

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**

**FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ  
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-184466-98969

**Modelovanie a návrh riadenia  
procesov v prostredí gPROMS  
ModelBuilder**

**BAKALÁRSKA PRÁCA**

**2023**

**Kateryna Kruhliak**



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**

**FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ  
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-184466-98969

# **Modelovanie a návrh riadenia procesov v prostredí gPROMS ModelBuilder**

**BAKALÁRSKA PRÁCA**

Študijný program: Riadenie Procesov  
Študijný odbor: Kybernetika  
Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov  
Vedúci práce: doc. Ing. Radoslav Paulen, PhD.

**2023**

**Kateryna Kruhliak**





## ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Kateryna Kruhliak**  
ID študenta: 98969  
Študijný program: riadenie procesov  
Študijný odbor: kybernetika  
Vedúci práce: doc. Ing. Radoslav Paulen, PhD.  
Vedúci pracoviska: doc. Ing. Martin Klaučo, PhD.  
Konzultant: Ing. Rastislav Fáber  
Miesto vypracovania: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov

Názov práce: **Modelovanie a návrh riadenia procesov v prostredí gPROMS ModelBuilder**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Programové prostredie gPROMS ModelBuilder je vhodný nástroj na modelovanie a simuláciu matematických modelov chemicko-technologických procesov. Softvér zjednodušuje prácu s komplexnými matematickými modelmi a poskytuje transparentné pracovné prostredie pre užívateľa. Prvým cieľom tejto práce je návrh matematického modelu vybraného chemicko-technologického procesu s následnou implementáciou v programe gPROMS ModelBuilder.

Úlohy:

- Zoznámenie sa s pracovným prostredím gPROMS ModelBuilder
- Nadobudnutie základných znalostí o vybranom chemicko-technologickom procese
- Návrh matematického modelu
- Implementácia a validácia modelu v gPROMS ModelBuilder

Zoznam odbornej literatúry:

1. M. King, 2011. Process Control: A Practical Approach. John Wiley & Sons Ltd.



# Podakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Radoslavovi Paulenovi, PhD. za pomoc pri získaní nových vedomostí v riadení a modelovaní procesov, cenné rady a pripomienky. Taktiež ďakujem aj konzultantovi Ing. Rastislavovi Fabérovi za rady pri konzultáciách.





# Abstrakt

Programové prostredie gPROMS ModelBuilder je vhodný nástroj na modelovanie a simuláciu matematických modelov chemicko-technologických procesov. Softvér zjednodušuje prácu s komplexnými matematickými modelmi a poskytuje transparentné pracovné prostredie pre užívateľa. Prvým cieľom tejto práce je zoznámenie z programovým prostredím gPROMS ModelBuilder, jeho objektami a funkciami. Pre štúdium boli zobrať dva chemicko-technologické procesy zásobník kvapaliny a zmiešavač. Zásobník použitý z knižnice Process Model Library (PML) má v systéme binárnu zmes voda metanol. Zmiešavač slúži na miešanie dvoch prúdov uhľovodíkov isobutánu a but-1-énu. Pre vybrané procesy boli spravené matematické modely na základe materiálovej bilancii dynamických systémov. Druhým cieľom je navrhnúť PI regulátory pre identifikované systémy, pomocou softvérového senzora v programe gPROMS ModelBuilder. Parametre regulátorov boli navrhnuté pomocou metódy umiestnenia pólov a Ziegler-Niekolsovej metódy. Následne navrhnuté ovládanie je implementované na proces pre dosiahnutie systémom žiadanej výšky hladiny a koncentrácie v čo najkrajšom čase.

**Kľúčové slová:** matematický model, zásobník kvapaliny, zmiešavač



# Abstract

The gPROMS ModelBuilder software environment is a suitable tool for modeling and simulating mathematical models of chemical and technological processes. The software simplifies working with complex mathematical models and provides a transparent working environment for the user. The first objective of this work is to introduce the gPROMS ModelBuilder software environment, its objects, and functions. For the study, two chemical and technological processes, namely a liquid tank and a mixer, were selected. The tank used by the Process Model Library (PML) contains a binary mixture of methanol and water. The mixer is used to mix two streams of hydrocarbons, isobutane and 1-butene. Mathematical models based on material balances of dynamic systems were created for the selected processes. The second objective is to design PI controllers for the identified systems using the software sensor in gPROMS ModelBuilder. The controller parameters were designed using the pole placement method and the Ziegler-Nichols method. Subsequently, the designed control is implemented in the process to achieve the desired level of liquid height and concentration in the shortest possible time.

**Keywords:** mathematical model, liquid tank, mixer



# Obsah

Podakovanie	iii
Abstrakt	v
Abstract	vii
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoretická časť</b>	<b>3</b>
2.1 Modelovanie chemicko-technologických procesov . . . . .	3
2.1.1 Chemicko-technologické procesy . . . . .	3
2.1.2 Alkylácia . . . . .	4
2.2 Návrh riadenia procesov . . . . .	5
2.2.1 Umiestnenie pólov . . . . .	6
2.2.2 Zieglerova-Nicholsova metóda . . . . .	6
2.3 Program gPROMS ModelBuilder . . . . .	8
2.3.1 Tvorba modelu . . . . .	8
2.3.2 Doplnkové nástroje . . . . .	11
<b>3 Experimentálna časť</b>	<b>15</b>

---

3.1	Vytvorenie modelu . . . . .	15
3.1.1	Zásobník kvapaliny . . . . .	15
3.1.2	Zmiešavač . . . . .	16
3.2	Identifikácia prenosových funkcií . . . . .	16
3.2.1	Zásobník kvapaliny . . . . .	16
3.2.2	Zmiešavač . . . . .	19
3.3	Návrh PID regulátora . . . . .	22
3.3.1	Regulácia výšky hladiny . . . . .	22
3.3.2	Regulácia koncentrácie . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Záver</b>	<b>29</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>31</b>

S rozvojom informačných technológií technický sektor čoraz viac využíva matematické modely a simulácie [8]. To umožňuje predpovedať zmeny procesných podmienok, teploty, tlaku, koncentrácie reaktantov a produktov, vplyv na chemické reakcie, efektívnosť procesu a kvalitu produktu. Umožňuje tiež optimalizovať procesy a zlepšiť ich ekonomickú efektívnosť. Každý výrobca by sa mal starať nielen o maximalizáciu zisku, ale aj o bezpečnosť pracovných podmienok, predpovedanie úrazov, znižovanie množstva odpadu a dopadov na životné prostredie. Vykonanie simulácií môže využiť matematické modely na predpovedanie množstva produktov, vedľajších produktov a odpadu, čo môže ušetriť čas, peniaze a zdroje. Zastavenie výroby kvôli experimentovaniu je drahé a ťažkopádne rozhodnutie, práve preto zohráva simulácia matematických modelov v priemysle dôležitú úlohu.

Implementácia softvéru založeného na inteligentných algoritmoch v chemickej výrobe pomáha chemickým inžinierom navrhovať technologické procesy. Jedným z takýchto programov je gPROMS ModelBuilder. Toto prostredie sa používa, ako pri navrhovaní procesov, tak aj pri školení operátorov [2].

Účelom tejto práce je naučiť sa pracovať s programom, preskúmať jeho možnosti, potenciál a využiť tieto znalosti pri návrhu vlastného modelu. Teoretická časť práce sa zaoberá informáciami o chemických prevádzkach a jej základných princípoch, ktoré prechádzajú pri plánovaní výroby. Opísaná je technológia získavania uhlovodíkov s vysokým oktánovým číslom, ktorá sa nazýva alkylácia. Z tejto technológie rafinérii bola prevzatá etapa miešania uhlovodíkov pre štúdium s programom. Aby bolo možné tento proces ďalej modelovať, jeho matematický model nájdeme pomocou metódy umiestnenie pólov a Ziegler-Nicholsovej metódy. Keďže simulácia prebieha v úplne novom prostredí, je potrebné sa oboznámiť s dokumentáciou výrobcu. Na implementáciu všetkých druhov projektov má program už skvelú funkčnosť, ale ak nemáme dostatok vystavaných možností, prídu vám na pomoc doplnkové nástroje.

Praktická časť zahŕňa tréning s programovým prostredím. Oboznámenie sa s hlavnými modelmi chemicko-technologických procesov. Na príklade z knižnice Process Model Library (PML) sme aplikovali poznatky získané pri modelovaní a riadení procesov. Hľadali sme matematický model procesu, ktorý sa potom použil pri návrhu riadenia. Nakoniec je nastavené riadenie výšky hladiny a koncentrácie zložiek zmesi.



## Teoretická časť

---

### 2.1 Modelovanie chemicko-technologických procesov

#### 2.1.1 Chemicko-technologické procesy

Pred chemickým inžinierom stojí úloha návrhu chemicko-technologických procesov, ktorými musí prejsť surovina, aby dostať z nej produkt. Do všeobecnej výroby produktu zo suroviny patria nasledovné kroky transformácie: skladovanie surovín, príprava materiálu, reaktor, separácia, čistenie, uschovanie a predaj [1].

Zásobník je dôležitou súčasťou procesného systému, lebo práve on slúži na skladovanie krmív, plynov, kvapalín atď. Jednou z najpodstatnejších úloh zásobníka je skladovanie látok, ktoré sa používajú počas celého chemického procesu tak, že aj keď v prevádzke nastane porucha. Pevné látky a kvapaliny sa skladujú jednoducho, plyny už ťažšie. Relatívne malé množstvo plynu sa môže skladovať v plynnom stave pri teplote okolia v tlakových nádobách. Väčšie množstvo plynu v zásobníku vyžaduje, aby bol plyn skvapalnený. To možno dosiahnuť pomocou zníženia teploty, pomocou chladenia alebo zvýšenia tlaku či ich kombináciou. Množstvo skladovaného produktu bude závisieť od:

- frekvencie odosielania produktov
- veľkosti zásielok
- spoľahlivosti zásielok
- kapacity prevádzky
- fáz produktu (plyn, kvapalina alebo tuhá látka)
- nebezpečného charakteru produktu
- kapitálových a prevádzkových nákladov

- pracovného kapitálu zablokovaného v skladovanom produkte
- ekonomického prospechu, ktorý možno získať z kolísania predajnej ceny na trhu [11].

Suroviny nie vždy prichádzajú v pripravenom stave do reakčného stupňa. Niekedy pred reakciou treba odstrániť nečistoty, skvapalniť, odpariť, mlieť, vytriediť alebo pripraviť na určitú koncentráciu [1]. Pripravená surovina cestuje po rúrkach cez ventily a čerpadla do centra všetkého chemického procesu – reaktora. V cibulovom modeli podľa Smitha je reaktor stredom cibule, pretože tu dochádza k premene suroviny na produkt. Pri výbere reaktora: vsádzkový alebo kontinuálny, sa odvíjame od kinetiky, kapacity výroby a požiadaviek výrobnej praxe. Každá chemická prevádzka chce získať maximum zo suroviny a dosiahnuť, čo najväčšiu konverziu. Nezreagované látky sa oddeľujú, vracajú na začiatok a miešajú so surovinou.

Na oddeľovanie produktu, medziproduktu a recyklovateľných zložiek sa používajú separačné systémy. Separačné systémy sa delia podľa vlastnosti zmesi: mechanické separujú heterogénnu zmes a difúzne separujú homogénnu zmes [12].

Chemické prevádzky na prípravu produktov používajú veľké množstvo energie. Aby sa ušetrili náklady plánujú sa aj systémy výmeny a rekuperácie tepla.

Dostupné produkty a medziprodukty sú čistené tak, aby splňali špecifikácie produktu [1].

### 2.1.2 Alkylácia

Alkylačný proces je jedným z najdôležitejších rafinačných procesov na výrobu konvenčného motorového benzínu. Alkylácia ponúka rafinériám niekoľko kľúčových výhod, vrátane najvyššej priemernej kvality všetkých komponentov dostupných pre palivo, zvýšeného množstva benzínu na objem ropy a vysokých spaľovacích teplôt. Celkový proces je zložený z komplexných reakcií, a preto je potrebná dôsledná kontrola prevádzkových podmienok a katalyzátora, aby sa zabezpečili predvídateľné výsledky [10].

Alkylácia je exotermická reakcia, na ktorú sa, ako katalyzátor používa kyselina fluorovodíková alebo kyselina sírová. Reakcia s kyselinou sírovou je citlivá na teplotu. Vykonáva sa pri teplote pod 21 °C, aby sa minimalizovali oxidačné reakcie vedúce k tvorbe dechtov a oxidu siričitého. Pri katalýze kyselinou fluorovodíkovou sa alkylácia vykonáva obvykle pri teplote pod 38 °C. Práca s kyselinou fluorovodíkovou je toxická, a preto vyžaduje špeciálne pracovné podmienky. Reakčná doba je 10 – 40 minút, je nutné

vykonávať intenzívne miešanie, aby sa zabezpečil dobrý kontakt medzi kyselinovou a uhľovodíkovou fázou.

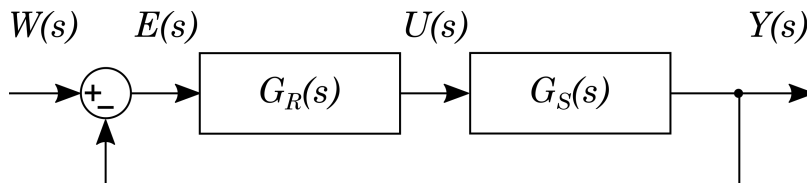
Čím je nižšia koncentrácia kyseliny tým nižšia je katalytická aktivita. Pri nižšej koncentrácii kyseliny prebiehajú nežiaduce polymerizačné reakcie. Koncentrácia kyseliny sírovej sa udržiava 93 – 95 % hm. 1 – 2 % hm. je voda a zvyšok uhľovodíky, koncentrácie kyseliny fluorovodíkovej obvykle medzi 83 a 92 % hm., vody je menej, ako 1 % hm. a zvyšok tvoria uhľovodíky. Tak, že, aby zmenšila možnosť polymerizácie alkénu izoalkán je v nadbytku, pomer izoalkánu ku alkénu v rozmedzí od 5:1 do 15:1.

Na výrobu benzínu sa alkyluje izobután, alkylácia izopentánu sa nevyužíva, pretože izopentán má dostatočne veľké oktánové číslo a dostatočne nízky tlak nasýtených pár, aby mohol byť vymiešaný priamo do benzínu. K alkylácii sa využívajú najmä butény (izobuten, 1-butén, 2-butén) a propén, v niektorých prípadoch aj pentény [4].

## 2.2 Návrh riadenia procesov

Pri prevádzkovaní chemicko-technologických procesov sa musia prísne dodržiavať technické podmienky. Na dosiahnutie požadovaných hodnôt v chemickom priemysle používajú merače a regulátory. Uzavretý regulačný obvod (URO) dovoľuje riadiť dynamické systémy na žiadané hodnoty. Jednoduchý URO obr.2.1 má v sebe Laplaceove obrazy signálov:

- $W(s)$  - žiadaná veličina
- $E(s)$  - regulačná odchýlka
- $U(s)$  - riadiaca veličina
- $Y(s)$  - skutočný výstup
- $G_S(s)$  - prenos riadeného systému
- $G_R(s)$  - prenos regulátora



Obr. 2.1: Zjednodušená bloková schéma URO

V URO ešte sú merací a akčný člen, ktoré kvôli zjednodušeniu sú zahrnuté do regulovaného procesu. Merací člen zisťuje hodnotu výstupnej veličiny, ktorú potom pošle do regulátora. Regulátor porovnaním žiadanej hodnoty a riadenej veličiny nájde regulačnú odchýlku a bude sa snažiť ju odstrániť. Aby priblížil odchýlku k nule regulátorom bude vygenerovaný akčný zásah pre riadený dynamický systém [9].

### 2.2.1 Umiestnenie pólov

Za predpokladu, že poznáme prenos riadeného systému, môžeme navrhnúť parametre regulátora analytickou metódou umiestnenia pólov. Použitie tejto metódy umožňuje nadiktovať charakteristickej rovnici uzavretého regulačného obvodu póly. Póly sú korene menovateľa prenosu, ktoré sú zodpovedné za stabilitu, periodicitu správania a rýchlosť odozvy systému [6].

Charakteristická rovnica uzavretého regulačného obvodu (CHR URO) má nasledovný tvar:

$$1 + G_R(s)G_S(s) = 0, \quad (2.1)$$

po úprave rovnice 2.1 dostaneme:

$$s^n + a_{n-1}s^{n+1} + \dots + a_1s + a_0 = 0, \quad (2.2)$$

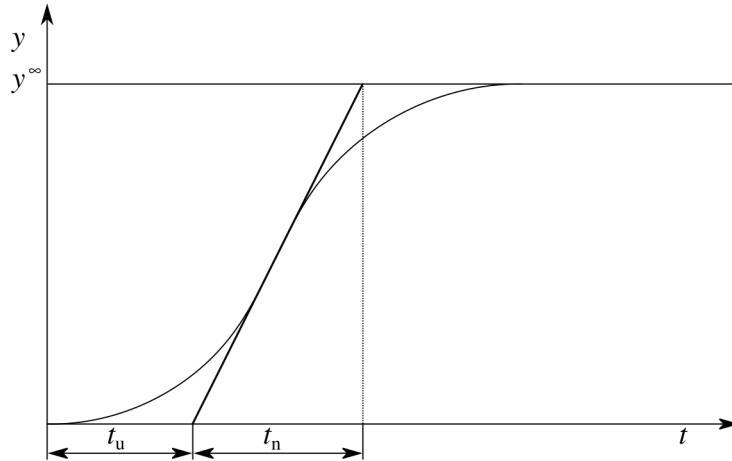
kde  $a_{n-1} \dots a_0$  vystupujú, ako neznáme parametre žiadaného regulátora.

### 2.2.2 Zieglerova-Nicholsova metóda

Tato metóda návrhu regulátorov je používaná už viac ako 50 rokov. Zieglerova-Nicholsova metóda - určuje parametre regulátora pomocou zosilnenia dynamického systému  $Z$ , času prietahu  $t_u$  a času nábehu  $t_n$ .

Na to, aby zistil tieto jednotlivé parametre, treba použiť nameranú prechodovú cha-

rakteristiku systému. Prechodová charakteristika - je grafické znázornenie odozvy na jednotkovú skokovú zmenu vstupnej veličiny pri nulových začiatočných podmienkach. K charakteristike treba priložiť priamku dotyčnicu v inflexnom bode, ktorá rozdelí časovú os na dva úseky: prvý - čas prietahu  $t_u$  a druhý - čas nábehu  $t_n$  obr.2.2 [7, 6].



**Obr. 2.2:** Všeobecná prechodová charakteristika

Zosilnenie systému dá sa vyjadriť pomocou vzťahu:

$$Z = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0}, \quad (2.3)$$

kde čitateľ je rozdiel výstupných hodnôt v čase 0 a ustálenom stave a menovateľ rozdiel vstupných hodnôt v čase 0 a po skokovej zmene. Metódu je možné aplikovať na systémy ktoré spĺňajú podmienku závislosti:

$$0,1 < \frac{t_u}{t_n} < 1 \quad (2.4)$$

Prenos PID regulátora pre Ziegler – Nicholsovú metódu má tvár:

$$G_R(s) = Z_R \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2.5)$$

Jednotlivé parametre regulátora možno vypočítať podľa tabuľky 2.1.

**Tabuľka 2.1:** Parametre pre rôzne regulátory Zieglerovou - Nicholsovou metódou [9]

Regulátor	$Z_R$	$T_I$	$T_D$
P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u}$		
PI	$\frac{0,9}{Z} \frac{t_n}{t_u}$	$3,33t_u$	
PID	$\frac{1,2}{Z} \frac{t_n}{t_u}$	$2t_u$	$0,5t_u$

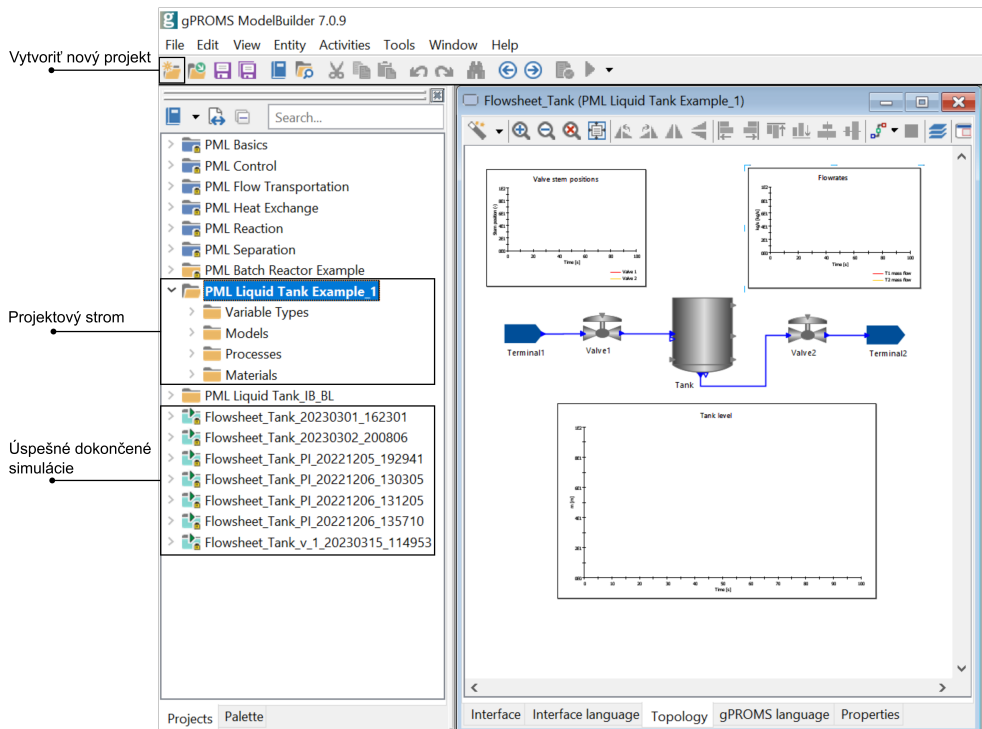
## 2.3 Program gPROMS ModelBuilder

V súčasnosti, aby sme v chemických prevádzkach, petrochémií, potravinárstve, farmácii a podobne mohli začať realizovať nejaký technický projekt, musíme ho na začiatku odsimulovať. Navrhované projekty prechádzajú fázami projektovania, modelovania objektov a procesov, kontroly bezpečnosti, výpočtu množstva zdrojov a optimalizácie procesov. Pri riešení takého množstva úloh zadaných užívateľovi môže pomôcť optimálne zvolené prostredie. Jedným z nich je gPROMS - general PROcess Modelling System. gPROMS ModelBuilder - multifunkčný modelovací a simulačný nástroj spoločnosti Siemens Process Systems Engineering Limited, (London, UK), ktorý umožňuje navrhovať model bez ohľadu na komplexnosť definovanej úlohy. Softvér dovoľuje projektovať a simulovať statické aj dynamické procesy, definovať integrálne, parciálne, diferenciálne a algebraické rovnice, riešiť akýkoľvek matematický model.

### 2.3.1 Tvorba modelu

Prvá vec, s ktorou každý používateľ gPROMSu začína, je uloženie a pomenovanie projektu. Tlačidlo v hornom ľavom rohu "Create a new project" - vytvorí projektový strom, v ktorom už sú nahrané priečinky. Priečinky "Entities" zahŕňajú potrebné objekty a premenné pre pohodlnú prácu obr.2.3. Preberieme niektoré z nich.

**Variable Types.** Všetky veličiny "Variables" vypočítané modelovými rovnicami - sú reálne čísla, ktoré program používa ako počiatočný odhad pre iteračne výpočty, pokiaľ nebude prepísaný alebo ak nie je lepší odhad z predchádzajúceho výpočtu. Môže obsahovať obmedzenia dolnou a hornou hranicou a jednotku merania pre lepšie



Obr. 2.3: Pracovná plocha gPROMSu

počítanie modelu.

**Models.** Model zahŕňa v sebe fyzické vlastnosti popísané matematickými rovnicami a graficky obraz spojenia (šípka) medzi prvkami. Nastavovanie funkcií umožňuje dialógové okno s tromi kartami:

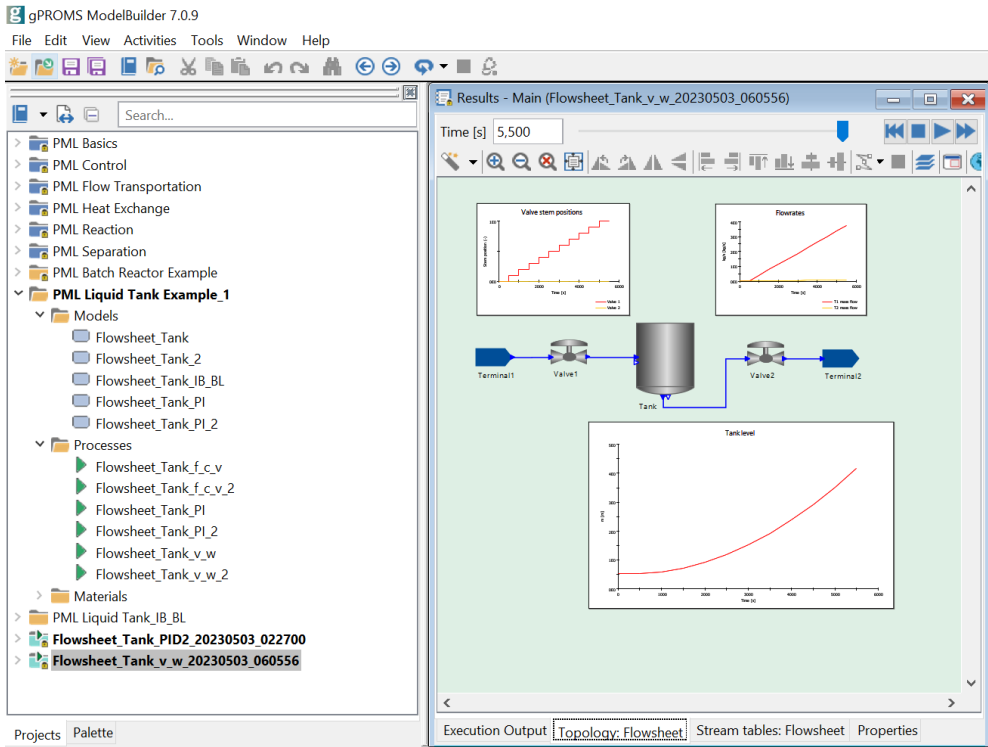
- Interface language: má v sebe obraz jednotlivých objektov a portov modelu zapojených do iných komponentov.
- Topology: grafická reprezentácia spojenia a polohy modelu. Nahrane v softvéri knižnice objektov pomáhajú pri vytváraní schém. Takže je možné pridať grafy a tabuľky s údajmi na pohodlné sledovanie procesu simulácie.
- gPROMS language: karta obsahujúca definované konštantné parametre (PARAMETER) popisujúce systém, ktoré nepodliehajú zmenám po výpočtoch; súbor premenných (VARIABLE) popisuje správanie systému v čase simulácie; sústavu rovníc (EQUATION) s definovanými predtým PARAMETER a VARIABLE v rovniach používame symbol “=” pre stanovenie rovnosti výrazov.

**Processes.** Pre odlišné správanie modelu je možné zdefinovať rôzne procesy, ktoré budú simulovať konkrétny prípad. Časti procesu majú v sebe:

- UNIT - názov modelu, pre ktorý simulácia spustí.
- SET - nastavuje hodnoty parametrov po pripojení schémy k simulácii, automaticky sa pridáva z TOPOLOGY pomocou operátora “:=”.
- ASSIGN - má špecifikované parametre, ktoré sú vstupnými hodnotami simulácii. Neznáme premene budú vyrátané systémom rovníc zostrojeným z fyzických parametrov objektov a musí obsahovať toľko rovníc, koľko máme neznámych.
- INITIAL - pre dynamické správanie definujeme hodnoty v čase  $t = 0$ . Informácie o počiatočných podmienkach je potrebné na výpočet diferenciálnych rovníc.
- SCHEDULE - jazykom gPROMS užívateľ môže nastaviť čas simulácie, zmeny hodnôt vstupných premenných a porúch.

Po skončení simulácií schéma ma zelené pozadie, ktoré hovorí o úspešne zabehnutej simulačnej aktivite obr.2.4. Výsledky nájdete pod stromom projektov, s názvom procesu a aktuálnym časom.





Obr. 2.4: Úspešná simulácia modelu

**Materials.** Do tohto priečinka môžem nahráť súbor, ktorý obsahuje informáciu o chemických a fyzických vlastnostiach látky alebo zmesi.

### 2.3.2 Doplnkové nástroje

gRMS (gPROMS Results Management Service) - aplikácia na vykresľovanie získaných výsledkov. Na začiatku simulácie treba začiarknuť "Poslať výsledky do gRMS", kde môžete spraviť 2D a 3D grafy. Spracované výsledky je možné vytlačiť, uložiť vo formáte .gRMS a vrátiť sa k nim neskôr, takže ako obrázok vo formátoch jpeg, png, bmp, emf, wmf.

PML (Process Model Library) - knižnica s často používanými procesnými jednotkami. Otvorený zdrojový kód uľahčuje proces skladania vlastnej schémy zo samostatných modelov. Zbierky modelov poskytujú ovládanie chemicko-inžinierskych procesov, mo-

deluje plynné, kvapalné a dvojfázové sústavy, reprezentuje hmotnostnú a energetickú bilanciu, bez ťažkostí sa dá spraviť priebeh rovnovážnych a kinetických reakcií [2].

Knižnica je rozdelená na 6 rôznych blokov modelov:

- Základné modely
- Riadenie
- Tok tekutín
- Výmena tepla
- Reakcie
- Separácia

IPPFO (Ideal Physical Properties Foreign Object) - knižnica s bežnými anorganickými a organickými látkami, ktorá umožňuje z jednoduchých zložiek vytvoriť materiál pre simulovaný model. Obsahuje fyzikálne vlastnosti ideálnych látok, a teda aj ich ideálneho zmiešavania [3].

Databázový súbor obsahuje tieto ideálne zlúčeniny:

acetaldehyd	etanol	m-xylén	phénol
acetón	etylacetát	n-bután	propán
acetylén	etylbenzén	n-butanol	propylén
amoniak	etylenglykol	n-decán	p-xylén
argón	chlorid uhličitý	n-heptán	sírovodík
benzén	chlorovodík	n-hexadecán	styrén
2-butanón	izopentán	n-hexán	sulfid uhličitý
but-1-én	kyselina octová	n-octán	toluén
cyklohexán	kyslík	n-pentán	trichlóretylén
cyklopentán	metán	n-propanol	vinylacetát
1,2-dichlóretán	metanol	oxid siričitý	voda
2,3-dimetylbután	metylacetát	oxid uhličitý	vodík
dusík	metylcyklohexán	oxid uhoľnatý	
etán	metylcyklopentán	o-xylén	

Multiflash - softvér firmy KBC Advanced Technologies Ltd., ktorý ponúka užívateľovi vhodné prostredie na tvorbu vlastných modelov látky. Pri simulácii model bude

uvažovať fyzikálne a termodynamické vlastnosti chemických látok alebo zmesi, čo spôsobí dôveryhodnejšie správanie sa modelu [5].



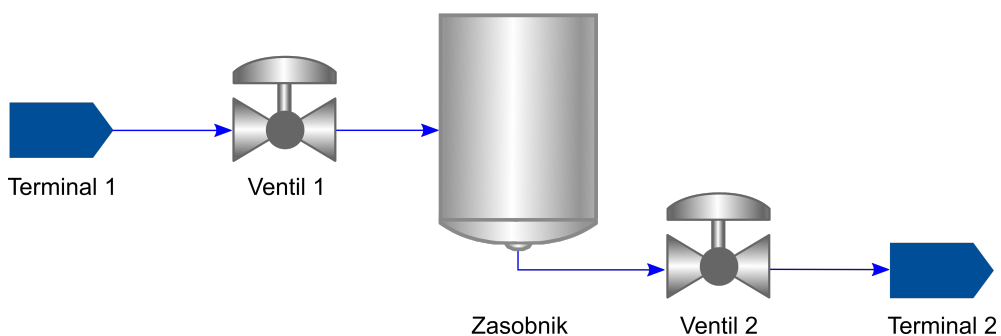
## Experimentálna časť

---

### 3.1 Vytvorenie modelu

#### 3.1.1 Zásobník kvapaliny

Jedným z cieľov práce bolo naučiť sa pracovať s programom gPROMS. PML knižnica s príkladmi modelov je vhodná na to, aby sme nadobudli skúsenosti v práci s modelom. Začali sme študovať s jednoduchého a na tento účel sme zvolili program s zásobníkom obr.3.1. Model pozostáva zo vstupu – Terminál 1, výstupu - Terminál 2, dvoch ventilov a nádrže. Ako materiál v programe je už predinštalovaná zmes metanolu a vody v pomere 1:1. Fyzické správanie metanolu a vody boli použité z knižnice IPPFO a teda obsahujú vlastnosti ideálnych látok. Materiál v parnej fáze vystupuje z Terminálu 1,

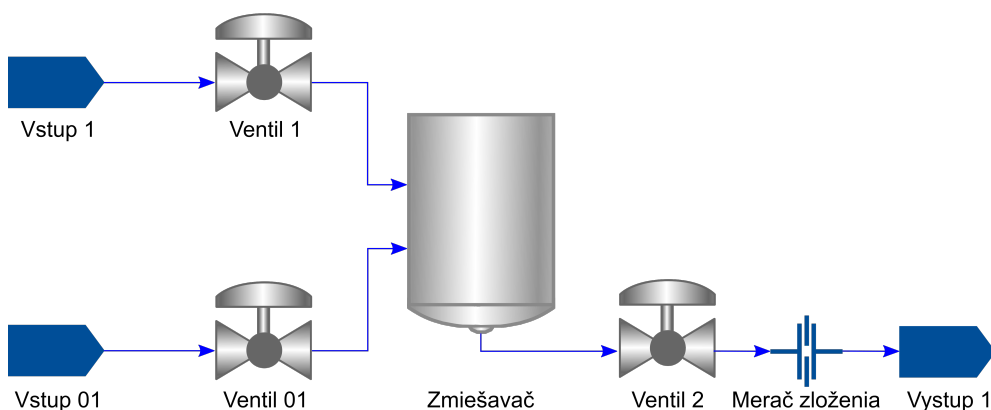


Obr. 3.1: Model zásobníka so zmesou metanolu a vody

prechádza cez Ventil 1, ide do Zásobníka, kde potom prechádza cez Ventil 2 a vstupuje do Terminálu 2. Prúdenie zmesi bez čerpadla bolo dosiahnuté kvôli tlakovému rozdielu. Zásobník má výšku 3 m a priemer 2 m.

### 3.1.2 Zmiešavač

Model zmiešavača bol vytvorený na základe modelu zásobníka. Zmiešavač má za úlohu zmiešať dva prúdy uhľovodíkov, ktoré potom používajú pri alkylácii. Zo Vstupu 1 prúdi izobután a Vstup 01 reprezentuje but-1-én obr.3.2. Obe látky prúdia v kvapalnom stave pri teplote 7 °C. Taká hodnota bola navrhnutá z dôvodu citlivosti reakcie na teplotu (viď. kap. 2.1.2). Izobután a but-1-én musia byť zmiešané v určitom pomere 6:1. Potrebné uhľovodíky boli mimo knižnice IPPFO, preto sme vytvorili izobután a but-1-én v softvéri Multiflash.



Obr. 3.2: Model zmiešavača so zmesou uhľovodíkov

## 3.2 Identifikácia prenosových funkcií

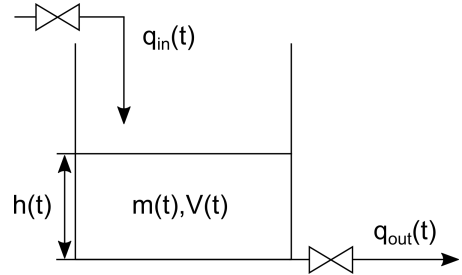
### 3.2.1 Zásobník kvapaliny

Aby v ďalej spraviť návrh riadenia procesu musíme identifikovať model. Na popis modelu použijeme matematický model dynamického systému. Dynamické modely väčšinou interpretujeme ako lineárne diferenciálne a diferenciálne rovnice, kde čas je nezávislou

premenou [9].

Stav sledovaného procesu obr.3.3 je popísaný procesnými veličinami:

- vstupné veličiny:  $q_{in}(t)$ ,  $q_{out}(t)$ ,
- výstupné veličiny:  $m(t)$ ,  $V(t)$ ,  $h(t)$ ,
- stavové veličiny:  $m(t)$ ,  $V(t)$ ,  $h(t)$ .



Obr. 3.3: Zásobník kvapaliny

Dynamický model spravíme pomocou materiálovej bilancie:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \dot{m}_{in}(t) - \dot{m}_{out}(t) \quad (3.1)$$

$$\frac{d\rho V(t)}{dt} = \rho q_{in}(t) - \rho q_{out}(t) \quad (3.2)$$

Rovnicu 3.2 vydelíme  $\rho$ , pretože celý systém má rovnakú hustotu. Objem  $V(t)$  môžeme nahradiť :

$$V(t) = h(t) \cdot A, \quad (3.3)$$

kde  $A$  - je plocha prierezu zásobníka.

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} [q_{in}(t) - q_{out}(t)] \quad (3.4)$$

$$v_1 q_{in} - v_2 q_{out} = k, \quad (3.5)$$

kde  $v_1$  a  $v_2$  zodpovedajú otvoreniu príslušných ventilov. Poloha Ventil 2 bude rovná  $v_2 = 0$ , preto:

$$k = v_1 \cdot q_{in} \quad (3.6)$$

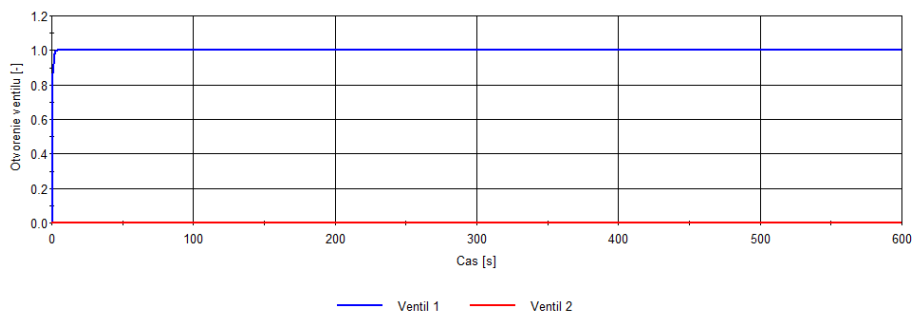
Dosadíme hranice integrálu:

$$\int_{h_0}^{h(t)} dh(t) = \int_0^t \frac{1}{A} k dt = \frac{k}{A} \int_0^t dt \quad (3.7)$$

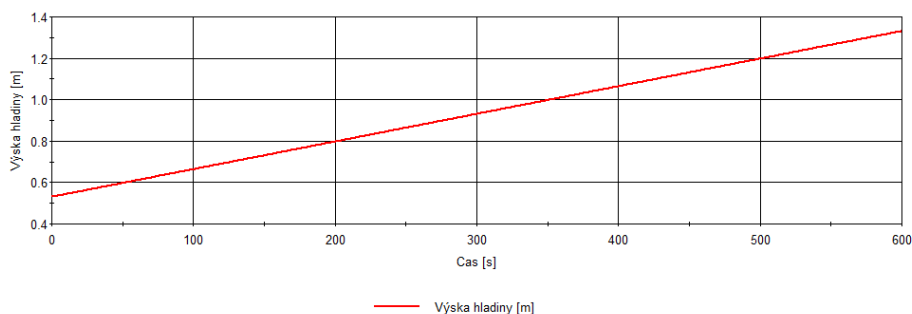
$$h(t) - h_0 = \frac{k}{A} t \quad (3.8)$$

$$h(t) = \frac{k}{A} t + h_0 \quad (3.9)$$

Ventil 1 budeme otvárať z 0 na 1 a Ventil 2 bude zatvorený. Po priebehu simulácii máme také výsledky.



**Obr. 3.4:** Jednotková skoková zmena



**Obr. 3.5:** Odozva systému na skokovú zmenu

Vidíme na obr.3.4 že ventil sa neotvori okamžite, pretože má vlastnú dynamiku. Z priebehu skokovej zmeny otvorenia ventilu obr.3.5 nájdeme naše  $A$ . Po spracovaní získaných dát v Exceli, rovnica 3.9 má taký tvar:

$$h(t) = 0,0013t + 0,5302 \quad (3.10)$$

Hodnotu  $k$  nájdeme pomocou prítoku. Hustota pre zmes metanol voda pri  $25^{\circ}\text{C}$  je  $892 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  :

$$q_{in} = \frac{\dot{m}_{in}}{\rho} = \frac{3,74}{892} = 0,0042 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (3.11)$$

Aby sme našli  $A$  treba hodnotou  $k$  vydeliť získanou smernicou :

$$A = \frac{1 \cdot 0,0042}{0,0013} = 3,23 \text{ m}^2 \quad (3.12)$$

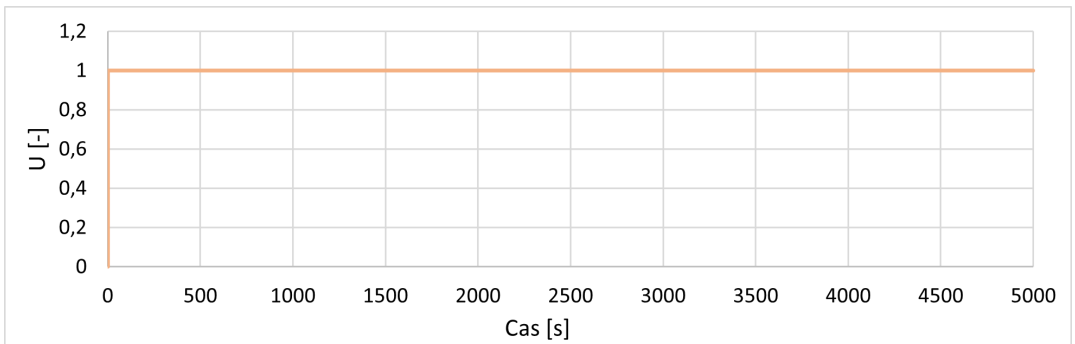


Prenos procesu bude:

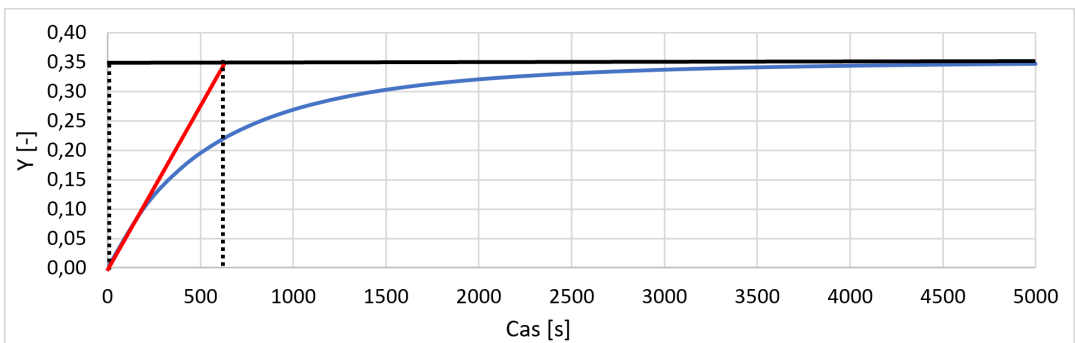
$$G(s) = \frac{1}{\frac{A}{k}s} = \frac{1}{769s} \quad (3.13)$$

### 3.2.2 Zmiešavač

Prenos pre zmiešavač nájdeme pomocou prechodovej charakteristiky. Počas simulácie Ventil 1 otvorí z 0,3 na 0,4 obr.3.2 . Pre zistené dáta spravíme normalizáciu tak, aby bola jednotková skoková zmena obr.3.6 a odozva systému začínala v nule. Po spracovaní máme normalizovanú prechodovú charakteristiku prvého rádu obr.3.7:



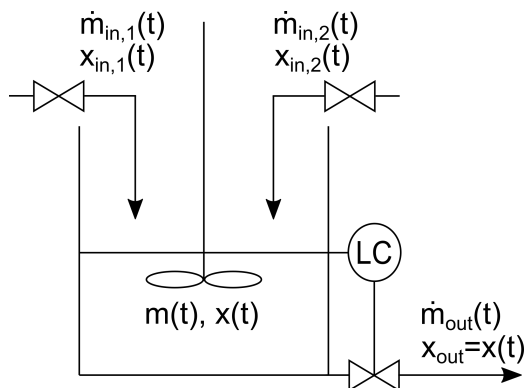
Obr. 3.6: Normalizovaná skoková zmena



Obr. 3.7: Normalizovaná PCH

Dynamický model procesu obr.3.8 odvodíme pomocou materiálovej bilancie. Rýchlosť akumulácie hmotnosti v systéme bude rovná rozdielu súčtu vstupujúcich tokov hmot-

nosti a súčtu vystupujúcich tokov hmotnosti.



Obr. 3.8: Zmiešavač

Materiálová bilancia systému:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t) - \dot{m}_{out}(t) \quad (3.14)$$

Materiálová bilancia zložky:

$$\frac{dx(t)m(t)}{dt} = x_{in,1}(t)\dot{m}_{in,1}(t) - x(t)\dot{m}_{out}(t) \quad (3.15)$$

$$m(t)\frac{dx(t)}{dt} + x(t)\frac{dm(t)}{dt} = x_{in,1}(t)\dot{m}_{in,1}(t) - x(t)\dot{m}_{out}(t) \quad (3.16)$$

Dosadíme rovnicu 3.14:

$$m(t)\frac{dx(t)}{dt} + x(t)[\dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t) - \dot{m}_{out}(t)] = x_{in,1}(t)\dot{m}_{in,1}(t) - x(t)\dot{m}_{out}(t) \quad (3.17)$$

$$m(t)\frac{dx(t)}{dt} = -x(t)[\dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t)] + x_{in,1}(t)\dot{m}_{in,1}(t) \quad (3.18)$$

$$\frac{m(t)}{\dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t)} \frac{dx(t)}{dt} = -x(t) + \frac{x_{in,1}(t)\dot{m}_{in,1}(t)}{\dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t)} \quad (3.19)$$

$$x_{in,1}(t)\dot{m}_{in,1}(t) = x_{in,1}(t)\rho q(t)v_1(t) \quad (3.20)$$

$$\frac{m(t)}{\dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t)} = T, \quad (3.21)$$

kde zlomok hmotnosti a hmotnostného prietoku má rozmer času a nazýva sa časová konštanta  $T$ . Zosilnenie je konštanta:

$$\frac{x_{in,1}(t)\rho q(t)}{\dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t)} = Z \quad (3.22)$$

$$\frac{v_1(t)}{\dot{m}_{in,1}(t) + \dot{m}_{in,2}(t)} = u(t) \quad (3.23)$$

$$T \frac{dx(t)}{dt} = -x(t) + Zu(t) \quad (3.24)$$

Popisujeme dynamický systém diferenciálnou rovnicou:

$$Ty'(t) = -y(t) + Zu(t) \quad (3.25)$$

Po Laplaceovej transformácii dostaneme:

$$(Ts + 1)Y(s) = ZU(s) \quad (3.26)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Z}{Ts + 1} \quad (3.27)$$

Pre systém prvého rádu môžeme použiť identifikáciu procesu ako systému prvého rádu [9]. Proces opisuje rovnica:

$$G(s) = \frac{Z}{Ts + 1} e^{-Ds} \quad (3.28)$$

$D$  - dopravné oneskorenie systému máme malé, preto ho zanedbáme.

Do rovnice 2.3 dosadíme hodnoty z prechodovej charakteristiky obr3.7 a nájdeme zosilnenie :

$$Z = \frac{0,35 - 0}{1 - 0} = 0,35 \quad (3.29)$$

Časová konštanta  $T$  - je čas , za ktorý výstup systému dosiahne 63 % od zosilnenia.

$$Z_{63} = 0,35 \cdot 0,63 = 0,22 \quad (3.30)$$

Podľa dát výstupnej hodnoty 0,22 zodpovedá čas 600 s.  $T = 600$  s. Prenos systému má tvár:

$$G(s) = \frac{0,35}{600s + 1} \quad (3.31)$$

### 3.3 Návrh PID regulátora

#### 3.3.1 Regulácia výšky hladiny

Pred nami stojí úloha navrhnuť taký regulátor, ktorý bude riadiť výšku hladiny v zásobníku na 1 m. Predpokladáme že prietok z Terminálu 1 nie je konštantný a preto pre regulátor akčná veličina bude prietok vytekajúci zo zásobníka. Zmenu prietoku zmesi spôsobí zmena otvorenia Ventilu 2.

Program gPROMS má model PID regulátora s proporcionálnou, integrálnou a derivačnou zložkou. Dovoľuje užívateľovi zvoliť vhodný pre neho typ regulátora, režim a druh riadenia. Pri riadení dynamického systému chceme odstrániť trvalú regulačnú odchýlku, preto zvolíme PI regulátor. V dialógovom okne musíme pridať číselne hodnoty hraníc vstupu a výstupu, zosilnenia, integračnej zložky a žiadanej veličiny.

Na určovanie proporcionálnej a integrálnej zložky použijem metódu umiestnenia pólov 2.2.1. Prenos systému:

$$G(s) = \frac{k}{As} \quad (3.32)$$

Pre zvolený PI regulátor prenos má tvar:

$$G_{PI}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R + \frac{Z_R}{T_I} \frac{1}{s} \quad (3.33)$$

Pomocou algebry prenosových funkcií odvodíme charakteristickú rovnicu URO:

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (3.34)$$

$$U(s) = G_{PI}(s)E(s) \quad (3.35)$$

$$E(s) = W(s) - Y(s) \quad (3.36)$$

$$Y(s) = G_{PI}(s)G(s)[W(s) - Y(s)] \quad (3.37)$$

$$Y(s) + G_{PI}(s)G(s)Y(s) = G_{PI}(s)G(s)W(s) \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} G_{URO}(s) &= \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{PI}(s)G(s)}{1 + G_{PI}(s)G(s)} = \frac{Z_R \frac{T_I s + 1}{T_I s} \frac{k}{As}}{1 + Z_R \frac{T_I s + 1}{T_I s} \frac{k}{As}} \\ &= \frac{\frac{kZ_R(T_I s + 1)}{T_I As^2}}{\frac{T_I As^2 + kZ_R(T_I s + 1)}{T_I As^2}} = \frac{kZ_R(T_I s + 1)}{T_I As^2 + kZ_R(T_I s + 1)} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Menovateľ prenosu určuje stabilitu systému. Aby systém bol stabilný a nekmitavý

všetky poly prenosu musia byť záporne a ležať mimo imaginárnej osi.

$$T_I A s^2 + k Z_R T_I s + k Z_R = 0 \quad (3.40)$$

Rovnicu 3.40 treba vydeliť  $T_I A$ , aby  $s^2$  zostala samostatne:

$$s^2 + \frac{k Z_R}{A} s + \frac{k Z_R}{T_I A} = 0 \quad (3.41)$$

Volba pólov závisí od koreňov riadeného systému. Ak menovateľ prirovnáme k nule, koreň bude rovný 0. To znamená že môžem zvoliť dvojnásobný koreň alebo dva rôzne korene, ktoré ležia vľavo od 0. Zvolíme dvojnásobný koreň  $s_{1,2} = -1$ , teda druhá charakteristická rovnica má tvar:

$$(s - s_{1,2})^2 = 0 \quad (3.42)$$

$$s^2 + 2s + 1 = 0 \quad (3.43)$$

Porovnáme dve charakteristické rovnice:

$$s^2 + \frac{k Z_R}{A} s + \frac{k Z_R}{T_I A} = s^2 + 2s + 1 \quad (3.44)$$

$$s^2 : 1 = 1 \quad (3.45)$$

$$s^1 : \frac{k Z_R}{A} = 2 \Rightarrow Z_R = \frac{2A}{k} \quad (3.46)$$

$$s^0 : \frac{k Z_R}{T_I A} = 1 \Rightarrow T_I = 2 \quad (3.47)$$

Zistíme proporcionálnu a integračnú zložku vymeníme za  $k$  a  $A$  číselne hodnoty:

$$Z_R = \frac{2 \cdot 3,23}{0,0042} = 1538 \quad (3.48)$$

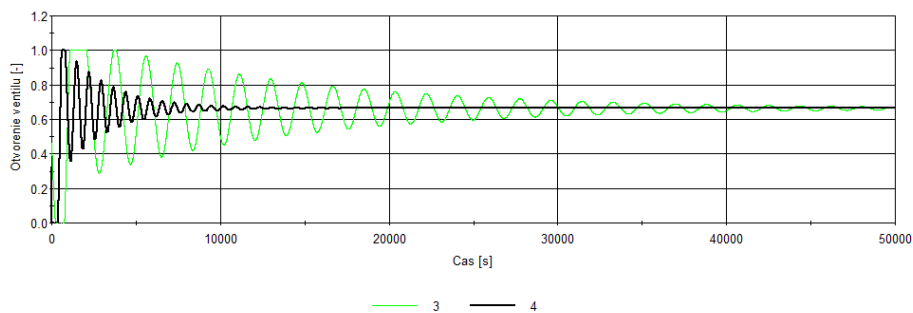
Do gPROMS sme dávame reset time (RT):

$$RT = \frac{1}{\frac{Z_R}{T_I}} = \frac{T_I}{Z_R} = \frac{2}{1538} = 0,0013 \quad (3.49)$$

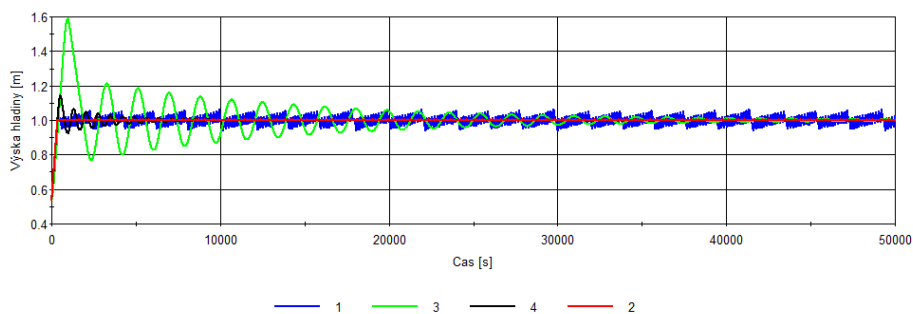
Žiadaná hodnota výšky hladiny rovná sa 1 m.

Takým prístupom boli vyrátané tri PI regulátory pre rôzne poly  $s_{1,2}$  a navrhnutý jeden regulátor s vlastnými parametrami. Priebehy 1 a 2 neboli zhrnuté do obrázku 3.9, pretože neustále kmitajú. Výsledky riadenia znázornene na obrázku 3.10 a parametre

zhrnuté v tabuľke 3.1.



**Obr. 3.9:** Priebeh riadiacej veličiny



**Obr. 3.10:** Riadenie výšky hladiny rôznymi PI regulátormi

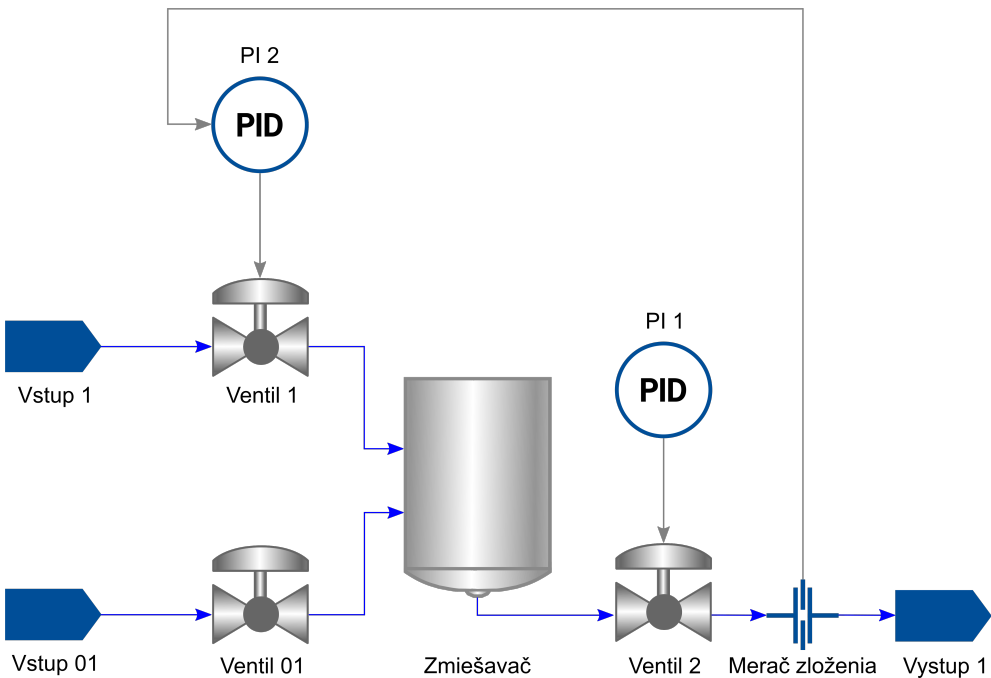
**Tabuľka 3.1:** Parametre pre rôzne PI regulátory metódou umiestnenia pólov

Regulátor	$Z_R$	$RT$	komentár
1	153	0,13	$s_{1,2} = -0,1$
2	1538	0,0013	$s_{1,2} = -1$
3	15	13	$s_{1,2} = -0,01$
4	75	13	vlastné hodnoty

Na obrázku 3.10 priebeh 1 má regulovanú veličinu kmitavú, pretože veľké zosilnenie znižuje stabilitu. Regulátor 2 reaguje rýchlo, kvôli vysokému zosilneniu a malej integračnej konštante. Preto musíme zvýšiť hodnotu  $T_{URO}$ . Regulátor 3 má veľké maximálne preregulovanie a dlhý čas regulácie. V regulátory 4 zvýšenie zosilnenia zmenšilo kmitanie, riadenie prechádza z menším maximálnym preregulovaním a má menší čas regulácie, čo robí ho lepším regulátorom oproti ostatným. V ďalšej podkapitole 3.3.2 ako PI 1 budem používať hodnoty regulátora 4.

### 3.3.2 Regulácia koncentrácie

Ku našej schéme zmiešavača pridáme 2 objekty merač zloženia a regulátor PI 2 obr.3.11. Model snímača ktorý má gPROMS môže merať hmotnostný alebo molový zlomok a koncentráciu. Naš merač bude registrovať a posielat regulátoru skutočný hmotnostný zlomok zmesi vystupujúcej zo zmiešavača.



Obr. 3.11: Schéma regulácie koncentrácie

Pre návrh regulátora riadiaceho koncentráciu budem používať Zieglerovu – Nicholsovú metódu. Na zistenie parametrov regulátora treba použiť prechodovú charakteristiku.

Preloženie dotyčnice ku priebehu na obrázku 3.7 boli vyrátané čas prietahu  $t_u = 3$  a čas nábehu  $t_n = 600$ . Zosilnenie máme vyrátané v rovnici 3.29. Ak máme všetky potrebné číselne hodnoty môžeme určiť parametre  $Z_R$  a  $T_I$  pre PI regulátor podľa tabuľky 2.1:

$$Z_R = \frac{0,9}{0,35} \frac{600}{3} = 514 \quad (3.50)$$

$$T_I = 3,33 \cdot 3 \approx 10 \quad (3.51)$$

Pre PI 2 hmotnostný zlomok izobutánu bude žiadanou veličinou a rovná 0,86.

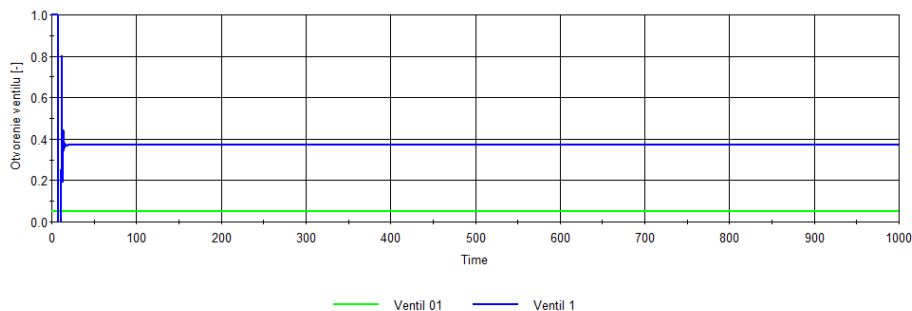
$$m_{zmes} = m_i + m_b = 6j + j = 7j, \quad (3.52)$$

kde  $j$  - reprezentuje hmotnosť jednotkového objemu zmesi uhľovodíkov, indexy  $i$  - isobután a  $b$  - but-1-én.

$$w_i = \frac{m_i}{m_{zmes}} = \frac{6j}{7j} = 0,857 \approx 0,86 \quad (3.53)$$

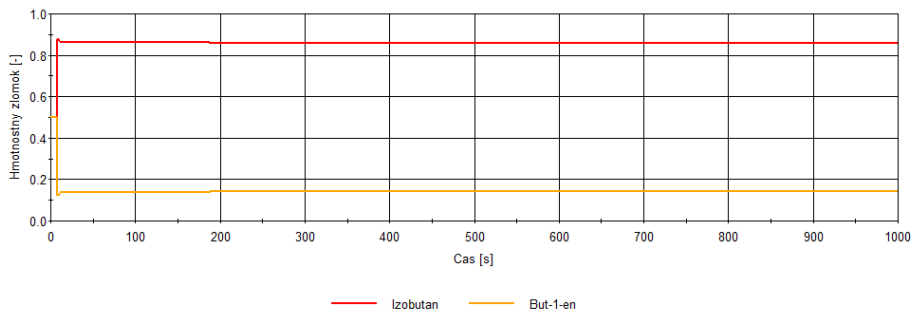
$$w_b = 1 - w_i = 1 - 0,86 = 0,14 \quad (3.54)$$

Tak že pridáme zosilnenie regulátora a časovú konštantu.



**Obr. 3.12:** Priebehy otvorenia ventilov





**Obr. 3.13:** Koncentrácie uhľovodíkov po regulácií

S návrhom regulátora sa podarilo okamžite dosiahnuť žiadanú hodnotu koncentrácie izobutánu, riadiaca veličina má hodnotu 0,37 obr.3.12. Systém je stabilný a ustálený počas celej simulácie. obr.3.13. Vysoké zosilnenie pomáha systému rýchlo sa dostávať na žiadanú koncentráciu a znižuje čas regulácie. Prítomnosť integračnej zložky odstránila trvalú regulačnú odchýlku a vďaka nízkej číselnej hodnote nedochádza k osciláciám výstupu.



Cielom bakalárskej práce bolo zoznámenie sa s prostredím gPROMS ModelBuilder, modelovanie vybraných chemicko-technologických procesov zásobníka kvapaliny a zmiešavača, hľadanie vhodného regulátora na riadenie výšky hladiny a koncentrácie. Na začiatku práce venovali sme pozornosť chemicko-technologickým procesom na chemickej prevádzke a jej základným princípom. Zaoberali sme sa procesom alkylácie, opísali sme metódy návrhu regulátorov a prebrali sme základne informácie o softvéri gPROMS jeho možnostiach a doplnkových nástrojoch. V kapitole 3 sme sa venovali práci s jednoduchým zásobníkom kvapaliny a zmiešavačom uhľovodíkov. Matematické modely boli spravené na základe materiálovej bilancie systému. Pre riadenie výšky hladiny a koncentráciu sme použili PI regulátor, aby integračná zložka odstránila trvalú regulačnú odchýlku. Na návrh parametrov regulátora PI 1 bola implementovaná metóda umiestnenia pólov a predložené 3 regulátory tak, že bol predložený regulátor z vlastnými parametrami a pri porovnaní správania riadenej veličiny sme pozorovali, že regulátor z vlastnými parametrami je rýchlejší a má menšie maximálne prerogulovanie. Parametre pre PI 2 hľadali Zieglerovou-Nikolsovou metódou, kde systém nadobúdal žiadanú koncentráciu rýchlo a aperiodický. Ďalším pokrokom v tejto práci by bolo pridanie do modelu zmiešavača, kde by bol zostavený model chemického reaktora, v ktorom by prebiehala alkylácia. Venovali by sme sa entalpickej bilancii. Reakcia je citlivá na teplotu, a z toho dôvodu je potrebný odvod tepla, aby bola dosiahnutá vysoká miera konverzie.



# Literatúra

- [1] R. Sinnott. G. Towler. *Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. CHEMICAL ENGINEERING DESIGN, 2008. ISBN 978-0-7506-8423-1. URL <https://chemicalprojects.wordpress.com/2013/12/15/the-anatomy-of-a-chemical-manufacturing-process/>.
- [2] gProms Process Systems enterprise Ltd. gproms modelbuilder documentation. 1997-2021. URL [www.psenterprise.com/products/gproms/modelbuilder](http://www.psenterprise.com/products/gproms/modelbuilder).
- [3] gProms Process Systems enterprise Ltd. Ippfo - ideal physical properties foreign object. page 51, 2018. URL [www.psenterprise.com/products/gproms/modelbuilder](http://www.psenterprise.com/products/gproms/modelbuilder).
- [4] V. Rábl. J. Blažek. *Základy zpracování a využití ropy*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, Česká republika, 2 edition, 2006. ISBN 80-7080-619-2.
- [5] KBC Advanced Technologies Ltd. Multiflash. 2023. URL <https://www.kbc.global/process-optimization/technology/simulation-software/multiflash-simulation-software/>.
- [6] L. Čirka. M. Bakošová, M. Fikar. *Základy automatizácie*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava, Slovenská republika, 2003. ISBN 80-227-1831-9. URL <https://www.uiam.sk/lcza/common/zad/lcza.pdf>.
- [7] M. Fikar. M. Bakošová. *Riadenie procesov*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava, Slovenská republika, 2 edition, 2012. ISBN 978-80-227-3763-0.
- [8] J. Markoš. M. Mihaľ. *Matematické a experimentálne modelovanie hybridných reaktívne - separačných procesov*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013. ISBN 978-80-89597-14-7.

- [9] J. Oravec. *Tvorba programového systému pre syntézu regulátorov: diplomová práca*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava, Slovenská republika, 2010. ISBN FCHPT-5414-26399. URL <https://www.uiam.sk/assets/fileAccess.php?id=968&type=1>.
- [10] M.K. Rich. *On-Line Optimization , Energy Analysis and Environmental Impact Assessment of Sulfuric Acid Catalyzed Alkylation Process*. New Orleans, USA, 2003. URL <https://www.lsu.edu/mpri/files/on-lineopt.pdf>.
- [11] R. Smith. *Chemical Process Design and Integration*. Centre for Process Integration, School of Chemical Engineering and Analytical Science, University of Manchester, 2005. ISBN 0-471-48681-7.
- [12] T. Soták, B. Horváth, D. Gašparovičová, and M. Kralík. *Praktikum z chemickej technológie*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2022. ISBN 978-80-8208-078-3.