

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE

Katedra informatizácie a riadenia procesov



SEMESTRÁLNY PROJEKT

Návrh riadenia destilačnej kolóny

Vypracoval

Peter Blaňár

Vedúca projektu

Ing. [Anna Vasičkaninová](#)

Bratislava 2004

Pod'akovanie:

Chcem sa poďakovať vedúcej môjho semestrálneho projektu, Ing. Anne Vasičkaninovej, za odborné rady a cenné informácie, ktoré mi poskytovala pri vypracovávaní tohto semestrálneho projektu.

Ďakujem

Obsah

1. Úvod	4
2. Použité skratky.....	5
3. Teoretická časť.....	6
3.1. Základné pojmy	6
3.2. Dopravné oneskorenie	8
3.3. Identifikácia	9
3.4. Kvalita regulácie	10
3.5. Metódy návrhu parametrov regulátora	12
3.5.1. Ziegler-Nicholsova metóda	12
3.5.2. Cohen-Coonova metóda	13
3.5.3. Haalmanova metóda	14
3.5.4. Chienova, Hronesova a Reswickova metóda	15
3.5.5. Smithova, Murrillova metóda	15
3.5.6. Äströмова metóda	16
3.5.7. Metóda priamej syntézy spoužitím aproximovaného modelu ...	18
3.5.8. Internal Model Control (IMC)	18
4. Experimentálna časť	21
4.1. Popis etážovej rektifikačnej kolóny	21
4.2. Odvodenie matematického modelu etážovej rektifikačnej kolóny	23
4.3. Simulácia prechodovej charakteristiky a identifikácia systému ...	28
4.4. Blokové schémy používané pri simuláciách	31
4.5. Návrh regulátora a riadenie rektifikačnej kolóny	32
4.5.1. Navrh regulátora pomocou metódy priamej syntézy	32
4.5.2. Návrh regulátora Äströmovou metódou	33
4.5.3. Návrh regulátora pomocou metódy Chien, Hrones, Reswick ...	34
4.5.4. Návrh regulátora pomocou metódy Smith-Murrill	35
4.5.5. Návrh regulátora pomocou Haalmanovej metódy	36

4.5.6.	Návrh regulátora metódou Internal Model Control	37
5.	Záver	39
6.	Literatúra	40
7.	Príloha	41
7.1.	S-funkcia pre simuláciu PCH	41
7.2.	Výpis programu pre výpočet parametrov regulátorov jednotlivými metódami	42
7.3.	Výpočet parametrov regulátora Āstömovou metódou	43
7.4.	Grafy	43
7.4.1.	Riadenie systému s použitím jednotlivých metód	44
7.4.2.	Riadenie systému pre metódu priamej syntézy pre rôzne T_{RO}	45
7.4.3.	Riadenie systému metódou IMC	46

1. Úvod

Tento projekt je zameraný na návrh riadenia etážovej rektifikačnej kolóny pre delenie binárnej zmesi etanol-voda.

Rektifikácia je nelineárny proces, preto riadenie kolóny prináša so sebou veľa zložitých problémov. Pri riadení na žiadanú hodnotu sa koncentrácia produktu udržiava v požadovanom rozsahu.

Podľa zadaných parametrov bol v Matlabe vytvorený program na výpočet ustáleného stavu kolóny. Parametre kolóny a hodnoty ustáleného stavu sa použili pri vytvorení modelu kolóny v Simulinku. Pomocou modelu kolóny bola urobená identifikácia kolóny ako sústavy prvého rádu s dopravným oneskorením. Identifikované parametre časová konštanta T , zosilnenie Z a dopravné oneskorenie D boli použité pri návrhu regulátorov podľa rôznych experimentálnych metód, uvedených v [1], [4], [5]: Haalmanova metóda, metóda Chien, Hrones a Reswick (s preregulovaním 0% a 20%), Smithova a Murrillova metóda, Åstömova metóda, Internal model control (IMC).

2. Použité skratky

- URO - uzavretý regulačný obvod
- Metóda HA - Haalmanova metóda
- Metóda CHHR - Chienova, Hronesova a Reswickova metóda
- Metóda SM - Smithova a Murrilova metóda
- Metóda PS - Metóda priamej syntezy spoužitim aproximovaného modelu
- Metóda IMC - Metóda Internal Model Control
- iae - Integrálna absolutná chyba
- ise - Integrálna kvadratická chyba
- D - Dopravné oneskorenie
- Z - Zosilnenie
- T - Časová konštanta

3. Teoretická časť

3.1. Základné pojmy

- **Riadenie**

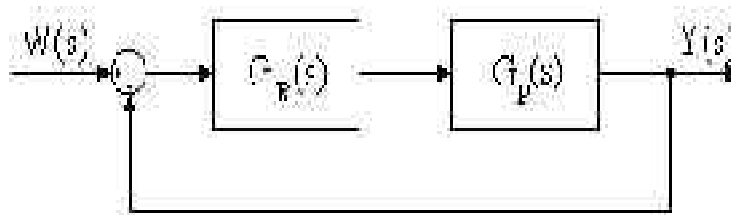
Proces zabezpečenia vopred predpísaných cieľov na základe hodnotenia a spracovania informácií, ktoré riadiaci člen dostáva o objekte riadenia, ako aj o vplyvoch okolia na tento objekt.

- **Regulácia**

Je špeciálny prípad riadenia, ktorého cieľom je udržiavanie objektu regulácie na vopred predpísanom stave, pričom sa v priebehu regulácie priebežne zisťuje skutočný stav objektu a porovnáva sa so stavom predpísaným.

- **Uzavretý regulačný obvod (URO)**

Je obvod, ktorý pri riadení obsahuje spätnú väzbu (obr. 1).



Obr.1 Schéma uzavretého regulačného obvodu

- **Proporcionálno-integračný regulátor (PI regulátor) [1]**

PI regulátor pozostáva zdvoch členov:

- proporcionálneho člena, ktorý generuje akčnú veličinu, ktorá je priamo úmerná regulačnej odchýlke. Nevýhodou je, že zanecháva trvalú regulačnú odchýlku. Naopak, druhý člen

- integračný, zaručuje odstránenie takejto odchýlky.

Takýto regulátor je opísaný rovnicou

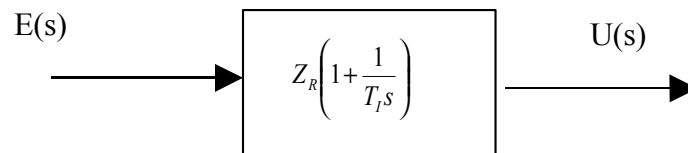
$$u(t) = Z_R \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) d\tau \right)$$

a jeho prenosová funkcia je

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} \right)$$

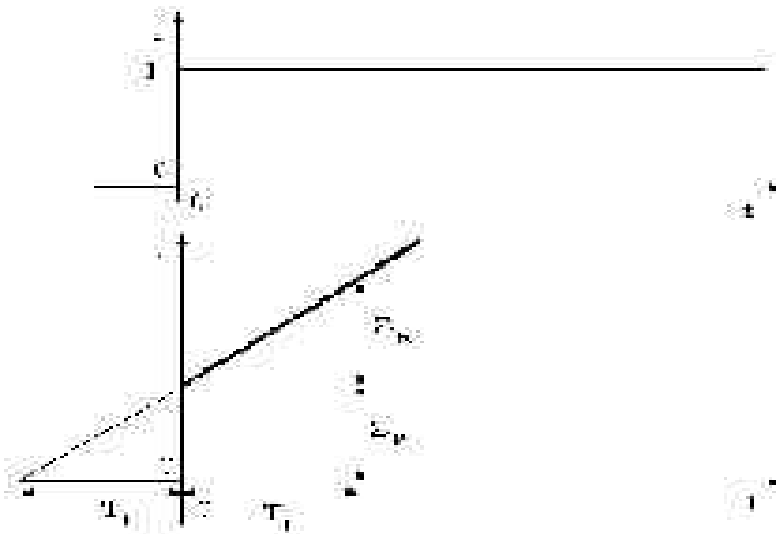
kde Z_R je zosilnenie, T_I je integračná časová konštanta.

Bloková schéma PI regulátora je znázornená na obr. 2



Obr.2 Bloková schéma PI regulátora

Na obr. 3 je znázornená prechodová charakteristika PI regulátora.



Obr.3 Prechodová charakteristika PI regulátora

3.2. Dopravné oneskorenie [1]

Dopravné oneskorenie je charakteristické pre mnohé chemické zariadenia. Môže byť spôsobené:

- tokom látky a energie
- oneskorením akčných členov, atď..

Regulácia systému s dopravným oneskorením jednoduchým spätnoväzbovým obvodom sa zhoršuje tým, že účinok riadiacich veličín sa prejavuje až po uplynutí doby dopravného oneskorenia. Príkladom môže byť zahrievanie špirály v žehličke. Preto môže byť dopravné oneskorenie hlavnou príčinou nestability regulačného obvodu.

3.3. Identifikácia [2]

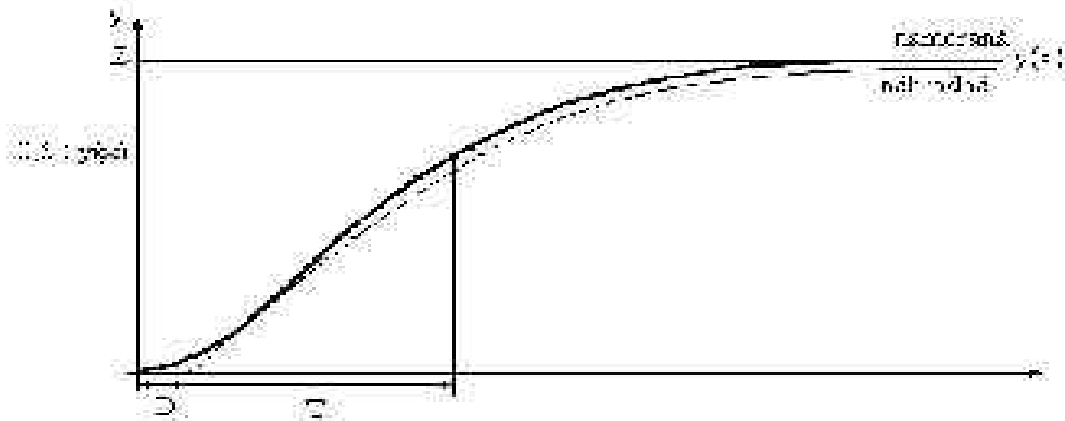
Uvažujeme náhradu modelu systému prenosom prvého rádu s dopravným oneskorením

$$G(s) = \frac{Z}{T \cdot s + 1} e^{-D \cdot s}$$

kde Z je zosilnenie, T je časová konštanta a D dopravné oneskorenie systému, ktoré potrebujeme určiť. Časová forma tejto rovnice pre výstup $y(t)$ sa dá získať pomocou spätnej Laplaceovej transformácie a je daná vzťahom

$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < D \\ Z \left(1 - e^{-\frac{t-D}{T}} \right) & t \geq D \end{cases}$$

Na obr. 4 je znázornený postup určovania parametrov Z , D , T . Zosilnenie systému je dané ako ustálená hodnota výstupnej veličiny v čase $t \rightarrow \infty$, $Z = y(\infty)$, ak skoková zmena na vstupe má jednotkovú veľkosť.



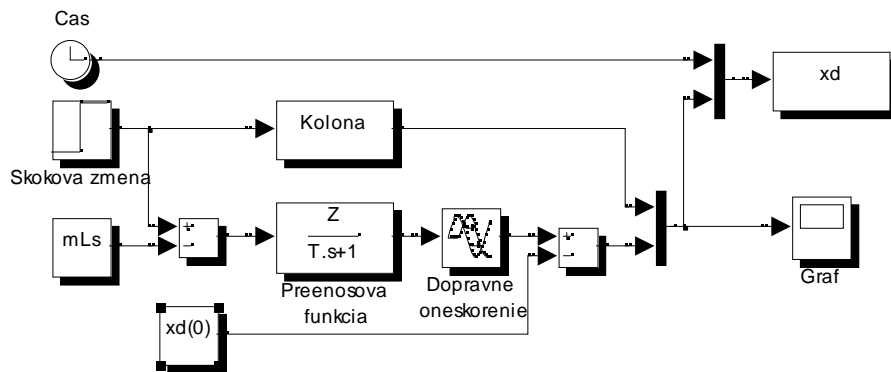
Obr.4 Nameraná a náhradná prechodová charakteristika systému prvého rádu

Ak skoková zmena nie je jednotková, potom zosilnenie môžeme vypočítať zo vzťahu:

$$Z = \frac{y(-) - y(0)}{u(-) - u(0)}$$

Hodnota T sa dá približne odčítať z prechodovej charakteristiky ako čas, za ktorý dosiahne výstupná veličina 63% svojej ustálenej hodnoty, ako je to naznačené na obr. 4.

Dopravné oneskorenie sa dá tiež odčítať z prechodovej charakteristiky. Je to čas, za ktorý sa počiatočná hodnota nemení, alebo sa mení len málo.



Obr.5 Schéma používaná na identifikáciu

3.4. Kvalita regulácie [7]

Kvalita riadenia sa dá posúdiť pomocou ukazovateľov kvality regulácie (obr. 6):

1. Trvalá regulačná odchýlka je rozdiel konštantnej žiadanej a výstupnej veličiny procesu v čase $t = \infty$.

$$e(t) = w(t) - y(t)$$

Trvalá odchýlka vznikne vtedy, ak v spätnej väzbe použijeme na riadenie procesu P - regulátor. Integrovaná zložka zabezpečí odstránenie TRO riadenia.

2. Čas regulácie (T_{reg}) - čas, od ktorého sa riadená veličina dostane do $\pm 5\%$ -okolía žiadanej veličiny.
3. Maximálne preregulovanie (σ_{max}) - sa udáva ako:

-
$$\sigma_{max} [\%] = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\% , \text{ ak } y(0) = 0$$

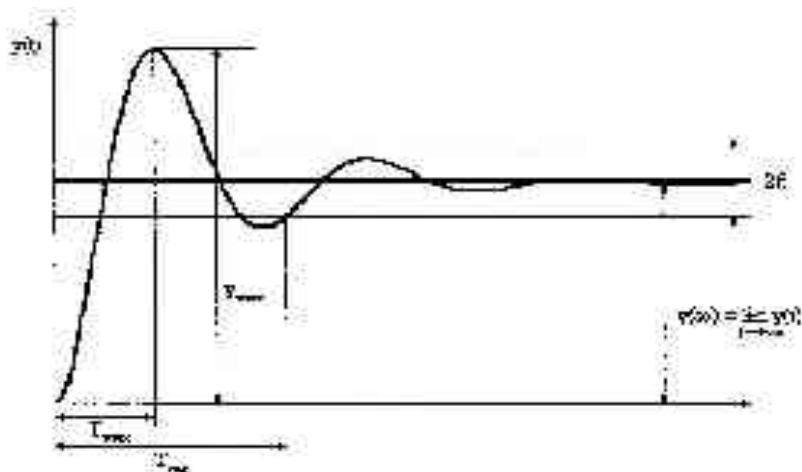
-
$$\sigma_{max} [\%] = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(-) - y(0)} \cdot 100\% , \text{ ak } y(0) \neq 0.$$

4. Čas maximálneho preregulovania (T_{max}) - čas, v ktorom nastane maximálne preregulovanie.
5. Integrálne kritéria kvality - kvalita automatického riadenia sa najčastejšie posudzuje podľa
 - integrálu absolútnej odchýlky riadenia (I_{iae})

$$I_{iae} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

- integrálu kvadratickej odchýlky riadenia

$$I_{ise} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$



Obr.6 Prechodová charakteristika URO

3.5. Metódy návrhu parametrov regulátora [1], [4], [5]

Keďže regulovaná sústava bola identifikovaná ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením, boli vybrané metódy návrhu regulátorov, uvedené nasledujúcich statiach.

3.5.1. Ziegler – Nicholsova metóda

Metóda Ziegler – Nichols je populárna a často používaná metóda návrhu regulátora. Ak máme k dispozícii z nameranej prechodovej charakteristiky Z , D a T , potom podľa Zieglera a Nicholsova parametre PID regulátora môžeme vypočítať podľa vzorcov uvedených v tab. 1.

Regulátor	Z_R	T_I
P	$\frac{T}{D.Z}$	
PI	$0,9 \cdot \frac{T}{D.Z}$	$3D$

Tab. 1 Parametre regulátora pre Ziegler- Nicholsovu metódu

3.5.2. Cohen-Coonova metóda

Z prechodovej charakteristiky sú určené konštanty Z, T a D. Potom parametre regulátora vypočítame podľa tab. 2.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{T}{Z.D} \cdot \left[1 + \frac{D}{3T} \right]$		
PI	$\frac{T}{Z.D} \cdot \left[0,9 + \frac{D}{12.T} \right]$	$D \cdot \left[\begin{array}{l} 30 + \frac{3.D}{T} \\ 9 + \frac{20.D}{T} \end{array} \right]$	
PID	$\frac{T}{Z.D} \cdot \left[\frac{4}{3} + \frac{D}{4T} \right]$	$D \cdot \left[\begin{array}{l} 32 + \frac{6.D}{T} \\ 13 + \frac{8.D}{T} \end{array} \right]$	$D \cdot \left[\begin{array}{l} 4 \\ 11 + \frac{2.D}{T} \end{array} \right]$

Tab. 2 Parametre regulátora pre Cohen-Coonovu metódu

3.5.3. Haalmanova metóda (HA)

Haalmanová metóda udáva ďalší možný prístup ako určiť ideálnu prenosovú funkciu slučky G_1 a vybrať prenosovú funkciu regulátora ako

$$G_R = \frac{G_1}{G_P}$$

kde G_P je prenosová funkcia procesu, G je prenos systému bez spätnej väzby.

Pre systém s dopravným oneskorením D Haalman navrhuje vybrať

$$G_1 = \frac{2}{3.D.s} \cdot e^{-D.s}$$

Hodnota 2/3 bola zvolená, aby minimalizovala strednú kvadratickú chybu.

Keď použijeme Haalmanovu metódu pri procesoch s prenosovou funkciou

$$G(s) = \frac{Z}{1+s.T} \cdot e^{-D.s}$$

regulátor má prenos

$$G_R(s) = \frac{2.(1+T.s)}{3.D.s} = \frac{2.T}{3.D} \cdot \left(1 + 1 \frac{1}{T.s} \right)$$

Potom sa parametre regulátora dajú vyjadriť (tab. 3)

Regulátor	ZR	TI
PI	$\frac{2.T}{3.D}$	T

Tab. 3 Parametre PI regulátora pre Haalmanovu metódu

3.5.4. Chien, Hrones a Reswickova metóda (CHHR)

Chien, Hrones a Reswick vychádzali z ZN metódy, ale chceli dosiahnuť lepšie tlenie v regulačnom obvode. Ako návrhové kritériá použili „najrýchlejšiu odozvu bez preregulovania“ a „najrýchlejšiu odozvu s 20%-ným preregulovaním“. Parametre regulátora pre Chien, Hrones a Reswicka môžeme vypočítať z tab. 4.

Preregulovanie Regulátor	0%			20%		
	ZR	TI	TD	ZR	TI	TD
P	$0,3 \cdot \frac{T}{Z.D}$			$0,7 \cdot \frac{T}{Z.D}$		
PI	$0,35 \cdot \frac{T}{Z.D}$	$1,2.T$		$0,6 \cdot \frac{T}{Z.D}$	T	
PID	$0,6 \cdot \frac{T}{Z.D}$	T	$0,5.D$	$0,95 \cdot \frac{T}{Z.D}$	$1,4.T$	$0,47.D$

Tab.4 Parametre regulátora pre Chien, Hrones a Reswickovu metódu

3.5.5. Smithova, Murrillova metóda (SM)

Smith, Murrill a spol. navrhli parametre regulátora tak, aby minimalizovali integrálne kritéria iae a ise . Vzťahy vychádzajú zo zmeny žiadanej hodnoty alebo poruchy.

Podmienka pre kritériá:

$$0,1 < \frac{D}{T} < 1$$

Vidíme, že pomer dopravného oneskorenia (D) a časovej konštanty (T) je veľmi dôležitý pri hľadaní parametrov regulátora.

Parametre pre PI regulátor sú uvedené tab. 5.

Regulátor	Z_R	T_I
PI	$\frac{0,586}{Z} \cdot \left \frac{T}{D} \right ^{0,916}$	$\frac{T}{\left 1,03 - 0,165 \cdot \frac{T}{D} \right }$

Tab. 5 Parametre regulátora pre Smithovu, Murrillovu metódu

3.5.6. Åströмова metóda (A)

Åström vychádzal zo zákona riadenia tvare:

$$u(t) = Z_R \cdot \left[b \cdot w(t) - y(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \right]$$

Identifikáciou získame nahradný prenos

$$G(s) = \frac{Z}{T \cdot s + 1} e^{-D \cdot s}$$

Spracovaním prechodovej charakteristiky získame

zosilnenie $Z = \frac{y(-)}{u(-)} \frac{y(0)}{u(0)}$, časovú konštantu T a dopravné oneskorenie D

a pomocou týchto parametrov vypočítame pomocné parametre:

- relatívne zosilnenie $\alpha = \frac{Z \cdot D}{T}$

- relatívne dopravné oneskorenie $d = \frac{D}{D+T}$

Parametre Z_R , T_I a b sa dajú vyjadriť ako funkcie:

$$\alpha \cdot Z_R = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot d + a_2 \cdot d^2} \quad \frac{T_I}{T} = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot d + a_2 \cdot d^2} \quad b = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot d + a_2 \cdot d^2}$$

Parametre Z_R , T_I a b pre PI regulátor sa vypočítajú pomocou tab.6.

	a_0	a_1	a_2
$\alpha \cdot Z_R$	0,29	-2,7	3,7
T_I/D	0,79	-1,4	2,4
b	0,81	0,73	1,9

Tab. 6 Parametre regulátora pre Åströmovu metódu

3.5.7. Metóda priamej syntézy s použitím aproximovaného modelu (PS)

Z prechodovej charakteristiky sú určené parametre: zosilnenie Z , časová konštanta T a dopravné oneskorenie D . Zvolí sa časová konštanta uzavretého regulačného obvodu (T_{URO}), menšia ako časová konštanta regulovaného systému. O URO sa predpokladá, že sa chová ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením:

$$\frac{Z_{URO}}{T_{URO} \cdot s + 1} \cdot e^{-D_{URO} \cdot s}$$

kde $T_{URO} < T$

Výpočet parametrov regulátora je uvedený vtab. 7.

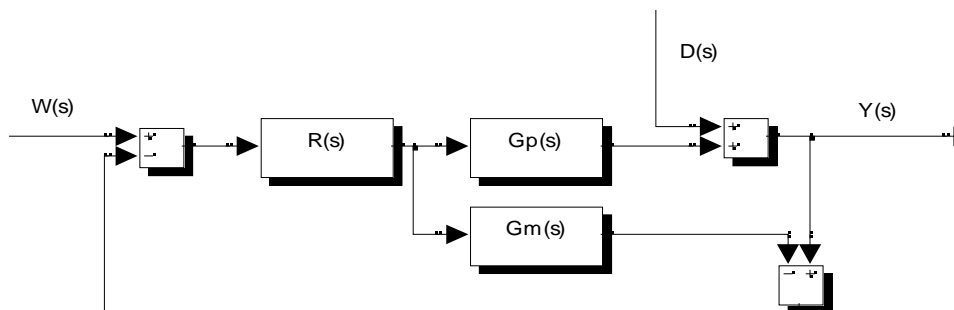
Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{T}{Z \cdot (T_{URO} + D)}$	T	
PID	$\frac{2 \cdot T + D}{2 \cdot Z \cdot (T_{URO} + D)}$	$T + \frac{D}{2}$	$\frac{D}{2} \cdot \frac{T_{URO}}{(T_{URO} + D)}$

Tab. 7 Parametre regulátora pre metódu priamej syntézy

3.5.8. Internal Model Control (IMC)

Metódu IMC navrhol Morari spolu s Riverom v 80-tých rokoch. Podobnou metódou, navrhnutou o niečo skôr je napríklad Smithov prediktor pre riadenie s veľkým dopravným oneskorením. IMC regulátor zahrňuje v sebe výhody spätnoväzbového a priameho riadenia. IMC regulátor možno previesť na klasický PID regulátor, ktorého parametre sú potom navrhované podľa typu sústavy. Táto metóda je vhodná pre stabilné systémy a zaručuje robustné nastavenie regulátora.

Bloková schéma regulačného obvodu sIMC regulátorom je znázornená na obr.7.



Obr.7 Bloková schéma regulačného obvodu sIMC regulátorom

Schému je možné tiež interpretovať ako klasický spätnoväzbový regulátor, pre ktorý platí:

$$G_R(s) = \frac{R(s)}{1 - R(s).G_M(s)}$$

Vnútorový spätnoväzbový obvod môžeme nahradiť prenosom R(s):

$$R(s) = \frac{G_R(s)}{1 + G_R(s).G_M(s)}$$

Metódu možno použiť pre stabilné sústavy, sústavy so stabilnými pólmi. Aby bola zabezpečená stabilita a fyzikálna realizovateľnosť regulátora, musíme odstrániť z prenosu $G_M(s)$ nestabilné nuly a dopravné oneskorenie. Po inverzii sa nestabilné nuly zmenia na nestabilné póly a dopravné oneskorenie na fyzikálne nerealizovateľné záporné dopravné oneskorenie. Rozdelenie prenosu modelu na invertovateľnú (stabilnú) a neinvertovateľnú (nestabilnú) časť je dané vzťahom:

$$G_M(s) = G^+(s).G^-(s)$$

kde $G^+(s)$ je nestabilná časť prenosu spólami, umiestnenými vkladnej polovici roviny s .

Aby regulátor vykazoval derivačné vlastnosti (rád čitateľa je o jeden väčší ako menovateľa), dopĺňa sa prenos regulátora filtrom $F(s)$,

$$R(s) = \frac{1}{G^-(s).F(s)}$$

a prenosová funkcia filtru sa volí tvare:

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda.s + 1)^n}$$

kde n je rád menovateľa.

Forma ekvivalentného IMC regulátora sa implementuje ako:

$$G_R(s) = \frac{R(s)}{1 - R(s).G_M(s)}$$

Príklad návrhu regulátora IMC metódou je vstati 4.5.6.

4. Experimentálna časť

4.1. Popis etážovej rektifikačnej kolóny

Etážová rektifikačná kolóna patrí k najdôležitejším systémom chemickej technológie. Schéma rektifikačnej kolony je na obr. 8.

Riadená rektifikačná kolóna má 12 etáží a používa sa pri separácii binárnej zmesi etanol-voda. Zloženie destilátu \bar{x}_D je meraná veličina, ktorá je riadená na požadovanú hodnotu. Ako akčná veličina je použitý hmotnostný prietok spätného toku – refluxu \bar{m}

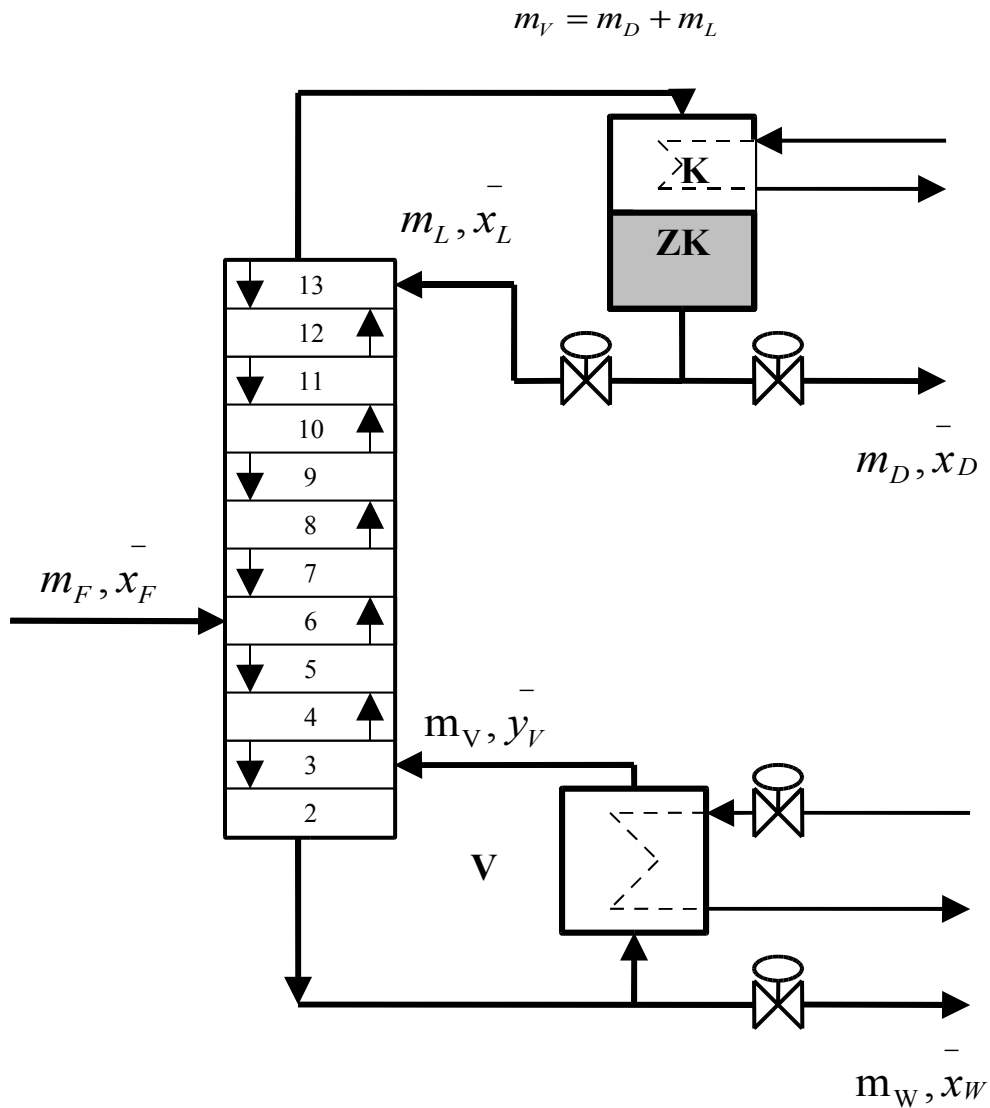
V tejto kolóne sa delí kvapalná binárna zmes, ktorá má jeden vstupný prúd (nástreku m_F) na 5. etáž a dva výstupné prúdy: z varáka (zvyšok m_W) a zásobníka destilátu (destilát m_D). Kvapalina, ktorá steká kolónou (spätný tok m_L), vchádza do varáka (V), kde sa spája s kvapalnou zádržou. Vo varáku prebieha odparovanie a pary idú do kolóny. Pary z hlavy kolóny kondenzujú v kondenzátore (K) a dopĺňajú zádrž kvapaliny v zásobníku kondenzátu (ZK). Časť kondenzátu sa vracia späť do kolóny ako vonkajší spätný tok \bar{m}

V prichádzajúcom nástreku m_F je mólový zlomok etanolu \bar{x}_F . Na každej etáži dochádza k prestupu látky, pričom parná fáza m_V sa obohacuje o prchavejšiu zložku (etanol) ako postupuje pozdĺž kolóny. Mólový zlomok v parnej fáze na i-tej etáži je \bar{y}_i . V kvapalnej fáze sa hromadí menej prchavá zložka (voda). Hmotnostný zlomok etanolu v kvapalnej fáze na i-tej etáži je \bar{x}_i . Cieľom separácie je dosiahnuť požadovaný hmotnostný zlomok etanolu v destiláte \bar{x}_D , ktorý je väčší ako hmotnostný zlomok etanolu v surovine \bar{x}_F . Hmotnostný zlomok etanolu vo zvyšku je \bar{x}_W .

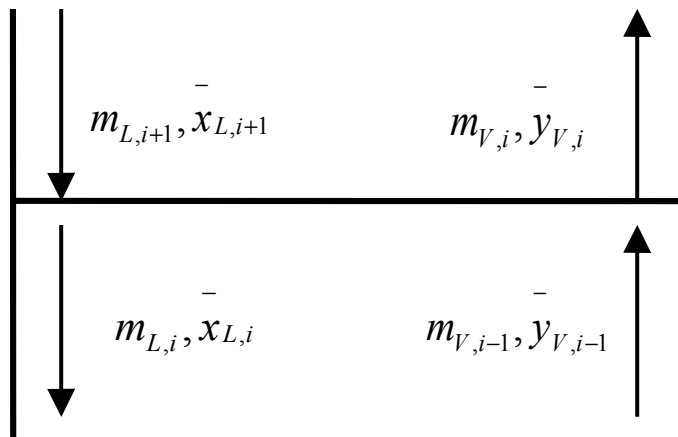
Ak kolóna správne pracuje, musia byť hmotnostné prietoky m_F , m_D , m_W , m_L a m_V v rovnováhe. Pri zachovaní celkovej materialovej bilancie kolóny platí, že súčet hmotnostného prietoku destilátu m_D a zvyšku m_W dáva hmotnostný prietok nástreku \bar{m}

$$m_F = m_D + m_W$$

Zároveň musí byť zachovaná celková materiálková bilancia kondenzátora, v ktorej platí, že súčet hmotnostného prietoku destilátu m_D a spätného toku m_L je rovný hmotnostnému prietoku parnej fázy m_V :



Obr.8 Schéma etážovej rektifikačnej kolony



Obr.9 Prúdová schéma i -tej etáže

4.2. Odvodenie matematického modelu etážovej rektifikačnej kolóny

Rektifikačná kolóna patrí k najzložitejším systémom v chemickej technológii, preto aj pri odvádzaní matematického modelu boli použité nasledovné zjednodušenia:

- kvapalná fáza sa na etážach, zásobníku kondenzátu aj vo varáku dokonale mieša,
- k výmene látky dochádza len na etážach,
- kolóna je tepelne izolovaná,
- straty tepla do okolia a teplotné zmeny pozdĺž kolóny sú zanedbateľné,
- zádrže kvapaliny na etážach a vo varáku sa časom nemenia,
- nástrek sa privádza kvapalným v konštantnom množstve a na bode varu,
- kvapalná fáza na všetkých etážach, v zásobníku kondenzátu aj vo varáku je na bode varu,
- prietok kvapalnej fázy pozdĺž kolóny je konštantný a stabilizovaný,
- tlak je pozdĺž kolóny konštantný,
- pary odchádzajúce z hlavy kolóny a v kondenzátore úplne kondenzujú,

- relatívna prchavosť zmesi pozdĺž kolóny je konštantná,
- para odchádzajúca z teoretickej etáže je v rovnováhe s kvapalinou na etáži a táto závislosť je popísaná rovnovažnou krivkou:

$$y_e^* = \frac{a_r + c_r \cdot x_e + e_r \cdot x_e^2}{1 + b_r \cdot x_e + d_r \cdot x_e^2} \quad (4.2.1)$$

kde index e znamená e=1 pre varák a e=2,...,13 pre etáže,

- zanedbáva sa dopravné oneskorenie, ktoré vzniká transportom pár z hlavy kolóny do zásobníka kondenzátu a transportom kvapaliny zo zásobníka kondenzátu späť do kolóny,
- sú definované Murpheeho účinnosti etáži e v parnej fáze:

$$\eta_e = \frac{y_e - y_{e-1}}{y_e^* - y_{e-1}} \quad (4.2.2)$$

čitateľ zlomku reprezentuje skutočné obohatenie sa parnej fázy a menovateľ teoretické obohatenie sa parnej fázy o prchavejšiu zložku.

Za vyššie uvedených predpokladov sa nebudú brať do úvahy rovnice energetickej bilancie, opis systému sa značne zjednoduší a matematický model sa zostaví pomocou materiálovej bilancie prchavejšej zložky, rovníc účinnosti a rovnovažných vzťahov na jednotlivých etážach. Za vstupnú veličinu je zvolený hmotnostný prietok spätného toku m_L .

Výstupnou bude zloženie destilátu x_D .

V dynamickom stave je rektifikačná kolóna opísaná sústavou nelineárnych diferenciálnych rovníc 1. rádu, ktoré majú nasledovný tvar:

- varák

$$y_1^*(t) = f_{nelin} \left(x_1(t) \right) \quad (4.2.3)$$

$$\bar{y}_1(t) = \eta_1^* \cdot \bar{y}_1(t) \quad (4.2.4)$$

$$\frac{d}{dt} \left[H_1 \cdot \bar{x}_1(t) \right] = (m_L + m_F) \cdot \bar{x}_2 - m_W \cdot \bar{x}_1 - m_V \cdot \bar{y}_V \quad (4.2.5)$$

- ochudobňovacia časť (i=2,...,5)

$$\bar{y}_i(t) = f_{nelin} \left[\bar{x}_i(t) \right] \quad (4.2.6)$$

$$\bar{y}_i(t) = \eta_e \cdot \bar{y}_i(t) + (1 - \eta_e) \cdot \bar{y}_{i-1} \quad (4.2.7)$$

$$\frac{d}{dt} \left[H_i \cdot \bar{x}_i(t) \right] = (m_L + m_F) \cdot \left[\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i \right] + m_V \cdot \left[\bar{y}_{i-1} - \bar{y}_i \right] \quad (4.2.8)$$

- nástreková etáž

$$\bar{y}_6(t) = f_{nelin} \left[\bar{x}_6(t) \right] \quad (4.2.9)$$

$$\bar{y}_6(t) = \eta_e \cdot \bar{y}_6(t) + (1 - \eta_e) \cdot \bar{y}_5 \quad (4.2.10)$$

$$\frac{d}{dt} \left[H_6 \cdot \bar{x}_6(t) \right] = m_F \cdot \bar{x}_F + m_L \cdot \bar{x}_7 - (m_L + m_F) \cdot \bar{x}_6 + m_V \cdot \left[\bar{y}_5 - \bar{y}_6 \right] \quad (4.2.11)$$

- obohacovacia časť (i=7,...,13)

$$\bar{y}_i(t) = f_{nelin} \left[\bar{x}_i(t) \right] \quad (4.2.12)$$

$$\bar{y}_i(t) = \eta_e \cdot \bar{y}_i(t) + (1 - \eta_e) \cdot \bar{y}_{i-1} \quad (4.2.13)$$

$$\frac{d}{dt} \left[H_i \cdot \bar{x}_i(t) \right] = m_L \cdot \left[\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i \right] + m_V \cdot \left[\bar{y}_{i-1} - \bar{y}_i \right] \quad (4.2.14)$$

- kondenzátor

$$\frac{d}{dt} \left[H_{14} \cdot \bar{x}_D(t) \right] = m_V \cdot \bar{y}_{13} - (m_L + m_D) \cdot \bar{x}_D \quad (4.2.15)$$

H_i - hmotnostná zádrž kvapaliny vo varáku [kg],

H_i - hmotnostná zádrž kvapaliny na etážach ($i=2, \dots, 13$) [kg],

H_{14} - hmotnostná zádrž kvapaliny v kondenzátore [kg],

m_L - hmotnostný prietok spätného toku [kg.min⁻¹],

m_F - hmotnostný prietok nástreku [kg.min⁻¹],

m_L - hmotnostný prietok parnej fázy [kg.min⁻¹],

m_D - hmotnostný prietok destilátu [kg.min⁻¹],

m_W - hmotnostný prietok zvyšku [kg.min⁻¹],

\bar{x}_i - hmotnostný zlomok prchavejšej zložky v kvapalnej fáze na i -tej etáži [-],

\bar{y}_i - hmotnostný zlomok prchavejšej zložky v parnej fáze na i -tej etáži [-],

\bar{x}_D - hmotnostný zlomok prchavejšej zložky v destiláte [-],

\bar{x}_W - hmotnostný zlomok prchavejšej zložky vo zvyšku [-],

\bar{x}_F - hmotnostný zlomok prchavejšej zložky v nástreku [-],

e - účinnosť etáže [-],

η - účinnosť varáka [-],

Predpokladom na sledovanie dynamických vlastností systému je výpočet ustáleného stavu [3]. Tento sa vypočíta riešením sústavy nelineárnych algebraických rovníc, ktorá sa získa z rovníc (4.2.3)-(4.2.15) tak, že akumulčné členy v diferenciálnych rovniciach (4.2.5), (4.2.8), (4.2.11) a (4.2.14) sa položia rovné nule. Číselné hodnoty hmotnostných zlomkov prchavejšej zložky vo varáku, na etážach a v kondenzátore v ustálenom stave sú v tab. 8. V tab. 9 sú uvedené parametre kolóny v pôvodnom ustálenom stave.

x_1	0,0128	x_4	0,4127	x_7	0,5305	x_{10}	0,6144	x_{13}	0,7089
x_2	0,1275	x_5	0,4867	x_8	0,5585	x_{11}	0,6436	x_D	0,7479
x_3	0,2931	x_6	0,5322	x_9	0,5863	x_{12}	0,6747		

Tab. 8 Zloženie zmesi v kolóne v ustálenom stave

m_F^s [kg.min ⁻¹]	m_D^s [kg.min ⁻¹]	m_L^s [kg.min ⁻¹]	x_F^s [-]
0,232	0.179	0.149	0.58

Tab. 9 Parametre kolóny v ustálenom stave

Ako som už uviedol, kolóna má 12 etáží a nástreková etáž je 5. Účinnosť varáka je 100% a účinnosť etáží 60%.

Koeficienty rovnice rovnovážnej krivky (4.2.1) sú:

$$a_r = 0,00046224365$$

$$b_r = 25,2741$$

$$c_r = 15,131084$$

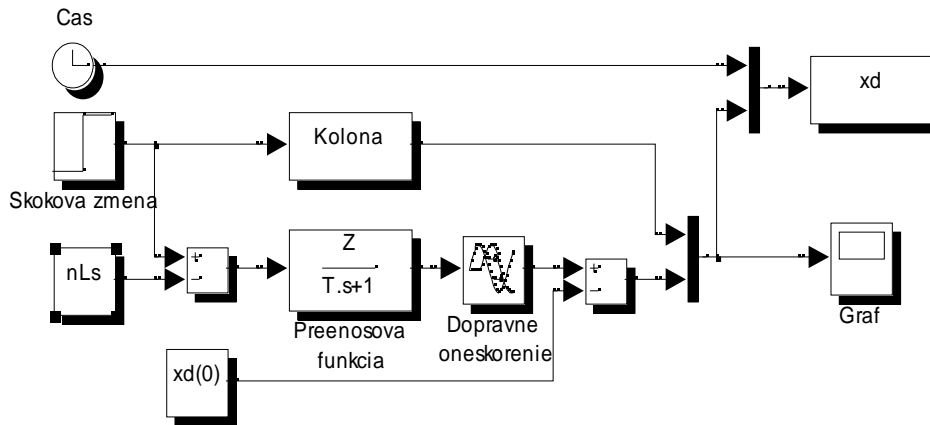
$$d_r = -16,30502$$

$$e_r = -5,1346083.$$

4.3. Simulácia prechodovej charakteristiky a identifikácia systému

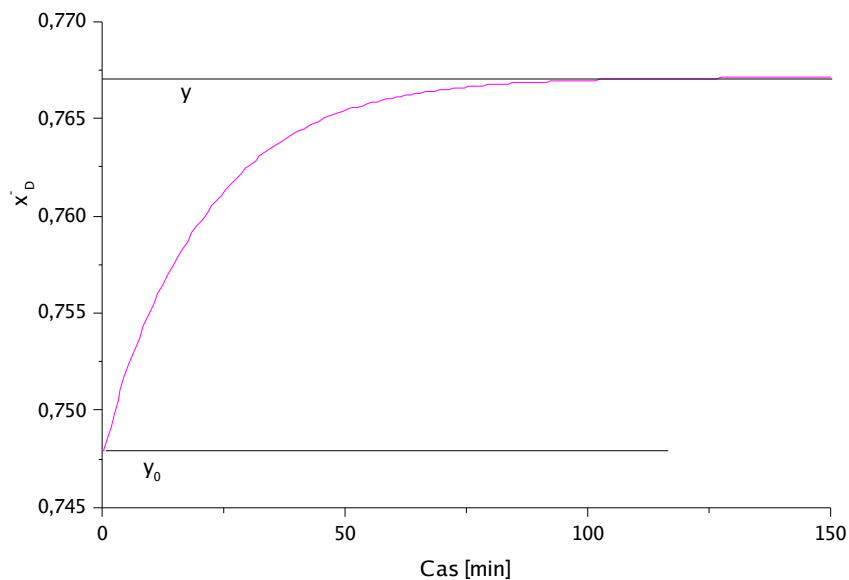
Dynamické vlastnosti som sledoval simuláciou prechodovej charakteristiky. Simulácia bola robená v simulačnom prostredí Matlab Simulink.

Vychádzal som z ustáleného stavu kolóny, ktorého hodnoty sú v tabuľkách (tab. 8,9). Pre dynamický model som vytvoril v simulačnom jazyku Matlab 5.3 s-funkciu, ktorá je uvedená v prílohe (7.1). Simulácia prebiehala s jednou vstupnou veličinou – hmotnostný prietok spätného toku m_L . Prechodovú charakteristiku som simuloval pomocou schémy (obr. 10) a to tak, že hmotnostný prietok m_L sa skokovo zmenil z 0,149 kg.min⁻¹ na 0,1639 kg.min⁻¹.



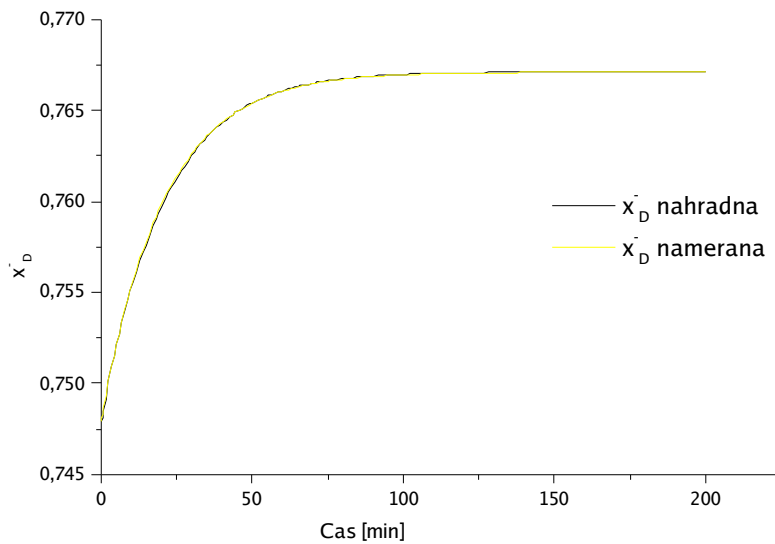
Obr.10 Bloková schéma pre simuláciu prechodovej charakteristiky

Sledoval som odozvu zloženia destilátu \bar{x}_D . Získaná prechodová charakteristika je na obr. 11.



Obr.11 Odozva zloženia destilátu na skokovú zmenu m_L

Identifikáciu som simuloval v Simulinku pomocou schémy, ktorá je na obr. 5. Na obr. 12 je znázornená identifikácia nameraného a náhradného systému. Dosiahol som, že PCH náhradného prenosu je zhodná z PCH nameraného prenosu. Ide o systém prvého rádu s malým dopravným oneskorením.



Obr.12 Identifikácia

Z prechodovej charakteristiky som určil prenos procesu. Hodnotu zosilnenia Z som vypočítal z rovnice:

$$Z = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{0,7671 - 0,7479}{0,1494 - 0,149} = 1,29$$

kde v čitateli $y(\infty)$ je hodnota x_D v ustálenom stave, $y(0)$ je počiatočná hodnota x_D v ustálenom stave, a v menovateli je skoková zmena $zm^s_L = 0,149$ na $m_L = 0,1639$.

Pre systém prvého rádu s dopravným oneskorením platí, že v čase rovnajúcom sa časovej konštante T sa výstup dostane na 63% svojej novej ustálenej hodnoty. Potom pre novú 63% ustálenú hodnotu platí:

$$x_D^{0,63} = [y(\infty) - y(0)] \cdot 0,63 + y(0) = (0,7671 - 0,7479) \cdot 0,63 + 0,7479 = 0,76$$

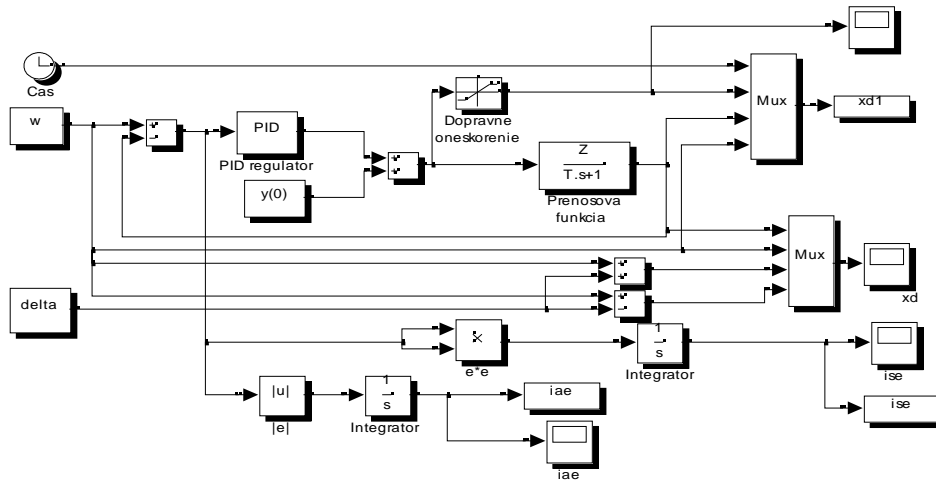
Takejto hodnote prislúcha čas 20,7, čo predstavuje časovú konštantu T .

Dopravné oneskorenie som získal z prechodovej charakteristiky. Približne sa $D = 0,01$.

Sústava bola identifikovaná v tvare:

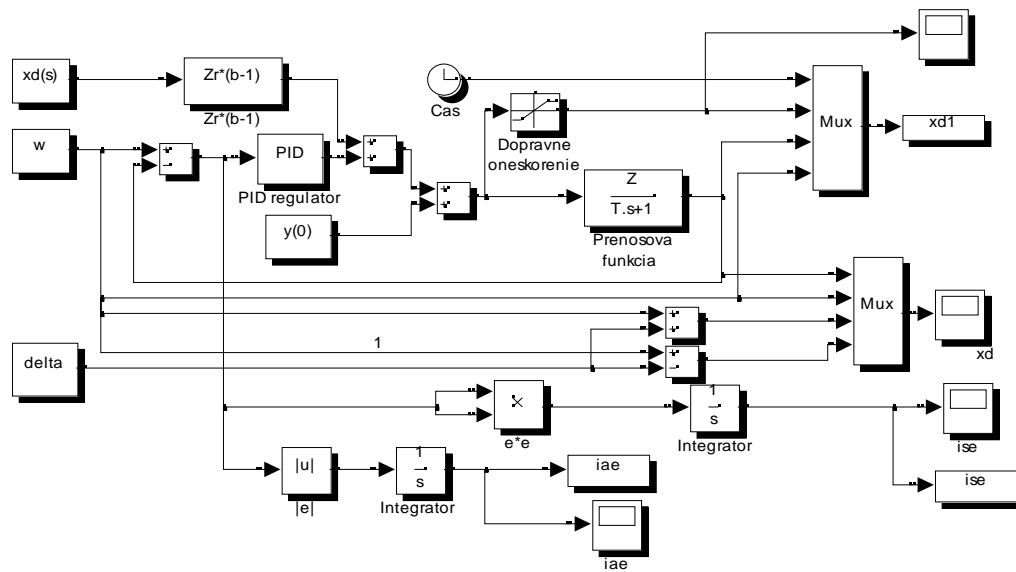
$$G(s) = \frac{1,29}{20,7s + 1} \cdot e^{-0,01s}$$

4.4. Blokové schémy používané pri simuláciách



Obr.12 Schéma simulácie riadenia

(pre regulátory navrhnuté metódami PS, CHHR, SM, HA, IMC)



Obr.12 Simulácia riadenia regulátorom, navrhnutým Åstömovou metódou

4.5. Návrh regulátora a riadenie rektifikačnej kolóny

Pri návrhu regulátorov som vychádzal z požiadavky odstránenia regulačnej odchýlky, preto som navrhoval parametre PI regulátora, ktorého integračná zložka túto požiadavku splňa. Parametre PI regulátora sú vschéme zapísane ako:

$$P = Z_R \qquad I = \frac{Z_R}{T_I}$$

Parametre regulátorov som vypočítal pomocou matlabovského programu, ktorý pre ilustráciu uvádzam v prílohe (7.2). Návrhy regulátorov rôznych pomocou metód sú uvedené v nasledujúcich statiach. Metódy (3.5), ktoré nie sú nižšie uvedené, sú pre simuláciu zloženia destilátu nevhodné, pretože sústava mala veľké prerogulovanie alebo dlhý čas regulácie. Je to metóda Zieglerova-Nicholsova a Cohen-Coonova.

4.5.1. Návrh regulátora pomocou metódy priamej syntézy (PS)

Z identifikácie sú určené konštanty Z , T , D (4.3). Pre metódu PS som si zvolil časovú konštantu T_{URO} . Podmienkou je, aby T_{URO} nebola väčšia ako časová konštanta prenosu procesu T . Keďže moja časová konštanta je rovná $T=20,7$, potom T_{URO} musí byť menšie ako časová konštanta regulovaného systému T . Hľadal som takýto interval, kedy je časová konštanta T_{URO} menšia ako T , ale dbal som aj na použiteľnosť regulátora.

Ako príklad uvádzam návrh regulátora pre $T_{URO}=1$. Interval použiteľnosti tejto metódy pre T_{URO} je (0,1 ; 20,6). Podľa tab. 7 vypočítam parametre regulátora (proporcionálnu a integračnú zložku).

Podľa tab. 7 sú parametre regulátora $Z_R=15,888$ a $T_I=20,7$.

V prílohe na grafe 7.4.2 sú zobrazené štyri rôzne riadenia pre rôzne T_{URO} . Podľa týchto riadení usudzujem, že čím sa T_{URO} blíži k nule, tým je regulácia kvalitnejšia. V tab. 10 sú uvedené ukazovatele kvality regulácie pre $T_{URO}=1$ a 10.

Regulátor	$T_{URO}=1$			$T_{URO}=10$		
	t_{reg} [min]	iae	ise	t_{reg} [min]	iae	ise
PI	7,92	0,34	0.013	150,3	3,3	0,1

Tab. 10 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora metódou PS

4.5.2. Návrh regulátora Åströmovou metódou (Åström)

Pre riadenie takto navrhnutého regulátora si prv musím zadefinovať pomocné parametre, a to:

relatívne zosilnenie $\alpha = Z \cdot \frac{D}{T} = 1,29 \cdot \frac{0,01}{20,7} = 0,000623$

relatívne dopravné oneskorenie $d = \frac{D}{D+T} = \frac{0,01}{0,01+20,7} = 0,000483$.

Potom som pomocou tab. 6 vypočítal parametre regulátora, a to nasledovne:

- parametre som si vyjadril ako funkcie $f(d) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot d + a_2 \cdot d^2}$
- potom pre prvý riadok tab. 6 môžem napísať:

$$\alpha \cdot Z_R = 0,29 \cdot e^{-2,7 \cdot 0,000483 + 3,7 \cdot 0,000483^2} = 0,2896$$

- a pre druhý a tretí:

$$\frac{T_I}{D} = 0,79 \cdot e^{-1,4 \cdot 0,000483 + 2,4 \cdot 0,000483^2} = 0,7895$$

$$b = 0,81 \cdot e^{0,73 \cdot 0,000483 + 1,9 \cdot 0,000483^2} = 0,8103$$

- Po úprave som získal parametre regulátora:

$$Z_R = 464,71 \quad T_I = 0,007895 \quad b = 0,8103$$

Ukazovatele kvality regulácie pre túto metódu sú vtab. 11.

Regulátor	max [%]	t _{max} [min]	t _{reg} [min]	iae	ise
PI	6,8	5,22	5,86	0,2246	0,0078

Tab. 11 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora Åströmovou metódou

4.5.3. Návrh regulátora pomocou metódy Chien, Hrones, Reswick (CHHR)

Návrh tohto regulátora vychádza z Ziegler - Nicholsovej metódy. Snahou tejto metódy je dosiahnuť čo najlepšie tlmenie v regulačnom obvode.

Na výpočet parametrov som použil tab. 4. V tab. 12 uvádzam vypočítané hodnoty parametrov PI regulátora s požiadavkou 0% a 20% preregulovania.

Preregulovanie Regulátor	0%		20%	
	Z _R	T _I	Z _R	T _I
PI	561,63	24,84	962,79	20,7

Tab. 12 Parametre regulátora navrhnutých metódou CHHR

Ukazovatele kvality regulácie sú uvedené v tab. 13.

Preregulovanie Regulátor	0%					20%				
	t _{max} [%]	t _{reg} [min]	iae	ise	t _{max} [min]	t _{reg} [min]	iae	ise		
PI	6,38	4,98	5,61	0,26	0,01	7,52	5,13	8,7	0,26	0,01

Tab. 13 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora CHHR metódou

4.5.4. Návrh regulátora pomocou metódy Smith - Murrill (SM)

Pri návrhu regulátora pomocou tejto metódy som vychádzal z podmienky:

$$0,1 < \frac{D}{T} < 1$$

Okrem tejto podmienky som navrhoval regulátor na základe minimalizácie integrálnych kritérií iae a ise. V tab. 14 sú uvedené parametre regulátora vypočítané podľa tab. 5.

Regulátor	Z _R	T _I
PI	495,15	20,09

Tab. 14 Parametre regulátora navrhnutých metódou SM

Ukazovatele kvality PCH, získanej pomocou tejto metódy, sú uvedené v tab. 15.

Regulátor	t_{\max} [%]	t_{\max} [min]	t_{reg} [min]	iae	ise
PI	7,52	5,23	8,52	0,2622	0,008

Tab. 15 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora SM metódou

4.5.5. Návrh regulátora pomocou Haalmanovej metódy (HA)

Pre Haalmanovu metódu som vypočítal parametre PI regulátora podľa tab. 3. Tieto parametre sú uvedené v tab. 16.

Regulátor	Z_R	T_I
PI	1380	20,7

Tab. 16 Parametre regulátora navrhnutých metódou HA

Ukazovatele kvality sú v tab. 17.

Regulátor	t_{\max} [%]	t_{\max} [min]	t_{reg} [min]	iae	ise
PI	7,52	4,95	8,93	0,2655	0,0079

Tab. 17 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora HA metódou

4.5.6. Návrh regulátora metódou Internal Model Control (IMC)

Identifikovaný prenos je v tvare

$$\frac{1,29}{20,7s + 1} \cdot e^{-0,01s}$$

Postup výpočtu parametrov PI regulátora pre druhý spôsob je nasledovný:

- uvažovaný prenos systému oznáčím ako $G_M(s)$. Ten potom rozložím na invertovateľnú ($G^-(s)$) a neinvertovateľnú časť ($G^+(s)$)

$$G^-(s) = \frac{1,29}{20,7s + 1}$$

- následne si špecifikujem regulátor a navrhnem filter

$$R(s) = \frac{1}{G^-(s) \cdot F(s)} \qquad F(s) = \frac{1}{(\lambda \cdot s + 1)^n}$$

Kedže môj prenos je prvého rádu sdopravným oneskorením, n sa bude rovnat' jednej ($n=1$).

- po dosadení a úprave som odvodil prenos regulátora tvare:

$$G_R(s) = \frac{R(s)}{1 - R(s) \cdot G_M(s)} = \frac{20,7}{1,29 \cdot \lambda} \cdot \left(1 + \frac{1}{20,7s} \right)$$

Takýto tvar je podobný prenosu PI regulátora. Preto môžem vyjadriť parametre regulátora ako:

$$Z_R = \frac{20,7}{1,29 \cdot \lambda} \qquad T_I = 20,7$$

- pred použitím tohto regulátora som si musel najst' interval použiteľnosti regulátora, to znamená, že som si musel najst' interval pre λ , nakoľko zosilnenie regulátora závisi od hodnoty λ . Interval λ je (0 ; 10). Treba však povedať, že tento interval je neúplny. Nad pravou hranicou je regulátor tiež použiteľný, ale čas regulácie sa zväčšuje.

Ukazovatele kvality, pre $\lambda = 1$, sú uvedené v tab. 18.

Regulátor	t_{reg} [min]	iae	ise
PI	7,85	0,3358	0,0127

Tab. 18 Ukazovatele kvality pre návrh regulátora IMC metódou

V prílohe uvádzam graf 7.4.3, kde sú zobrazené tri riadenia (0,1 ; 1 ; 10).

5. Záver

Cieľom tohto projektu bolo navrhnúť vhodný regulátor na riadenie destilačnej kolóny. Sústava bola identifikovaná spracovaním prechodovej charakteristiky. Z identifikácie vyplynulo, že systém je prvého rádu smalým dopravným oneskorením.

Pri návrhu regulátora som vychádzal z požiadavky odstránenia regulačnej odchýlky. Regulátor vyhovujúci tejto podmienke je PI regulátor. Parametre regulátora som určil podľa experimentálnych metód, ktoré sú uvedené v experimentálnej časti. Výsledky riadenia sú graficky porovnané.

Pri niektorých metódach bolo potrebné zvoliť si časovú konštantu URO. V prílohe Grafy sú riadenia pre rôzne hodnoty časovej konštanty z intervalu použiteľnosti pre metódy, pri ktorých som si takúto konštantu volil. V grafe, v ktorom sú porovnané všetky metódy som z metód, pri ktorých som si volil časovú konštantu, vybral to najlepšie riadenie s najvhodnejšími ukazovateľmi kvality.

Z vyhodnotenia výsledkov riadenia pomocou ukazovateľov kvality vyplýva, že najvhodnejší je PI regulátor, navrhnutý metódou IMC. Dobré výsledky boli dosiahnuté aj metódou priamej syntézy. Najmenej vhodný bol regulátor navrhnutý Haalmanovou metódou.

Ziegler-Nicholsova a Cohen-Coonova metóda sa ukázali ako nie veľmi vhodné, pretože sústava mala veľké preregulovanie, dlhý čas regulácie.

Conclusion

The objective of the project was to propose an appropriate regulator for distillation stream/string regulation. The system was identified by processing of transition characteristics. It has been pointed out that the system is of first grade with little delay.

The proposal of the regulator stemmed from the requirement of the elimination of perturbation. The convenient regulator is PI regulator. The regulator parameters were defined according to the experimental methods and are given in the experimental part. The results of regulation are graphically compared.

Some methods required the usage of time constant URO. In the Graphs attachment there are regulations for various values of time constant from the applicability interval for methods which I have chosen this constant for. In the graph where all methods are compared, I have chosen the regulation with the most appropriate quality indicators.

The evaluation of the outcomes of regulation with use of quality indicators have proved that the most appropriate is PI regulator proposed by the IMC method. Favourable results were achieved by the direct synthesis method. The least appropriate was the regulator proposed by the Haalman method.

The Ziegler-Nichols and Cohen-Coon methods appeared to be not very appropriate because the system had huge overshooting and long time of regulation.

6. Literatúra

- [1] Mikleš, J., Doslál, P., Mészárosz, A.: *Riadenie technologických procesov*, STU Bratislava, 1994
- [2] Fikar, M., Mikleš, J.: *Identifikácia systémov*, STU Bratislava, 1999
- [3] Bakošová, M., Ondrovičová, M.: *Adaptive control of distillation column-a case study*. In: Prep. 13th Int. Congress of Chem. and Process Engineering CHISA '98, Prague 1998. CD Rom No. 527, Magicware, Ltd.
- [4] Ogunnaike, B. A., Ray, W. H.: *Proces Dynamics, Modeling and Control*. Oxford University Press, 1994. 536-541
- [5] Åström, K. J., Hägglund, T.: *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, second edition, 1995
- [6] Rivera, D. E., Morari, M., Skogestad, S.: *Internal Model Control*, 4. PID Controller Design and Eng. Proc. Des. Dev., 1986
- [7] Mikleš, J., Hutla, V.: *Teória automatického riadenia*, ALFA Bratislava, 1986

7. Prílohy

S-funkcia pre simuláciu PCH

```
%s-funkcia pre kolonu
function [sys,x0,str,ts] = kolsf(t,x,u,flag)
f = 0.232;d = 0.179;l=0.149;xf = 0.58;g=0.328;
switch flag,
case 0,
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(t,x,u) ;
case 1,
    sys = mdlDerivatives(t,x,u,f,xf,g,l,d);
case 3,
    sys = mdlOutputs(t,x,u);
case {2, 4, 9}
    sys = []; % do nothing
otherwise
    error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(t,x,u);
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 14;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 1;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0=[0.0128;0.1275;0.2931;0.4127;0.4867;0.5322;0.5305;0.5585;0.5863
    0.6144;0.6436;0.6747;0.7089;0.7479;];
str = [];ts = [0];
function sys = mdlDerivatives(t,x,u,f,xf,g,l,d);
h0=1;h=.2;hko=.2;e=.6;
% pocet etazi a nastrekova etaz
n=12;nf=5;
% koeficienty teoretickej rovnovaznej krivky
ar=.00046224365;cr=15.131084;er=-5.1346083;br=25.2741;dr=-16.30502;
% vypocet parametrov z celkovej bilancie
d=g-u(1);
%d=u(1)-l;
w=f-d;
%varak - 100% ucinnost
yt(1)=(ar+cr*x(1)+er*x(1)^2)/(1+br*x(1)+dr*x(1)^2);
y(1)=yt(1);
sys(1)=(u(1)+f)/h0*x(2)-g/h0*y(1)-w/h0*x(1);
%1.etaz
for i=2:nf
    yt(i)=(ar+cr*x(i)+er*x(i)^2)/(1+br*x(i)+dr*x(i)^2);
    y(i)=(1-e)*y(i-1)+e*yt(i);
    sys(i)=(u(1)+f)/h*(x(i+1)-x(i))+g/h*(y(i-1)-y(i));
end
% nastrekova etaz
yt(nf+1)=(ar+cr*x(nf+1)+er*x(nf+1)^2)/(1+br*x(nf+1)+dr*x(nf+1)^2);
y(nf+1)=(1-e)*y(nf)+e*yt(nf+1);
```

```

sys(nf+1)=f/h*xf+u(1)/h*x(nf+2)-(u(1)+f)/h*x(nf+1)+g/h*(y(nf)-y(nf+1));
%obohacovacia cast
for i=nf+2:n+1
    yt(i)=(ar+cr*x(i)+er*x(i)^2)/(1+br*x(i)+dr*x(i)^2);
    y(i)=(1-e)*y(i-1)+e*yt(i);
    sys(i)=u(1)/h*(x(i+1)-x(i))+g/h*(y(i-1)-y(i));
end
% posledna etaz
sys(n+2)=g/hko*y(n+1)-(u(1)+d)/hko*x(n+2);
function sys = mdlOutputs(t,x,u);
sys=x(14);

```

Výpis programu pre výpočet parametrov regulátorov jednotlivými metódami

```

%kolona
z=1.29,d=0.01, T=20.7,Tn=T,Tu=d

%priama synteza s pouzitim aproximovaneho modelu
%turo < Tn
turo=1
turo=Tn*0.1
zrpip=Tn/((turo+Tu)*z),tipip=Tn
P=zrpip,I=P/tipip

%Rivera - Morari
%turo > 0.2*Tn, pre PI-R turo/Tu>1.7
turo=1
zrpirm=(2*Tn+Tu)/(2*turo*z),tipirm=Tn+Tu/2
P=zrpirm,I=P/tipirm

%Haalman
zrpih=(2*T)/(3*d),tipih=T
P=zrpih,I=P/tipih, D=0

%Smith, Murrill, 0.1<(D/T)<1
zrpism=(0.586/z)*(T/d)^0.916,tipism=T/(1.03-0.165*(d/T))
P=zrpism,I=P/tipism,D=0

%Chien, Hrones, Reswick, 0% preregulovanie
zrpichr=0.35*(T/(d*z)),tipichr=1.2*T
P=zrpichr,I=P/tipichr

```

Výpočet parametrov regulátora Åstömovou metódou

```

z=1.29,D=0.01, T=20.7,Tn=T,Tu=D
alfa=z*D/T,d=D/(D+T)
%M=1.4, Ti je pomocou T
az=0.29*exp(-2.7*d+3.7*d*d);tt=0.79*exp(-1.4*d+2.4*d*d);
b=0.81*exp(0.73*d+1.9*d*d),Zr=az/alfa,Ti=T*tt,Td=0

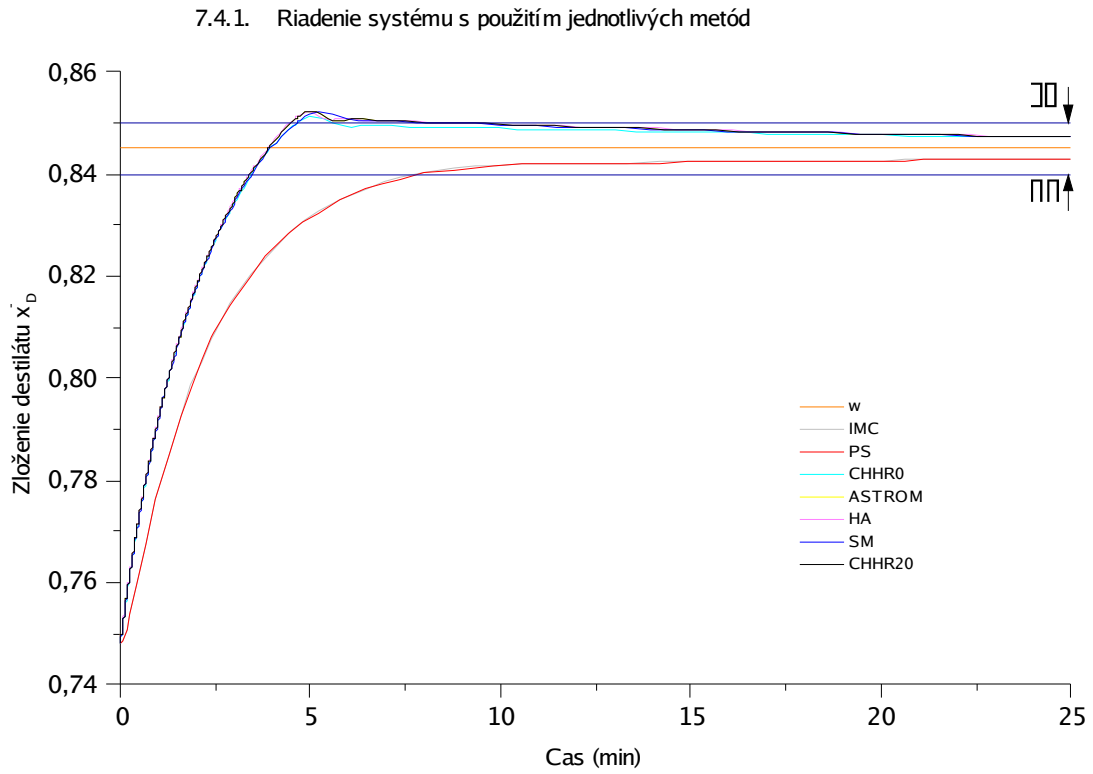
```

Grafy

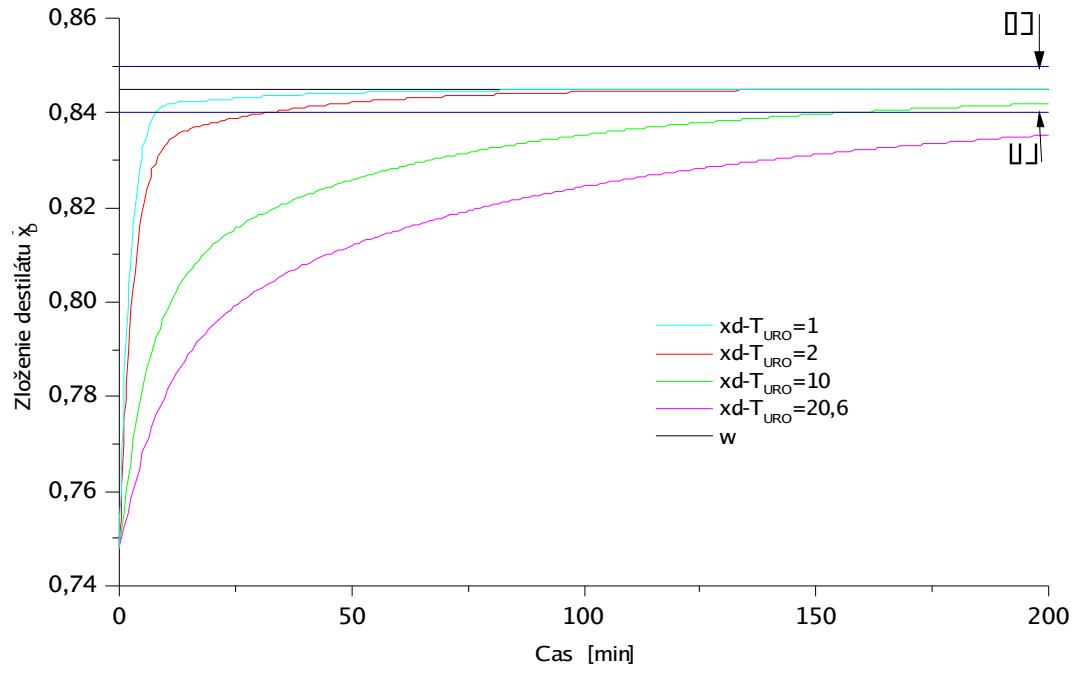
Riadenie systému s použitím jednotlivých metód

Riadenie systému pre metódu priamej syntézy pre rôzne T_{URO}

Riadenie systému metódou IMC



7.4.2. Riadenie systému pre metódu priamej syntézy pre rôzne T_{URO}



7.4.3. Riadenie systému metódou IMC

