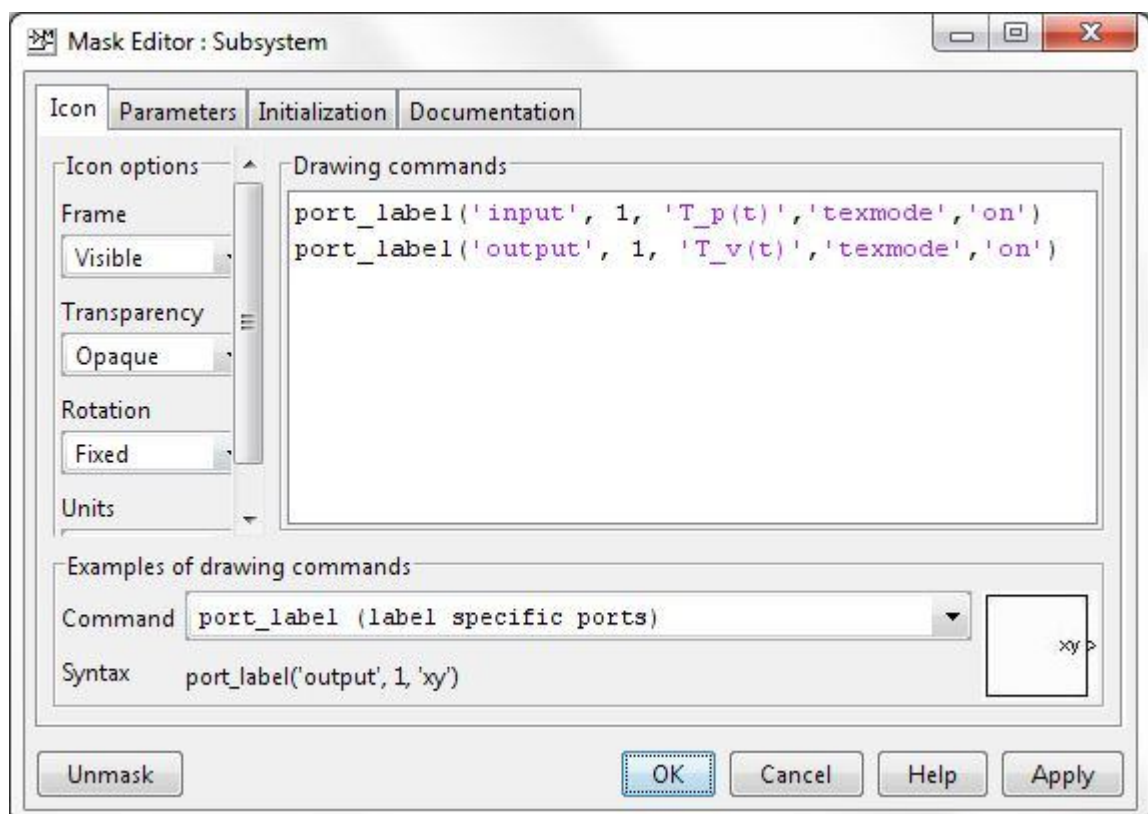
5.3.2 Vytvorenie subsystému

Z vytvoreného modelu vytvoríme subsystém podobne ako v predchádzajúcich dvoch modeloch. Na vstup systému vložíme blok Constant2 a do položky Constant value nastavíme teplotu dymových plynov (80°C). Na výstup opäť pripojíme grafický výstup pre zobrazenie simulácií.



Obr. 39 Subsystém rekuperátora pre ohrev vzduchu

Aj v tomto prípade je potrebné zamaskovať subsystém a vytvoriť menu.

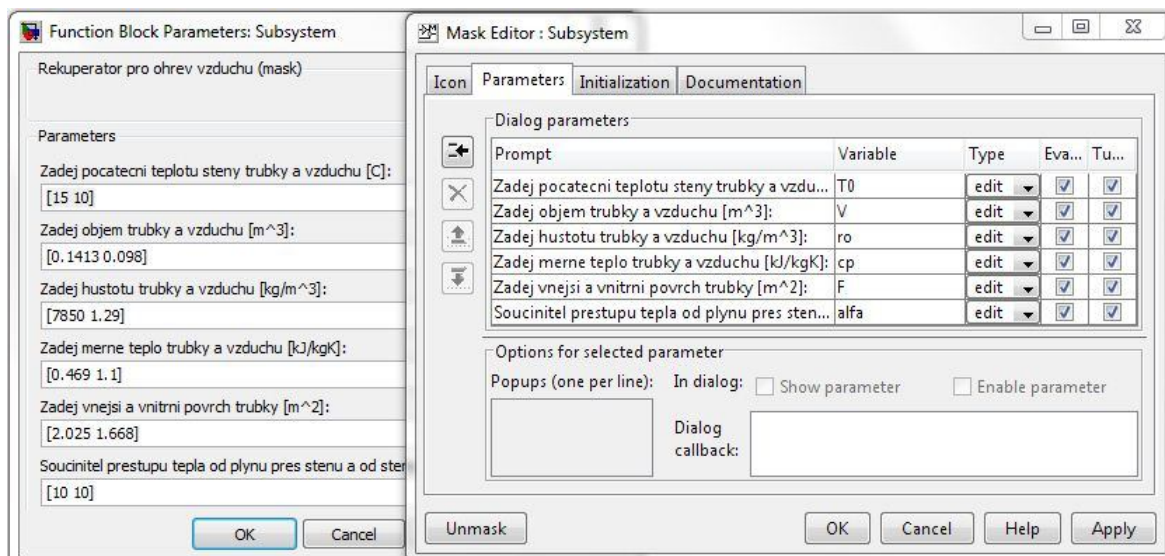


Obr. 40 Záložka Icon – rekuperátor pre ohrev vzduchu

V záložke Icon (Obr. 40) nastavíme názvy vstupu a výstupu nasledujúcimi príkazmi:

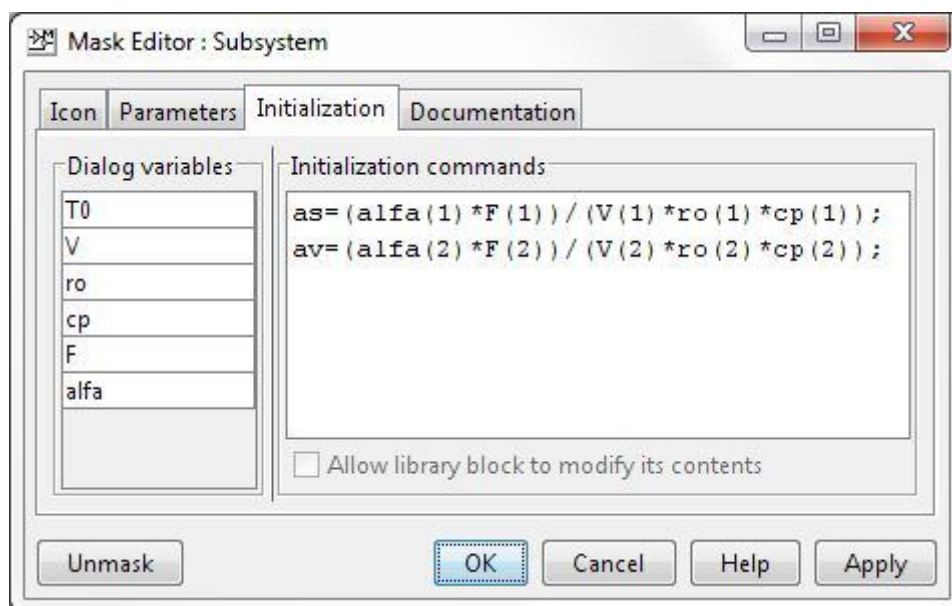
- `port_label('input', 1, 'T_p(t)', 'texmode', 'on')` – vstup sa zobrazí v tvare $T_p(t)$,

- `port_label('output', 1, 'T_v(t)', 'texmode', 'on')` – výstup sa zobrazí v tvare $T_v(t)$.



Obr. 41 Záložka Parameters – rekuperátor pre ohrev vzduchu

V druhej záložke s názvom Parameters vytvoríme menu pre zadávanie parametrov modelu užívateľom, takým istým spôsobom ako u jednodukapacitného rúrkového výmenníka. Vytvorené menu z vloženými parametrami modelu je vidieť na obrázku (Obr. 41). Parametre modelu sa do menu zadávajú v hranatých zátvorkách, keďže sa jedná o vektorové zadávanie parametrov, pričom prvá hodnota je parameter pre stenu trubky a druhá hodnota je parameter vzduchu.



Obr. 42 Záložka Initialization – rekuperátor pre ohrev vzduchu

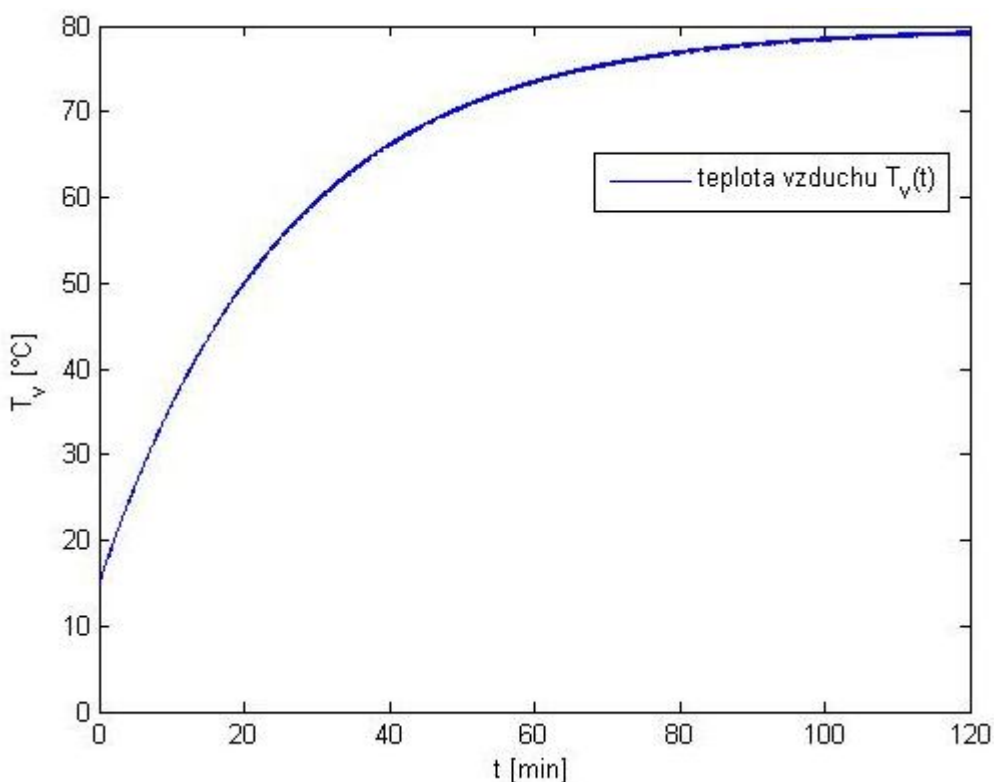
Do záložky Initialization vložíme vzťahy pre výpočet konštanty as vzťahom $as = \frac{\alpha(1)F(1)}{V(1)\rho(1)c_p(1)}$ a av vzťahom $av = \frac{\alpha(2)F(2)}{V(2)\rho(2)c_p(2)}$. Vypočítaná konštanty as sa predá do bloku Constant a vypočítaná konštanty av sa predá do bloku Constant3.

Do poslednej záložky Documentation nastavíme typ masky (položka Mask type) a popis masky (položka Mask description).

Predtým než spustíme simuláciu, nastavíme si dĺžku simulácie na hodnotu 120 minút. Výsledky simulácie modelu rekuperátora pre ohrev vzduchu sa nachádzajú v kapitole 5.3.3.

5.3.3 Simulácia modelu

Pre simuláciu použijeme model *rekuperator.mdl* a parametre modelu uvedené v tabuľke (Tab. 3).



Obr. 43 Teplota vzduchu v rekuperátore

Na obrázku (Obr. 43) je vidieť ako sa vo veľmi krátkom časovom okamžiku zvýši počiatočná teplota vzduchu (10°C) na počiatočnú teplotu steny trubky rekuperátora (15°C) a následne sa od dymových plynov ohreje na teplotu 80°C.

ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvoriť simulačné modely technologických procesov preberaných v predmete Analýza a simulácia technologických procesov. Všetky body zadania boli vypracované. Práca sa delí na dve časti, teoretickú a praktickú časť.

V teoretickej časti je vypracovaná literárna rešerš na tému simulačných modelov slúžiacich na výučbu spomínaného predmetu a ďalej sa tu nachádza kapitola pre uvedenie čitateľa do problematiky modelovania a simulácií. Väčšinu tejto teoretickej časti tvorí popis vybraných technologických procesov a odvodzovanie ich matematických modelov na základe princípov modelovania. Jedná sa o nasledujúce procesy: valcový, guľový a lievikový zásobník na kvapalinu a ich zapojenie do série, prietokový výmenník tepla s premiešavaním, jednokapacitný rúrkový výmenník tepla, jednosmerný motor riadený prúdom kotvy v prvom prípade a riadený napätím kotvy v ďalšom prípade, rekuperátor pre ohrev vzduchu a prietokový chemický reaktor s chladením v plášti.

Z matematických modelov odvodených v teoretickej časti boli vytvorené simulačné modely pre spomínané procesy. Modely boli implementované v programovom systéme Matlab (verzia R2008a) s využitím jeho nadstavby Simulink (verzia 7.6.0). Pri modelovaní boli použité štandardné bloky Simulinku a ku každému modelu bolo vytvorené jednoduché menu pre zadávanie parametrov procesu. Keďže pri simulácii prebiehajú numerické výpočty, bolo potrebné u guľového a lievikového zásobníka na kvapalinu ošetriť stav, v ktorom by mohlo dôjsť k deleniu nulou. Ošetrovanie spočíva v definovaní spodnej (prípadne hornej) hranice výšky hladiny kvapaliny v zásobníku. Ku každému modelu boli ešte vytvorené simulačné úlohy pre študentov spomínaného predmetu a do jeho nadväzujúceho predmetu Stavová a algebraická teória riadenia.

V praktickej časti sú popísané jednotlivé bloky Simulinku, z ktorých boli vytvorené simulačné modely. Ďalej sa tu nachádza popis vytvárania simulačného modelu na troch vybraných modeloch, a to na guľovom zásobníku na kvapalinu zapojeného do série, na jednokapacitnom rúrkovom výmenníku tepla a na rekuperátore pre ohrev vzduchu. K týmto trom modelom sú zobrazené aj výsledky ich simulácií.

Výsledkom tejto práce sú teda simulačné modely jednotlivých procesov a k nim prislúchajúce simulačné úlohy, ktoré budú slúžiť pri výučbe predmetu Analýza a simulácia technologických procesov a predmetu Stavová a algebraická teória riadenia na Fakulte

aplikovanej informatiky UTB v Zlíne. Dúfam, že tieto modely budú prínosom pri vyučovaní týchto predmetov a že pomôžu študentom ľahšie pochopiť správanie týchto procesov v dynamickom alebo ustálenom stave.

ZÁVER V ANGLIČTINE

The aim of this thesis was to develop simulation models of technological processes discussed in the subject Analysis and simulation of technological processes. All given tasks have been fulfilled. The work is divided into two main parts, theoretical and practical part. In the theoretical part is literature search on the topic of simulation models for the teaching of the mentioned subject id presented and there is also a chapter to bring readers to the problems of modeling and simulation. Most of the theoretical part consists of description of selected technological processes and derivation of their mathematical models based on the principles of modelling. This includes the following processes: cylindrical, spherical and funnel liquid storage tanks in various configurations, various heat exchangers DC motors and a continuous stirred tank reactor.

From the mathematical models derived in the theoretical part simulation models for the mentioned processes were created. The models were implemented in the software Matlab (version R2008a) and using its popular simulation tool Simulink (version 7.6.0). Standard Simulink blocks were used for the modelling and each model was created with a simple GUI for input data entry. Because the simulation was performed numerically, it was necessary to treat conditions leading to division by zero. This consists e.g. in defining the lower (or upper) limit of the liquid height in the tanks. Simulation tasks for the students of the mentioned course and a related course State-space and algebraic control theory were designed for each of the created models. The practical part describes all Simulink blocks used for creation of the simulation models. Furthermore, there is the description of the creation of a simulation model for three selected models, the spherical liquid storage tank in series, tubular heat exchanger and air heat exchanger. Simulation results are also presented for these three models.

The result of this work is represented by the simulation models of individual processes and corresponding simulation tasks supporting the course Analysis and simulation of technological processes and the related course State-space and algebraic control theory at the Faculty of Applied Informatics TBU in Zlín. I hope that these models will be beneficial in teaching these courses and will help students better understand the behavior of these processes in dynamical or steady states.

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATURY

Monografie:

- [1] BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.
- [2] DLASK, Petr. *Modelování při řízení*. Vyd. 1. Praha: Wolters Kluwer Česká republika, 2011, 175 s. ISBN 978-80-7357-704-9.
- [3] DOSTÁL, Marek. *Simulace průtočného chemického reaktoru pro různé typy reakcí*. Zlín, 2006. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D.
- [4] DOSTÁL, Petr. *Matematické modely vybraných technologických procesů: Studijní materiál do předmětu Analýza a simulace technologických procesů*. Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011.
- [5] FARANA, R., L. LANDRYOVÁ, J. LOKOSOVÁ, L. SMUTNÝ, A. VÍTEČEK, L. VÍTEČKOVÁ a R. WAGNEROVÁ. *Programová podpora simulace dynamických systémů: sbírka řešených příkladů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1996, 114 s. ISBN 80-020-1129-5.
- [6] HUBÁLOVSKÝ, Štěpán. *Teorie systémů, modelování a simulace*. Vyd. 1. Hradec Králové: Gaudeamus, 2011, 154 s. ISBN 978-80-7435-158-7.
- [7] KARBAN, Pavel. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006, 220 s. ISBN 80-251-1301-9.
- [8] KOLOMAZNÍK, Karel. *Modelování zpracovatelských procesů*. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 191 s. ISBN 8021401141.
- [9] KUNEŠ, Josef, Václav FRANTA a Otakar VAVROCH. *Základy modelování*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, 263 s. ISBN 80-03-00147-1.
- [10] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999, 276 s. ISBN 80-722-5030-2.

- [11] PERŮTKA, Karel. *MATLAB - základy pro studenty automatizace a informačních technologií*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005, 303 s. ISBN 80-731-8355-2.
- [12] PIŠAN, Radim. *Knihovna modelů technologických procesů*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. František Gazdoš, Ph.D.
- [13] TOMÁŠEK, Petr. *Vytvoření skriptů pro webové rozhraní předmětu Analýza a simulace technologických procesů*. Zlín, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D.

Internetové zdroje:

- [14] Humusoft. *Simulink - Simulace a Model-Based Design* [online]. © 1991 - 2012 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/simulink/>.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

D_i	Priemer zásobníka
H_i	Výška zásobníka
k_i	Konštanta ventilu
q_i	Objemový prietok
h_i	Výška hladiny
F_i	Prestupná plocha
ρ_i	Hustota
c_{pi}	Merné teplo
V_i	Objem
α_i	Koeficient prestupu tepla
T_i	Teplota
L	Dĺžka
z	Priestorová nezávisle premenná
v	Rýchlosť prúdenia
J	Celkový moment zotrvačnosti
m_h	Hnací moment
m_z	Záťažný moment
i_a	Prúd kotvy
k_m	Momentová konštanta motora
u_a	Napätie kotvy
ω	Uhlová rýchlosť
φ	Uhlové natočenie
R_a	Celkový odpor kotvy
c_i	Koncentrácia

r_{ij}	Rýchlosť reakcie i-tej zložky v j-tej reakcii
r_j	Rýchlosť j-tej reakcie
h_j	Reakčná entalpia j-tej reakcie
E_i	Aktivačná energia
k_{i0}	Pre-exponenciálny faktor
$(-)_c$	Index pre chladiacu kvapalinu
$(-)_v$	Index pre vzduch
$(-)_s$	Index pre stenu trubky
$(-)_p$	Index pre dymové plyny
$(-)^s$	Ustálený stav

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Valcový zásobník na kvapalinu.....	19
Obr. 2 Guľový zásobník na kvapalinu	20
Obr. 3 Prierez guľového zásobníka	21
Obr. 4 Lievikový zásobník na kvapalinu	22
Obr. 5 Valcové zásobníky na kvapalinu v sérii.....	24
Obr. 6 Guľové zásobníky na kvapalinu v sérii.....	26
Obr. 7 Lievikový zásobník na kvapalinu v sérii.....	28
Obr. 8 Prietokový výmenník tepla s premiešavaním.....	29
Obr. 9 Jednkapacitný rúrkový výmenník tepla	31
Obr. 10 Objemový element rúrky	32
Obr. 11 Jednosmerný motor s konštantným buđením[5]	33
Obr. 12 Rekuperátor pre ohrev vzduchu[5].....	35
Obr. 13 Prietokový chemický reaktor s chladením v plášti.....	37
Obr. 14 Použité bloky Simulinku.....	42
Obr. 15 Nastavenie integrátoru	43
Obr. 16 Nastavenie bloku Saturation.....	44
Obr. 17 Nastavenie bloku Abs.....	44
Obr. 18 Nastavenie zosilnenia	45
Obr. 19 Nastavenie matematických funkcií.....	46
Obr. 20 Nastavenie bloku Product	47
Obr. 21 Nastavenie bloku Sum.....	48
Obr. 22 Nastavenie vstupu a výstupu	49
Obr. 23 Nastavenie bloku Mux	49
Obr. 24 Nastavenie bloku Scope	50
Obr. 25 Nastavenie bloku Constant.....	51
Obr. 26 Model guľového zásobníka na kvapalinu v sérii.....	53
Obr. 27 Subsystém guľového zásobníka v sérii.....	55
Obr. 28 Záložka Icon – guľový zásobník v sérii	56
Obr. 29 Záložka Parameters – guľový zásobník v sérii	56
Obr. 30 Záložka Initialization – guľový zásobník v sérii	57
Obr. 31 Výšky hladín zásobníkov pri konštantných prítokoch.....	58

Obr. 32 Model jednodukapacitného rúrkového výmenníka tepla.....	59
Obr. 33 Subsystém jednodukapacitného rúrkového výmenníka.....	61
Obr. 34 Záložka Icon – jednodukapacitný rúrkový výmenník tepla.....	61
Obr. 35 Záložka Parameters a menu – jednodukapacitný rúrkový výmenník tepla.....	62
Obr. 36 Záložka Initialization – jednodukapacitný rúrkový výmenník tepla.....	62
Obr. 37 Teplota kvapaliny vo výmenníku	63
Obr. 38 Model rekuperátora pre ohrev vzduchu.....	65
Obr. 39 Subsystém rekuperátora pre ohrev vzduchu.....	66
Obr. 40 Záložka Icon – rekuperátor pre ohrev vzduchu.....	66
Obr. 41 Záložka Parameters – rekuperátor pre ohrev vzduchu	67
Obr. 42 Záložka Initialization – rekuperátor pre ohrev vzduchu	67
Obr. 43 Teplota vzduchu v rekuperátore.....	68

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Parametre pre guľový zásobník na kvapalinu v sérii.....	52
Tab. 2 Parametre jednokapacitného rúrkového výmenníka tepla.....	59
Tab. 3 Parametre rekuperátora.....	64

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha P I: Simulačné úlohy

Príloha P II: Simulačné modely

Príloha P III: CD-ROM s elektronickou verziou tejto práce vo formáte PDF, simulačné modely a simulačné úlohy

PRÍLOHA P I: SIMULAČNÉ ÚLOHY

1. Uvažujte válcový zásobník na kapalinu o průměru 3m a výšce 5m s konstantou ventilu $0,2\text{m}^{2,5}/\text{min}$ a počáteční výškou hladiny 1,5m. Objemový průtok vstupující do zásobníku je v ustáleném stavu $0,3\text{m}^3/\text{min}$. Předpokládejte, že zásobník je otevřený, jeho průřez a atmosférický tlak jsou konstantní.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model, který bude sledovat průběh výšky hladiny v zásobníku v závislosti na čase a vstupním přítoku do tohoto zásobníku,
2. odvoďte model ustáleného stavu výšky hladiny kapaliny v zásobníku,
3. vykreslete statickou charakteristiku (závislost výšky hladiny h^s na ustáleném vstupním přítoku q_v^s),
4. simulujte přechodovou odezvu výšky hladiny v zásobníku na skokovou změnu vstupního průtoku,
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému ($G_{U/Y}$),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci hladiny v zásobníku na konstantní žádanou hodnotu ($w=3$) a kompenzaci případné poruchy, přičemž řídicí veličinou bude vstupní průtok,
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruchy.

Model: valcovy_zasobnik.mdl

2. Uvažujte kulový zásobník na kapalinu o průměru 5m s počáteční výškou hladiny 4m, konstantou ventilu $0,69\text{m}^{2,5}/\text{min}$ a ustáleným vstupním průtokem $0,39\text{m}^3/\text{min}$. Předpokládejte, že se jedná o otevřený zásobník s konstantním atmosférickým tlakem působícím na hladinu kapaliny v zásobníku.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

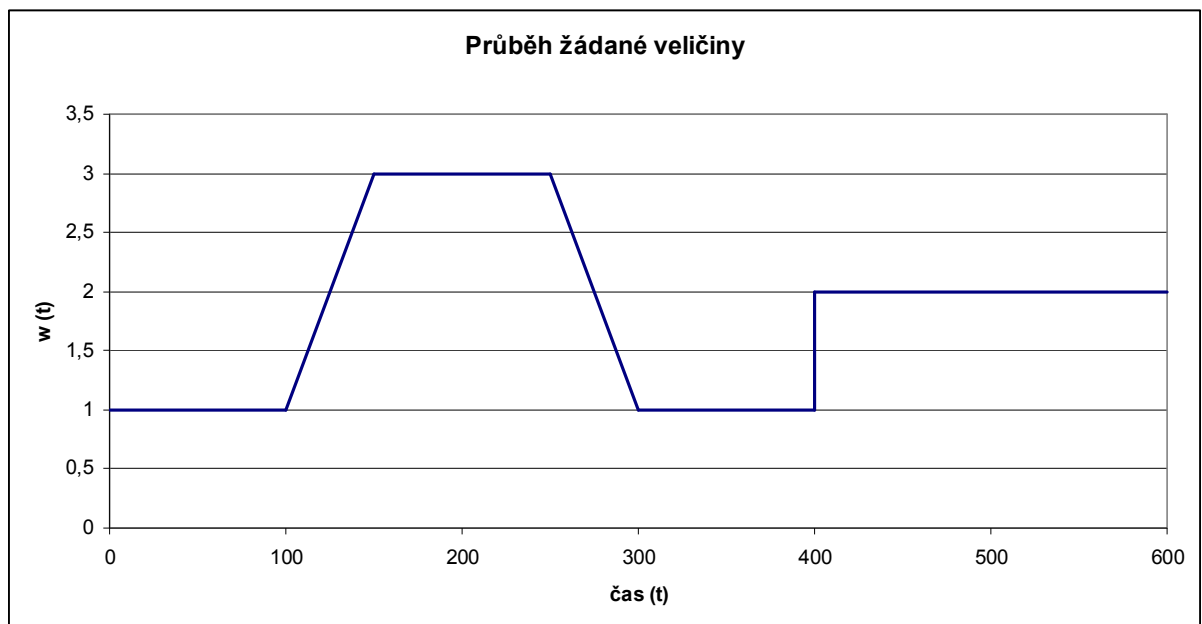
1. odvoďte matematický model pro sledování výšky hladiny v zásobníku v závislosti na vstupním přítoku do zásobníku a na čase.

2. odvoďte model ustáleného stavu výšky hladiny kapaliny v zásobníku,
3. vykreslete statickou charakteristiku (závislost výšky hladiny h^s na ustáleném vstupním přítoku q_v^s),
4. simulujte přechodovou odezvu výšky hladiny v zásobníku na skokovou změnu vstupního přítoku,
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému ($G_{U/Y}$),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci hladiny v zásobníku na žádanou hodnotu (viz Obrázek 1) a kompenzaci případné poruchy, jako řídicí veličinu volte vstupní přítok,
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruchy.

Model: kulovy_zasobnik.mdl



Obrázek 1 Průběh žádané veličiny $w(t)$

3. Uvažujte trychtýřový zásobník na kapalinu o vrchním průměru 4m s výškou zásobníku 4m a počáteční výškou hladiny 3m. Konstanta ventilu je $0,2\text{m}^{2,5}/\text{min}$ a ustálený vstupní

průtok je $0,3\text{m}^3/\text{min}$. Předpokládejte, že zásobník je otevřený a atmosférický tlak působící na hladinu je konstantní.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model, který bude sledovat průběh výšky hladiny kapaliny v zásobníku v závislosti na čase a vstupním přítoku,
2. odvoďte model ustáleného stavu výšky hladiny v zásobníku,
3. vykreslete statickou charakteristiku (závislost výšky hladiny h^s na vstupním přítoku q_v^s),
4. simulujte přechodovou odezvu výšky hladiny v zásobníku na skokovou změnu vstupní veličiny (vstupního přítoku q_v),
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému (G_{UY}),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci hladiny v zásobníku na konstantní žádanou hodnotu ($w=1,5$) a kompenzaci případné poruchy, přičemž jako řídicí veličinu použijte vstupní přítok.
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruchy.

Model: trychtyrovy_zasobnik.mdl

4. Uvažujte dva válcové zásobníky na kapalinu zapojené do série o průměrech 1,6m a 1,5m a výšce 3m s konstantami ventilů $0,27\text{m}^{2.5}/\text{min}$ a $0,28\text{m}^{2.5}/\text{min}$ a počáteční výškou hladin 1,9m a 1,5m. Ustálené vstupní průtoky jsou $0,2\text{m}^3/\text{min}$ a $0,15\text{m}^3/\text{min}$. Předpokládejte, že se jedná o otevřené zásobníky s konstantním průřezem, takže atmosférické tlaky působící na hladiny kapalin jsou také konstantní. Dna zásobníků se nacházejí ve stejné výšce.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model, který bude sledovat průběh hladin v zásobnících v závislosti na vstupních přítocích do zásobníků a na čase,
2. odvoďte model ustálených stavů výšek hladin v zásobnících,

3. vykreslete statické charakteristiky (závislost ustálených výšek hladin v zásobnících na ustálených přítocích),
4. simulujte přechodovou odezvu výšek hladin obou zásobníků na skokovou změnu vstupních veličin (přítoků q_{v1} a q_{v2}),
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému (G_{UY}),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci hladin v zásobnících na konstantní žádanou hodnotu ($w_1=2$, $w_2=1$) a kompenzaci působících poruch, přičemž řídicími veličinami budou vstupní přítoky do zásobníků.
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruchy.

Model: valcovy_zasobnik_v_serii.mdl

5. Uvažujte v sérii zapojené dva kulové zásobníky na kapalinu o průměru 3m s počáteční výškou hladin 0,5m a 0,2m a konstantami ventilů $0,25\text{m}^{2,5}/\text{min}$ a $0,5\text{m}^{2,5}/\text{min}$. Ustálené vstupní průtoky jsou $0,3\text{m}^3/\text{min}$ a $0,4\text{m}^3/\text{min}$. Předpokládejte, že se jedná o otevřené zásobníky s konstantním atmosférickým tlakem působícím na hladiny kapalin. Dna zásobníků jsou ve stejné výšce.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model pro sledování průběhů výšek hladin v zásobnících v závislosti na čase a vstupních přítocích do těchto zásobníků,
2. odvoďte model ustálených stavů výšek hladin v zásobnících,
3. vykreslete statické charakteristiky (závislost ustálených výšek hladin v zásobnících na ustálených přítocích),
4. simulujte přechodovou odezvu výšek hladin v zásobnících na skokovou změnu vstupního přítoku do 1. zásobníku,
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému (G_{UY}),

3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci hladiny v 1. zásobníku na konstantní žádanou hodnotu ($w=2,5$) a kompenzaci působících poruch, přičemž jako řídicí veličinu volte vstupní přítok do 1. zásobníku.
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruchy – přítoku do 2. zásobníku.

Model: kulovy_zasobnik_v_serii.mdl

6. Uvažujte dva trychtýřové zásobníky na kapalinu zapojené do série o vrchních průměrech 2m, výškách 3m, počátečními hladinami 1m a 0,5m a konstantami ventilů $0,75\text{m}^{2,5}/\text{min}$ a $0,6\text{m}^{2,5}/\text{min}$. Vstupní průtoky v ustáleném stavu jsou $0,38\text{m}^3/\text{min}$ a $0,39\text{m}^3/\text{min}$. Předpokládejte, že zásobníky jsou otevřené a atmosférický tlak působící na hladiny kapalin je konstantní. Dna zásobníků jsou ve stejné výšce.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model, který bude sledovat průběhy hladin v zásobnících v závislosti na čase a vstupních přítocích do těchto zásobníků,
2. odvoďte model ustálených stavů výšek hladin v obou zásobnících,
3. vykreslete statické charakteristiky (závislost ustálených výšek hladin v zásobnících na ustálených přítocích),
4. simulujte přechodovou odezvu výšek hladin na skokové změny vstupních přítoků,
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému (G_{UY}),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci hladin v zásobnících na konstantní žádanou hodnotu ($w_1=1,5$, $w_2=1$) a kompenzaci působících poruch, jako řídicí veličiny volte vstupní přítoky do zásobníků,
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruchy.

Model: trychtyrovy_zasobnik_v_serii.mdl

7. Uvažujte průtočný výměník tepla, který obsahuje chladicí kapalinu v plášti a chlazenou uvnitř výměníku. V následující tabulce najdete parametry daného systému:

parametr	chlazená kapalina	chladící kapalina
Teplota na vstupu	60°C	5°C
Počáteční teplota ve výměníku	40°C	30°C
Objemový průtok	0,3 m ³ /min	0,1 m ³ /min
Objem	1,2 m ³	0,64 m ³
Hustota	985 kg/ m ³	998 kg/m ³
Měrné teplo	4,05 kJ/kgK	4,18 kJ/kgK
Koeficient přestupu tepla	50 W/m ² K	
Přestupná plocha	5,5 m ²	

Předpokládejte, že chladící a chlazená kapalina jsou dokonale promíchávány. Dále zanedbejte tepelnou kapacitu stěny oddělující kapaliny. Objemy, průtoky, koeficient přechodu tepla, měrná tepla i hustoty obou kapalin považujte za konstantní.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

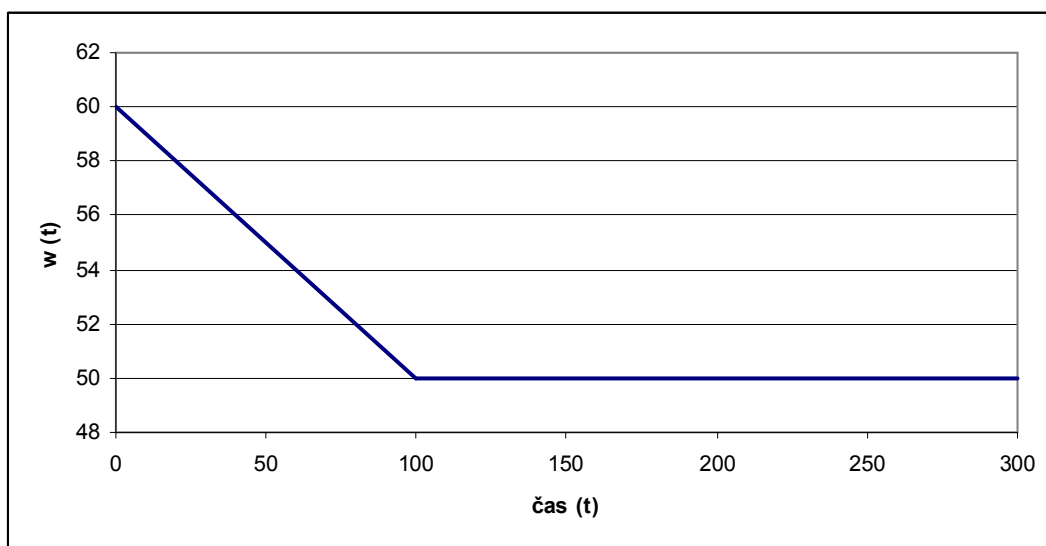
1. odvoďte matematický model, který bude popisovat jak se bude vyvíjet teplota chlazené a chladící kapaliny ve výměníku v závislosti na čase a vstupních veličinách (vstupní teploty kapalin a jejich přítoky),
2. odvoďte model ustálených stavů teploty chladící a chlazené kapaliny,
3. vykreslete statickou charakteristiku (závislost ustálené teploty chlazené kapaliny na ustálené teplotě vstupní chladící a vstupní chlazené kapaliny),
4. simulujte přechodovou odezvu teploty chlazené kapaliny ve výměníku a chladící kapaliny v plášti na skokovou změnu vstupních teploty chladící kapaliny a jejího vstupního přítoku,
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému (G_{UY}),

3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci teploty chlazené kapaliny ve výměníku na žádanou hodnotu (viz *Obrázek 2*) a kompenzaci působících poruch, přičemž řídicí veličinou bude vstupní teplota chladicí kapaliny v plášti,
4. proved'te simulaci řízení včetně vlivu poruch.

Model: prutocny_vymenik_s_promichavanim.mdl



Obrázek 2 Průběh žádané veličiny $w(t)$

8. Uvažujte případ jednoduchého trubkového výměníku na kapalinu. Tento výměník je tvořený jednou trubkou, uvnitř které proudí chlazená kapalina, která je chlazená přestupem tepla do okolí přes stěnu trubky. Předpokládejte, že hustota, koeficient přestupu tepla, měrné teplo a průtok chlazené kapaliny jsou konstantní. Dále předpokládejte ideální pístový tok kapaliny a zanedbejte tepelnou kapacitu stěny trubky. Parametry výměníku jsou: průměr trubky 0,08m; délka trubky 120m; teplota kapaliny na vstupu 20°C; teplota okolí 10°C; objemový průtok 0,05m³/min; hustota kapaliny 985kg/m³; měrné teplo kapaliny 4,05kJ/kgK a koeficient přestupu tepla 43,5W/m²K.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model, který bude popisovat jak se bude vyvíjet teplota kapaliny v trubce v závislosti na čase, prostorové souřadnici a teplotě okolí,
2. odvoďte model ustáleného stavu,
3. simulujte model ustáleného stavu (ustálený teplotní profil v trubkovém výměníku),
4. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Model: jednokapacitni_trubkovy_vymenik_tepla.mdl

9. Uvažujte stejnosměrný motor řízený proudem kotvy. Předpokládejte konstantní buzení kotvy a zanedbejte celkovou indukčnost kotvy. Výstupní veličinou bude úhlové natočení a úhlová rychlost. Parametry systému jsou: proud kotvy 5A; zátěžný moment 4Nm; celkový moment setrvačnosti 2kgm^2 ; momentová konstanta motoru 2Nm/A; úhlová rychlost 0 rad/s; úhlové natočení 0 rad.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model, který bude sledovat průběh úhlového natočení a úhlové rychlosti v závislosti na čase, zátěžovém momentu a proudu kotvy,
2. simulujte přechodovou odezvu úhlového natočení a úhlové rychlosti na skokovou změnu proudu kotvy a zátěžového momentu,
3. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému (G_{UY}),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci rychlosti na konstantní žádanou hodnotu ($w=200$) a kompenzaci poruchy, přičemž řídicí veličinou bude proud kotvy,
4. proved'te simulaci řízení včetně vlivu různé zátěže.

Model: ss_motor_rizeny_proudem_kotvy.mdl

10. Uvažujte stejnosměrný motor řízený napětím kotvy. Předpokládejte konstantní buzení kotvy a zanedbejte celkovou indukčnost kotvy. Výstupní veličinou bude úhlové natočení a úhlová rychlost. Parametry systému jsou: napětí kotvy 6V; zátěžný moment 4Nm; celkový odpor kotvy 2Ω ; celkový moment setrvačnosti 2kg.m^2 ; momentová konstanta motoru 2Nm/A; úhlová rychlost 0 rad/s; úhlové natočení 0 rad.

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

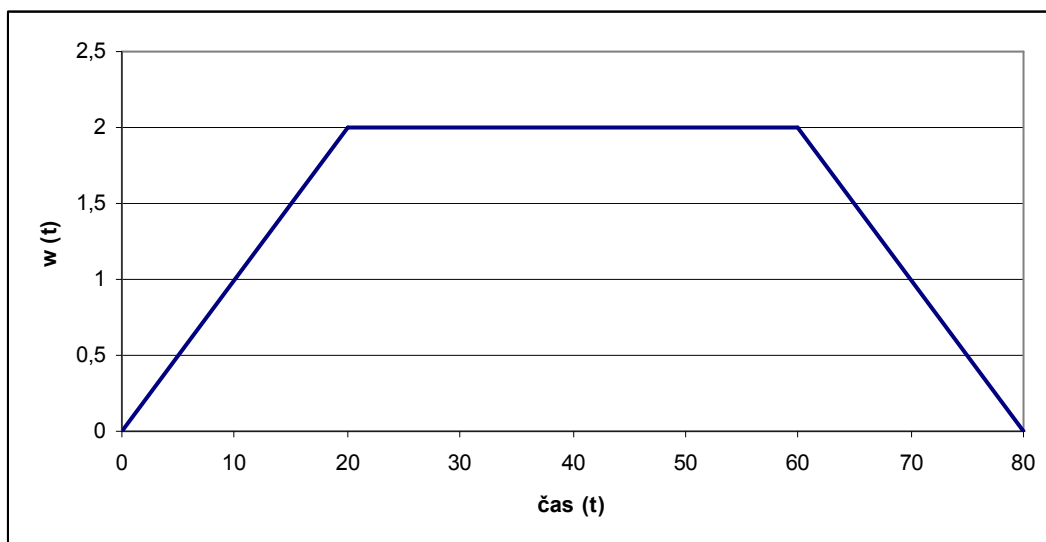
1. odvoďte matematický model, který bude sledovat průběh úhlového natočení a úhlové rychlosti v závislosti na čase, zátěžovém momentu a napětí kotvy,

2. simulujte přechodovou odezvu úhlového natočení a úhlové rychlosti, když pro napětí kotvy použijete pravoúhlý impuls a pro zátěžový moment použijete skokovou změnu,
3. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému ($G_{U/Y}$),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci rychlosti na žádanou hodnotu (viz Obrázek 3) a kompenzaci poruchy, přičemž řídicí veličinou bude napětí kotvy,
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu různé zátěže.

Model: ss_motor_rizeny_napetim_kotvy.mdl



Obrázek 3 Průběh žádané veličiny $w(t)$

11. Uvažujte rekuperátor pro ohřev vzduchu, ve kterém probíhá výměna tepla vedením od kouřových plynů přes stěnu trubky a od stěny trubky k vzduchu. Na vstupu tedy je teplota kouřových plynů obtékajících trubku, ve které proudí vzduch (výstup). Zanedbejte rozdíl teplot na stěnách trubky. Parametry systému:

parametr	Trubka	Ohříváný vzduch	Kouřové plyny
Teplota			80°C
Počáteční teplota	15°C	10°C	

Hustota	7850 kg/m ³	1,29 kg/m ³	
Objem	0,1413 m ³	0,098 m ³	
Měrná tepelná kapacita	0,469 kJ/kgK	1,1 kJ/kgK	
Součinitel přestupu tepla	10 W/m ² K	10 W/m ² K	

Vnější povrch trubky rekuperátoru obtékáný kouřovými plyny je 2,025m². Vnitřní povrch trubky rekuperátoru obtékáný vzduchem je 1,668m².

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

1. odvoďte matematický model pro přestup tepla kouřové plyny-trubka a trubka-vzduch, který popisovat jak se bude chovat teplota vzduchu v rekuperátoru v závislosti na čase a teplotě kouřových plynů,
2. odvoďte model ustálených stavů teploty stěny trubky a teploty vzduchu,
3. vykreslete statické charakteristiky, (závislost teploty stěny trubky a vzduchu v rekuperátoru na ustálené teplotě kouřových plynů), (závislost teploty vzduchu v rekuperátoru na ustálené teplotě kouřových plynů),
4. simulujte přechodovou odezvu teploty vzduchu v rekuperátoru na skokovou změnu teploty kouřových plynů,
5. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému (G_{UY}),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci teploty vzduchu na konstantní žádanou hodnotu ($w=20$) a kompenzaci poruchy, přičemž řídicí veličinou bude teplota kouřových plynů,
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruchy.

Model: rekuperator.mdl

12. Uvažujte průtočný chemický reaktor s chlazením v plášti. Předpokládejte, že chladicí i reakční směs v reaktoru jsou dokonale promíchávány. Dále zanedbejte tepelnou kapacitu stěny mezi chladicí a reakční směsí. Za konstanty považujte hustoty, objemy, koeficienty přechodu tepla a měrné tepelné kapacity směsí. V reaktoru probíhá

exotermická reakce typu $A \xrightarrow{k_1} B \xrightarrow{k_2} C$, přičemž žadáným produktem dané chemické reakce je látka B. Parametry systému jsou v následující tabulce:

Parametr	Reakční směs	Chladicí kapalina
Vstupní teplota °C	50	15
Počáteční teplota °C	70	22
Objem m ³	1,2	0,7
Hustota kg/m ³	985	998
Měrné teplo kJ/kgK	4,05	4,18
Objemový průtok m ³ /min	0,07	0,05
Součinitel přestupu tepla kJ/m ² Kmin	43,5	
Přestupná plocha m ²	6	
Vstupní koncentrace kmol/m ³	složka A=2,85	složka B=0
Počáteční koncentrace v reaktoru kmol/m ³	složka A=0,5	složka B=1,6
Reakční entalpie reakcí kJ/kmol	h1= 48000	h2=22000
Pre-exponenciální faktory 1/min	k10=5,616*10 ¹⁶	k20=1,128*10 ¹⁸
Hodnota E/R K	E1/R=13477	E2/R=15290

Úkoly – analýza a simulace technologických procesů:

- odvodte matematický model, který bude sledovat průběhy koncentrací složek A a B a průběhy teplot reakční směsi a chladicí kapaliny v závislosti na čase a na vstupních veličinách, kterými jsou vstupní koncentrace složky A, vstupní přítok reakční směsi a její vstupní teplota, vstupní přítok chladicí kapaliny a její vstupní teplotu,
- odvodte model ustálených stavů koncentrací složek A a B a teplot reakční směsi a chladicí kapaliny,
- vykreslete statické charakteristiky:
 - závislost koncentrace složky B (produktu) na průtoku reakční směsi a chladiwa v ustáleném stavu,
 - závislost teploty v reaktoru na průtoku reakční směsi a chladiwa v ustáleném stavu,

4. na základě statických charakteristik doporuďte optimální pracovní bod reaktoru (pro maximální výtěžek produktu – složky B),
5. simulujte přechodovou odezvu koncentrace složky B a teploty v reaktoru:
 - a. na skokovou změnu přítoku reakční směsi,
 - b. na skokovou změnu vstupní koncentrace složky A,
6. určete do jaké třídy systémů daný model patří.

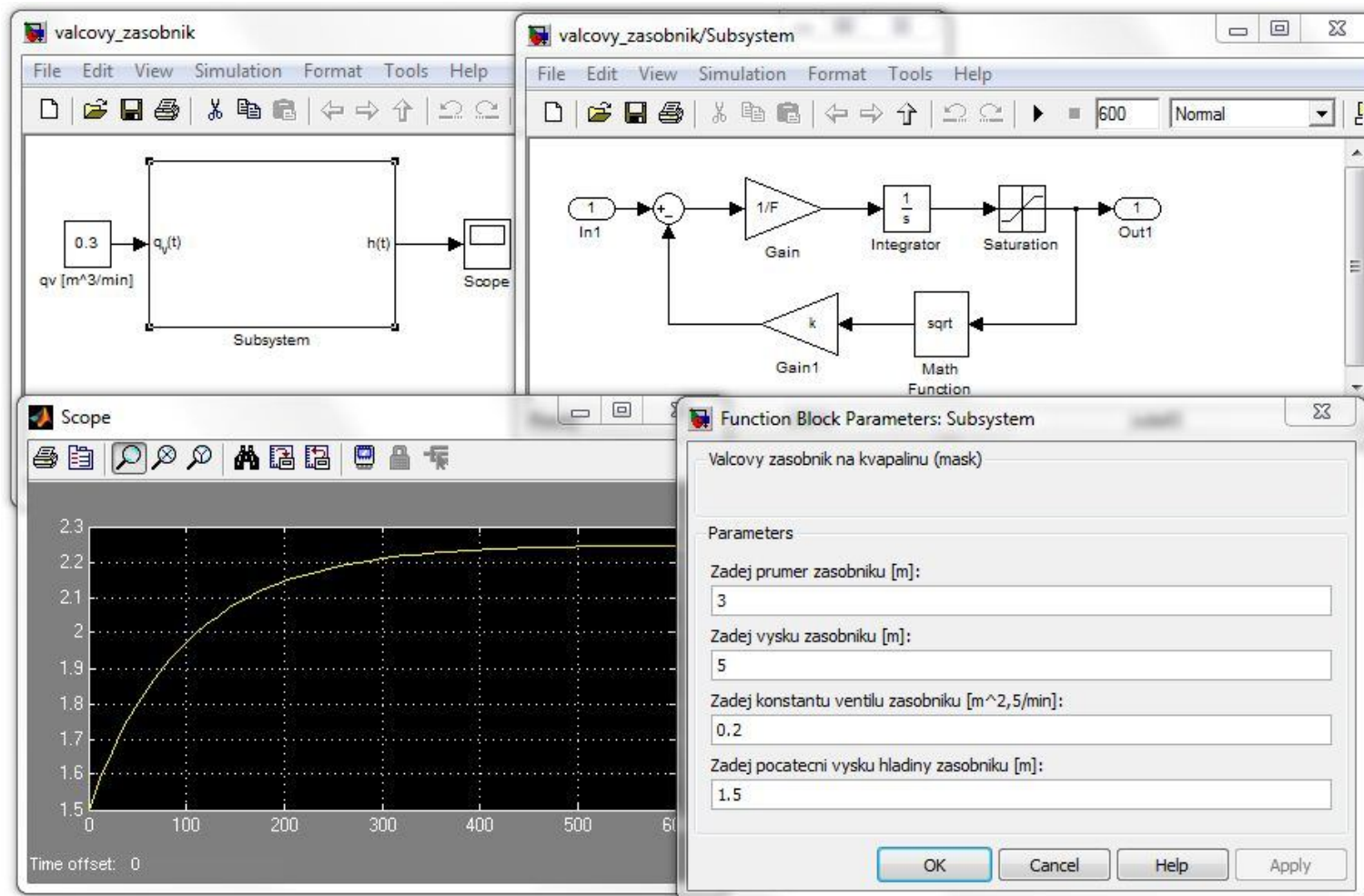
Úkoly – stavová a algebraická teorie řízení:

1. určete jestli je daný systém říditelný a pozorovatelný pro zvolený pracovní bod,
2. vypočítejte přenos systému ($G_{U/Y}$),
3. navrhnete vhodné řízení, které zabezpečí regulaci koncentrace složky B na konstantní žádanou hodnotu (optimální pracovní bod zjištěný v bodu 4) a kompenzaci poruchy, přičemž jako řídicí veličiny volte přítok reakční směsi a průtok chladiwa,
4. proveďte simulaci řízení včetně vlivu poruch.

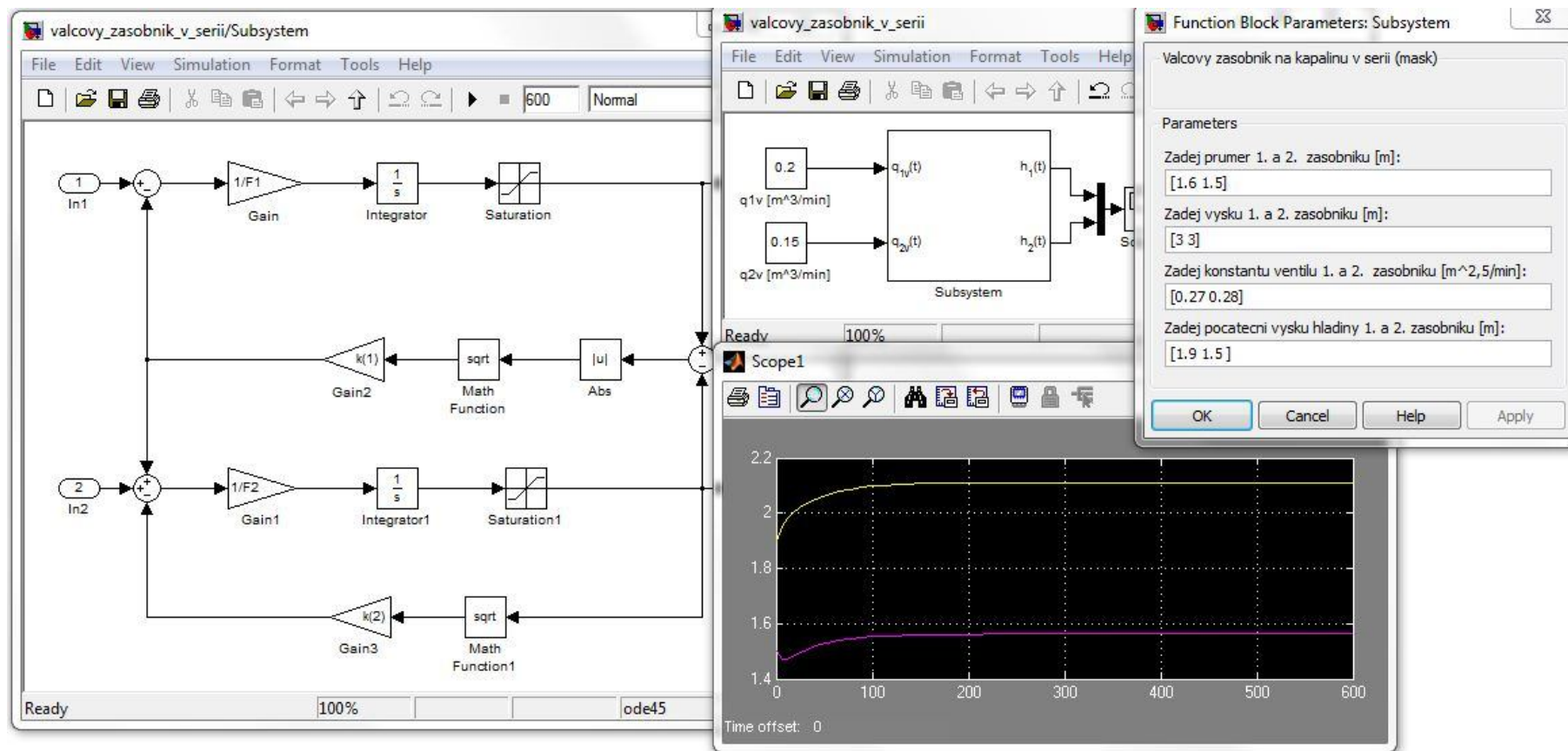
Model: chemicky_reaktor.mdl

PRÍLOHA P II: SIMULAČNÉ MODELY

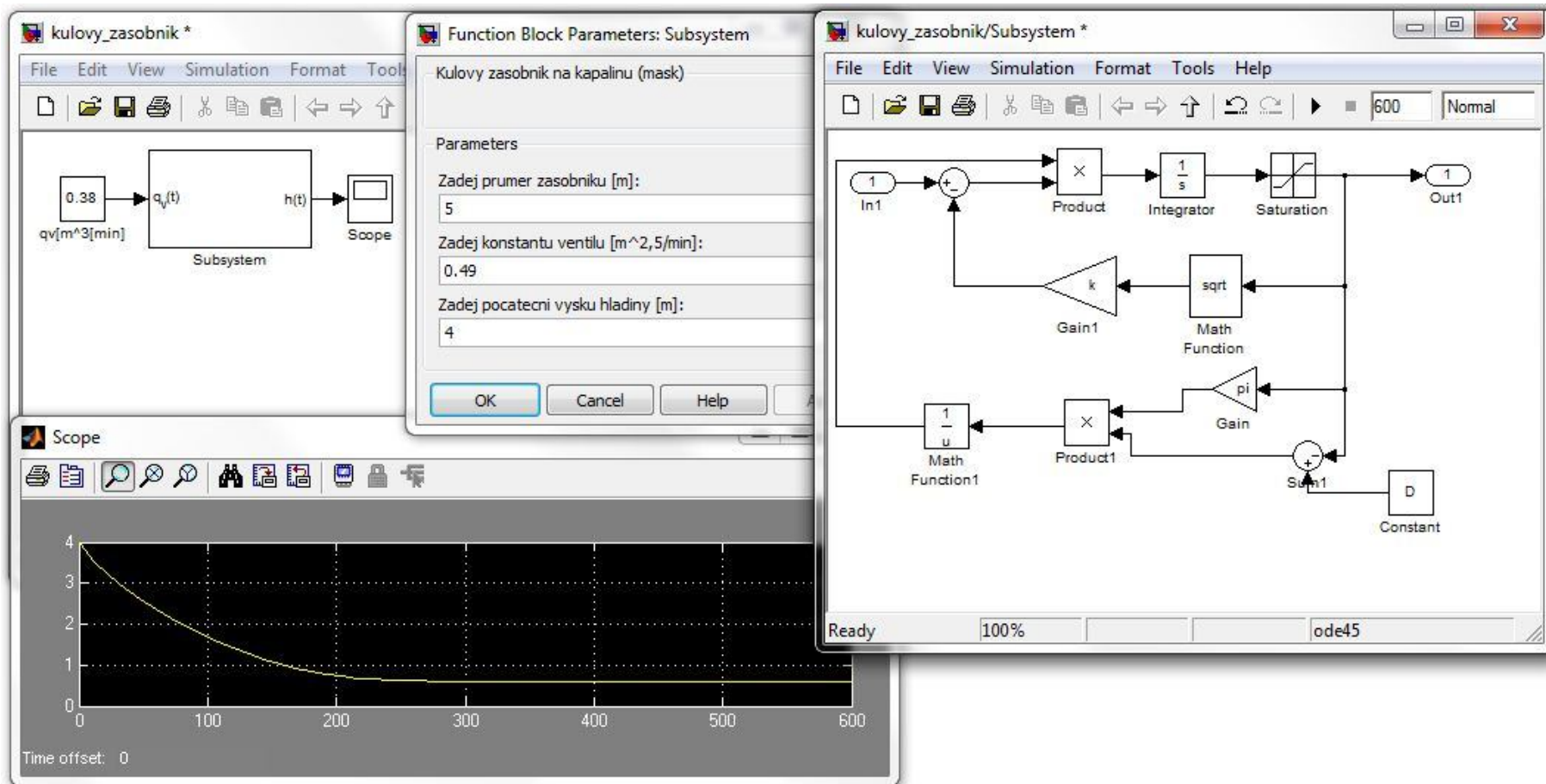
Valcový zásobník na kvapalinu



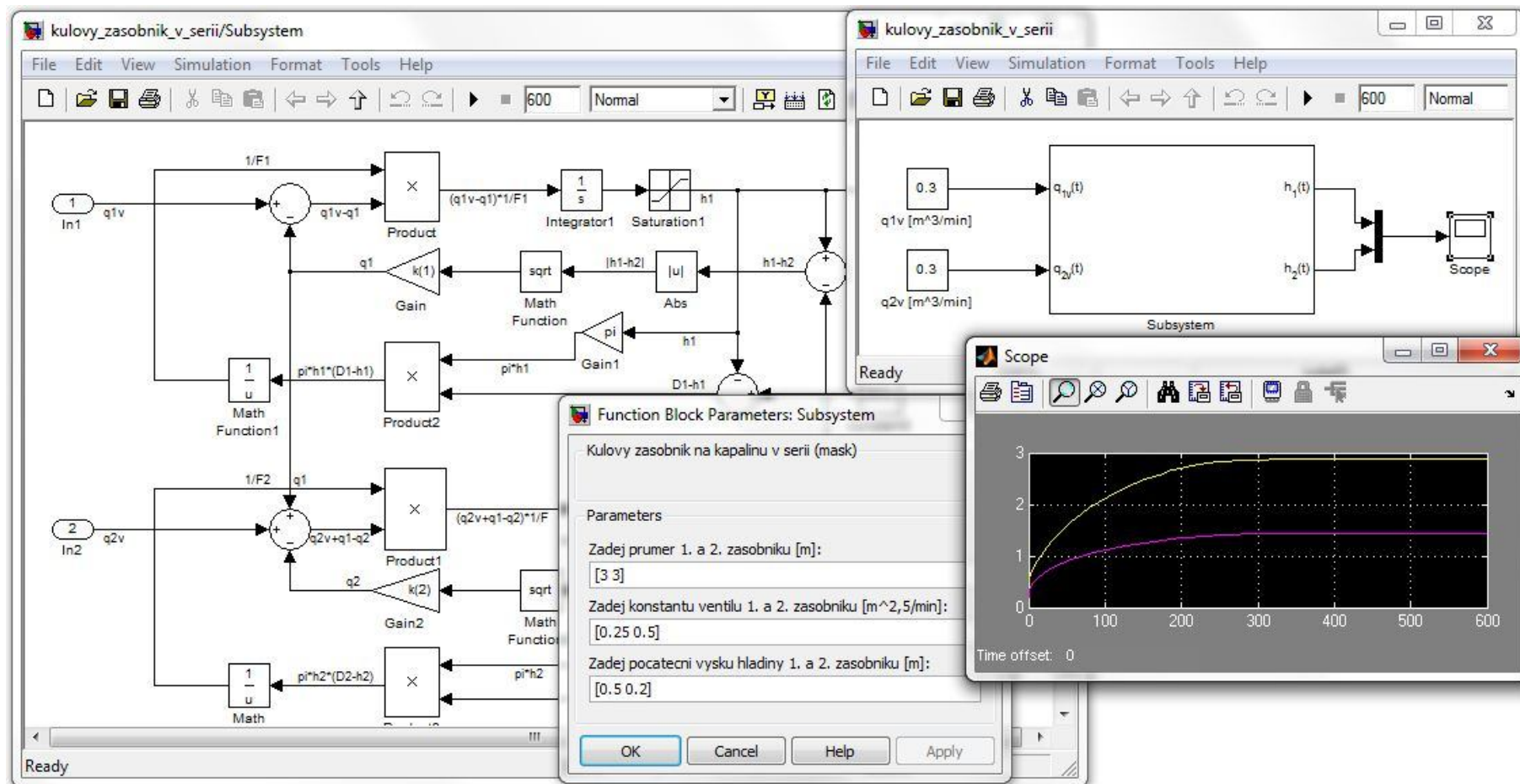
Valcový zásobník na kvapalinu v sérii



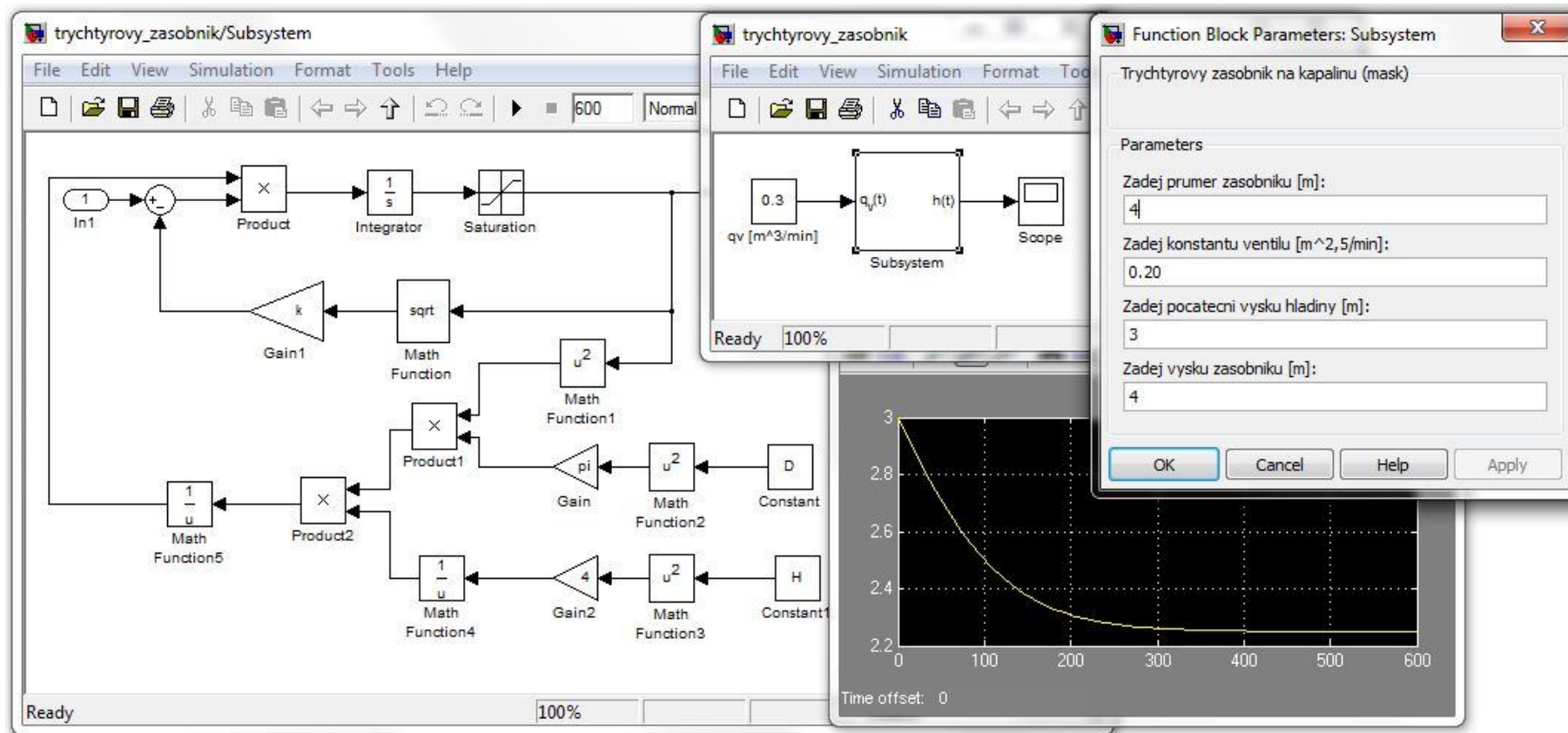
Guľový zásobník na kvapalinu



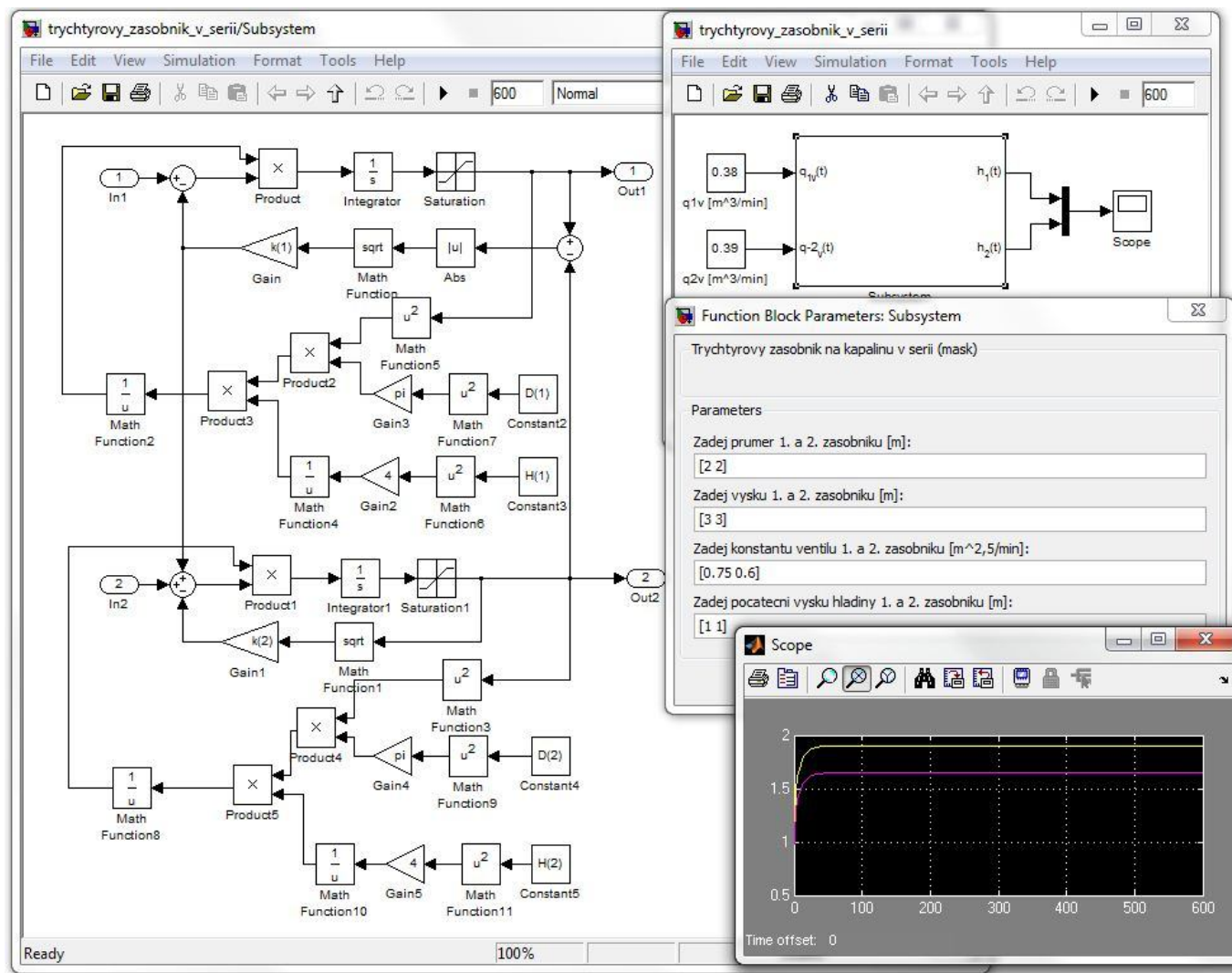
Guľový zásobník na kvapalinu v sérii



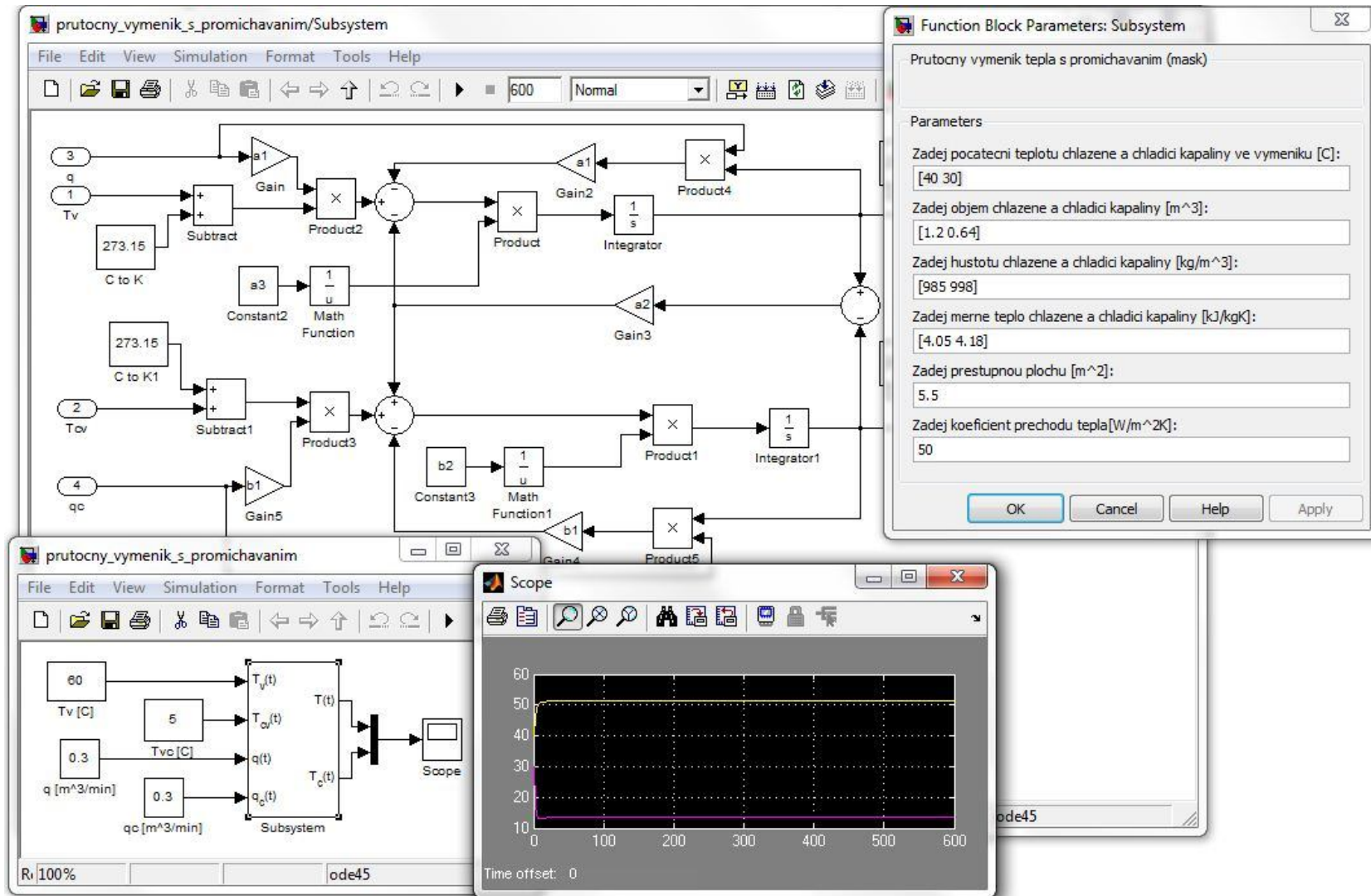
Lievkový zásobník na kvapalinu



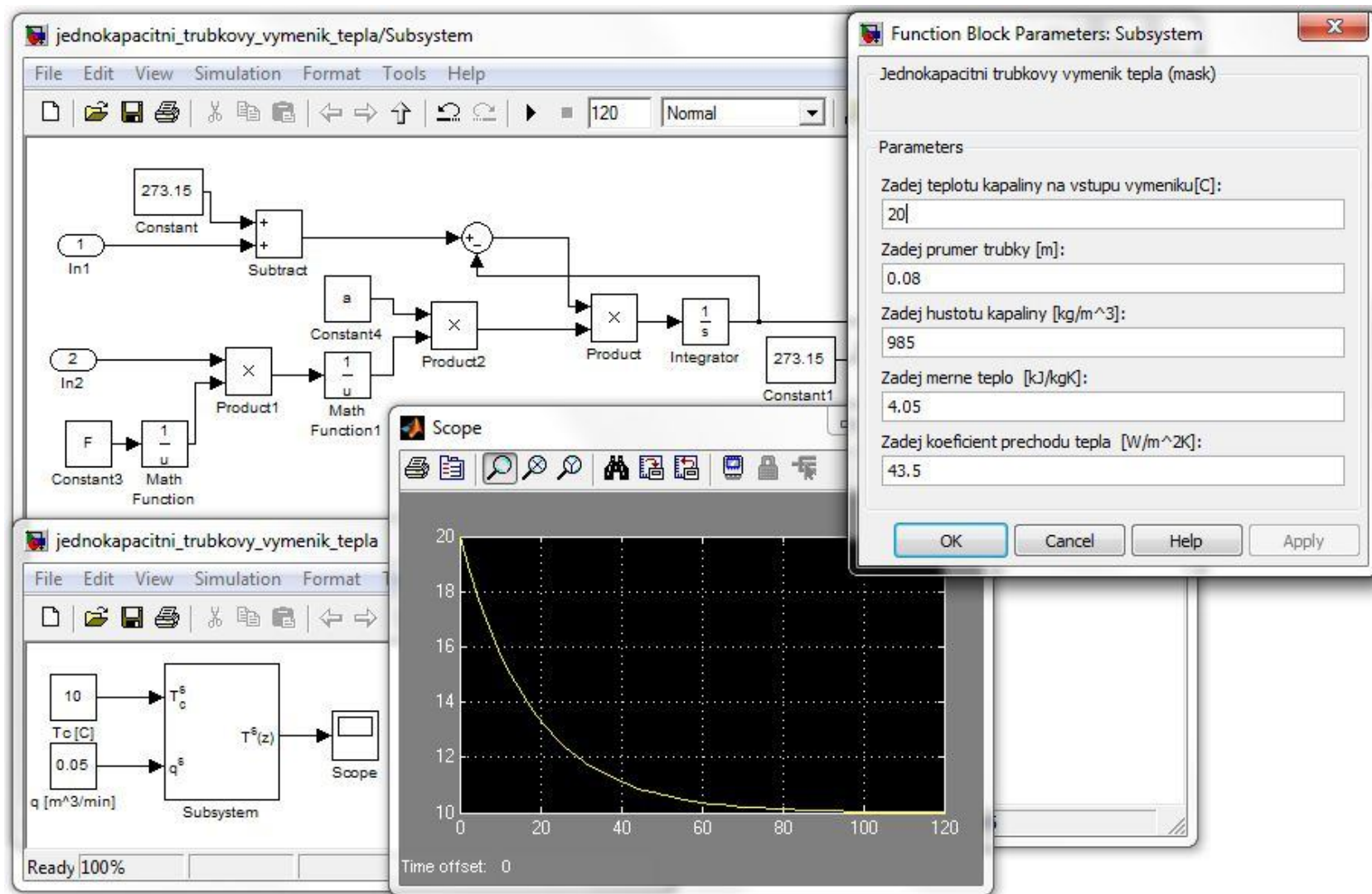
Lievikový zásobník na kvapalinu v sérii



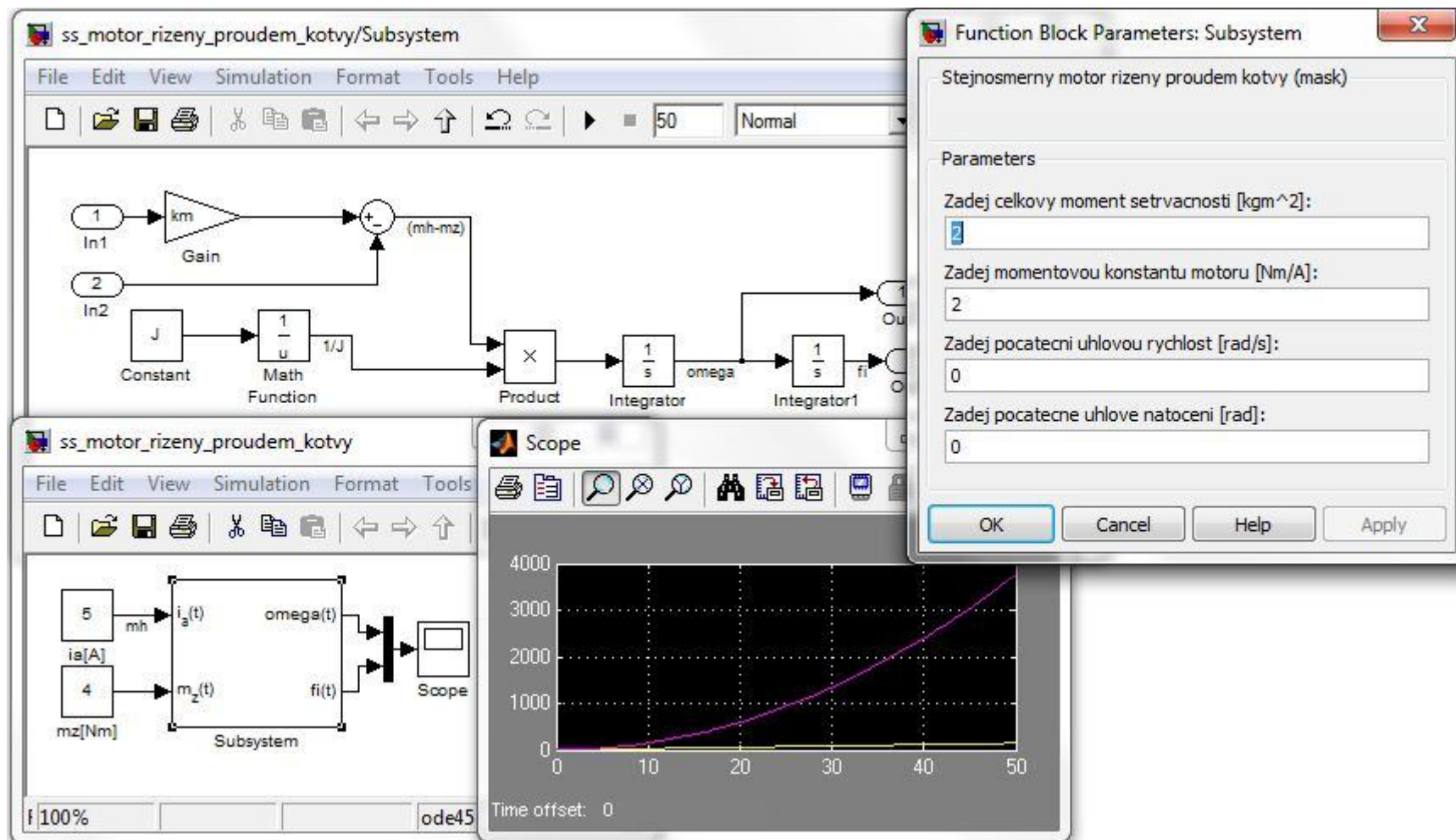
Prietokový výmenník tepla s premiešavaním



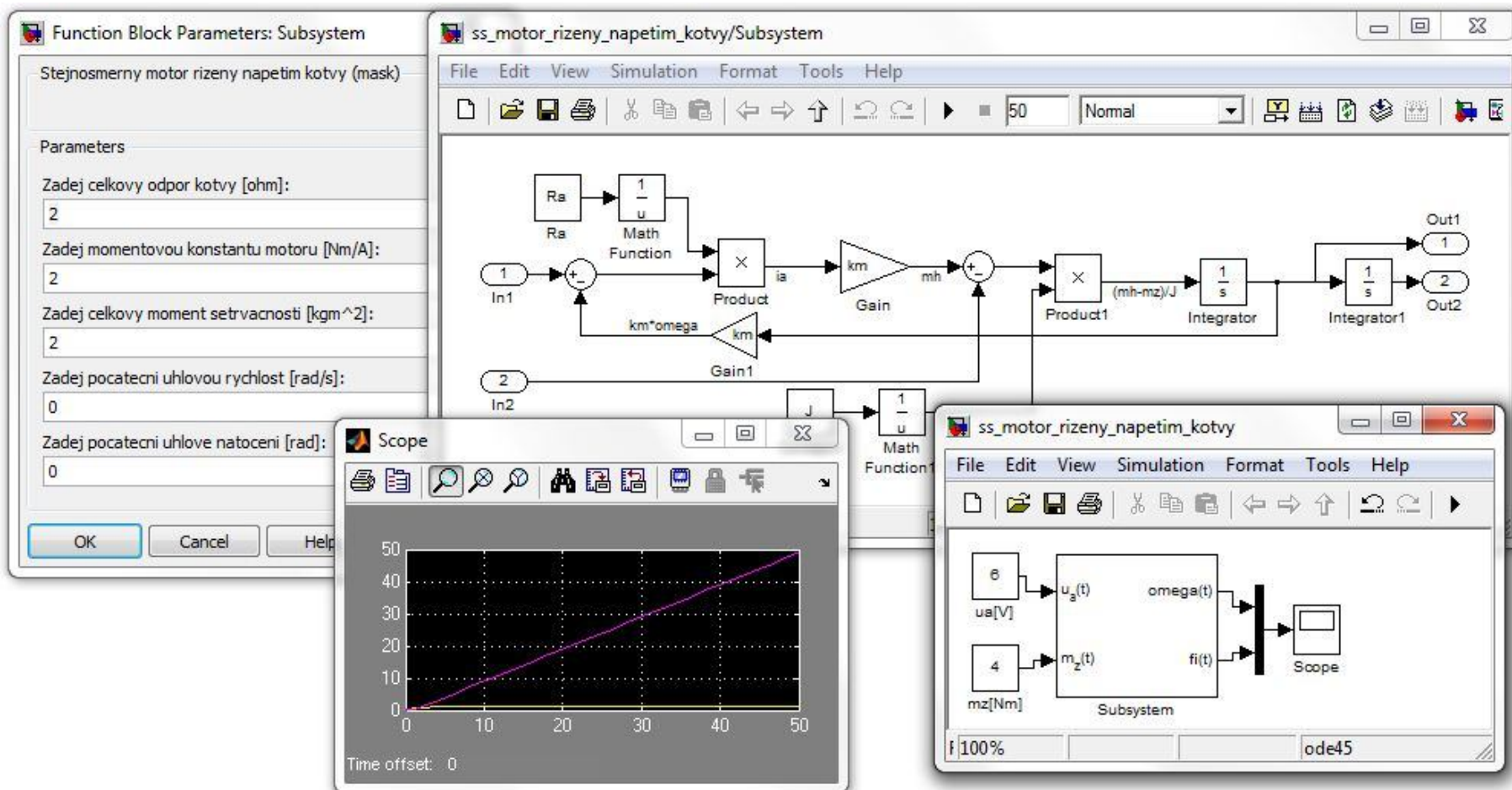
Jednkapacitný rúrkový výmenník tepla



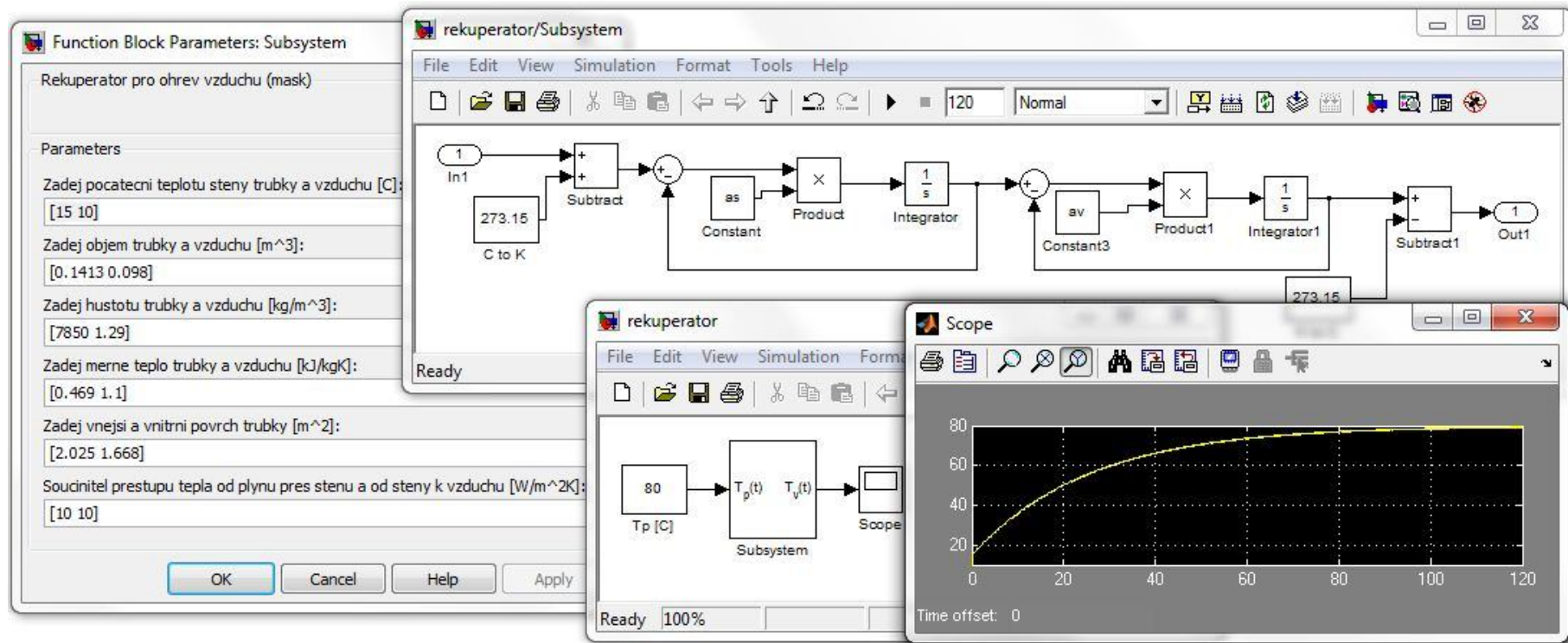
Jednosmerný motor riadený prúdom kotvy



Jednosmerný motor riadený napätím kotvy



Rekuperátor pre ohrev vzduchu



Prietokový chemický reaktor s chladením v plášti

