

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

Katedra informatizácie a riadenia procesov

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Adaptívne riadenie systémov s recirkuláciou

Diplomant:

Bc. Peter Burian

Vedúci práce:

Doc. Ing. Alojz Mészáros

BRATISLAVA

2005

Na tomto mieste by som sa chcel poďakovať Doc. Ing. Alojzovi Mészárosovi za odborné vedenie, cenné rady a pripomienky i všetkým ostatným ľuďom, ktorí mi akoukoľvek formou pomohli pri vypracovaní mojej diplomovej práce.

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá dynamickou analýzou a riadiacimi aspektmi procesov s recirkuláciou. Bola vyšetrená stabilita a dynamické vlastnosti systému s recirkuláciou. Bol vyšetrovaný aj vplyv na parametre procesu simuláciou lineárnych modelov. Stratégia riadenia sústavy s recirkuláciou je vytvorená ako kombinácia priameho kompenzátora a adaptívnej riadiacej techniky. Predmetom štúdia je nelineárny model procesu, ktorý je zložený z reaktoru a rektifikačnej kolóny.

ABSTRACT

OBSAH

ÚVOD	6
TEORETICKÁ ČASŤ	8
1. OTVORENÝ SYSTÉM S RECIRKULÁCIOU	8
1.1 VPLYV ZOSILNENIA A ČASOVEJ KONŠTANTY RECIRKULÁCIE	9
1.2 VPLYV ONESKORENIA RECIRKULÁCIE	11
2. UZAVRETÝ SYSTÉM S RECIRKULÁCIOU	13
2.1 PROPORCIONÁLNY (P) REGULÁTOR	13
2.2 PROPORCIONÁLNO – INTEGRAČNÝ (PI) REGULÁTOR	14
3. KOMPENZÁCIA RECIRKULAČNÝCH EFEKTOV	16
4. ADAPTÍVNE NAVRHOVANIE ZOSILNENIA	19
EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	21
5. NELINEÁRNY SYSTÉM REAKTOR - REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA.....	21
6. VYTVORENIE MATEMATICKÉHO MODELU	23
6.1 REAKTOR	23
6.2 REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA	24
7. ANALÝZA	25
8. IDENTIFIKÁCIA	30
9. KOMPENZÁCIA RECIRKULÁCIE	36
10. ADAPTÍVNE RIADENIE SÚSTAVY REAKTOR –REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA	42
ZÁVER	47
LITERATÚRA	48

ÚVOD

Sústavy zahrňujúce materiálovú recirkuláciu sú bežné v chemickom priemysle. Typickým príkladom je sústava chemického reaktora a separačného zariadenia, kde reakčná zmes je najprv separovaná a následne recirkulovaná. Celková dynamika takých procesov sa môže veľmi líšiť od dynamiky samostatného procesu bez recirkulácie. Recirkulácia môže vo veľkej miere zmeniť parametre procesu (napr. celkové zosilnenie a časovú konštantu) a môže vyvolať oscilačný dokonca aj nestabilný priebeh aj vtedy, keď sú samostatné jednotky stabilné. Pri navrhovaní regulátora je dôležité poznať takéto javy lebo ich následky môžu ohroziť bezpečnosť zariadenia.

Vo väčšine prípadov recirkulácia vedie ku kladnej spätnej väzbe. Napríklad stúpajúca koncentrácia chemických látok zvyšuje množstvo týchto látok v recirkulačnom prúde a tak je posilnení pôvodný vzrast. Takýto jav sa nazýva samozosilňovacím mechanizmom, ktorý je zvyčajne spojený s recirkuláciou. Táto kladná spätná väzba obyčajne zvyšuje časovú konštantu zariadenia, keďže recirkulácia vedie k "akumulácii" materiálu vo vnútri niektorej časti zariadenia.

Pri návrhu riadiacej sústavy pre zariadenia obsahujúcich jednotky s recirkuláciou musíme brať do úvahy súčasne aj recirkuláciu. Je to oveľa ťažšie než prípad jednotiek prevádzkovaných v kaskáde, kde môžeme ich brať do úvahy postupne. Vyrovnávacie nádrže zabudované medzi jednotlivými zariadeniami dovoľujú viesť recirkulačnú štruktúru späť do kaskádového usporiadania, ale to môže byť neekonomické a nevyhovujúce pre bezpečnosť a environmentálne predpisy.

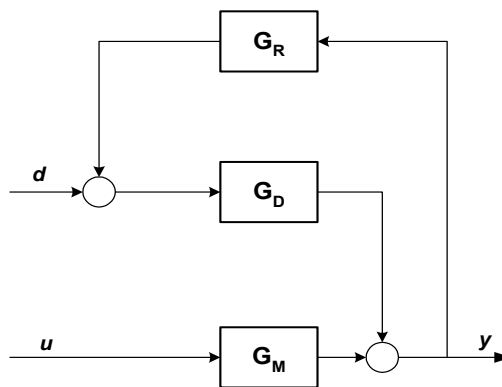
Luyben vyšetroval vplyv recirkulácie na dynamiku procesov (Luyben, 1993a,b,c). Ukazuje na to, že pri zmene zosilnenia nezávisle od iných parametrov procesu, odozva otvoreného obvodu sa môže stať pomalým, oscilujúcim a dokonca nestabilným. Na odstránenie vplyvu recirkulácie na výstupnú odozvu Taiwo (1986) predstavil kompenzátor recirkulácie.

Cieľom tejto práce je dať obraz o dynamickom správaní procesov s recirkuláciou v otvorenom a uzavretom regulačnom obvode. Analýza bola vykonaná použitím simuláčnych nástrojov na jednoduchom nelineárnom modeli chemického reaktoru a rektifikačnej kolóny. Na nastavenie celkového zosilnenia procesu je použitá adaptívna stratégia nastavovania statického zosilnenia v zmysle referenčného modelu adaptívneho systému (MRAS).

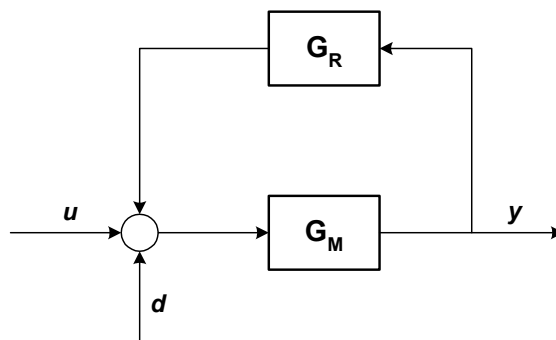
TEORETICKÁ ČASŤ

1. OTVORENÝ SYSTÉM S RECIRKULÁCIOU

Predstavme si jednoduchý lineárny systém pozostávajúci z dvoch dopredných sústav z recirkulačnej jednotky, ktorý je znázornený na *obr. 1*. Za predpokladu , že $G_M = G_D$, môžeme systém previesť na zjednodušenú štruktúru recirkulačného procesu (*obr. 2*).



obr. 1 Otvorený systém s recirkuláciou



obr. 2 Jednoduchý otvorený systém s recirkuláciou

Systém s recirkuláciou (*obr. 1*) sa dá opísať prenosovou funkciou za predpokladu, že $d = 0$

$$G_S(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G_M}{1 - G_M G_R} \quad (1.1)$$

V dynamickej analýze systému s recirkuláciou (1.1) bol skúmaný vplyv parametrov recirkulačnej väzby na celkovú dynamiku zariadenia. Pri simuláciach otvoreného a uzavretého systému G_M a G_R bol považovaný za dynamickú sústavu prvého rádu.

Sústava je opísaná prenosovou funkciou prvého rádu, pozostávajúcou zo zosilnenia K_M s časovou konštantou τ_M . Jednotka recirkulačnej väzby má tiež jednoduchú prenosovú funkciu

$$G_M = \frac{K_M}{\tau_M s + 1}, \quad G_R = \frac{K_R}{\tau_R s + 1} \quad (1.2)$$

Dosadením rovníc () do () dostanem celkovú prenosovú funkciu

$$G_S = \frac{\frac{K_M}{\tau_M s + 1}}{1 - \frac{K_M}{\tau_M s + 1} \frac{K_R}{\tau_R s + 1}} = \frac{K_M (\tau_R s + 1)}{\tau_M \tau_R s^2 + (\tau_M + \tau_R) s + 1 - K_M K_R} \quad (1.3)$$

1.1 Vplyv zosilnenia a časovej konštanty recirkulácie

Aby sa ukázal efekt parametrov recirkulácie, K_R a τ_R , vyjadríme celkové zosilnenie ustáleného stavu K_S a časovej konštanty τ_S použitím rovnice ()

$$K_S = \frac{K_M}{1 - K_M K_R} \quad (1.4)$$

$$\tau_S = \sqrt{\frac{\tau_M \tau_R}{1 - K_M K_R}} \quad (1.5)$$

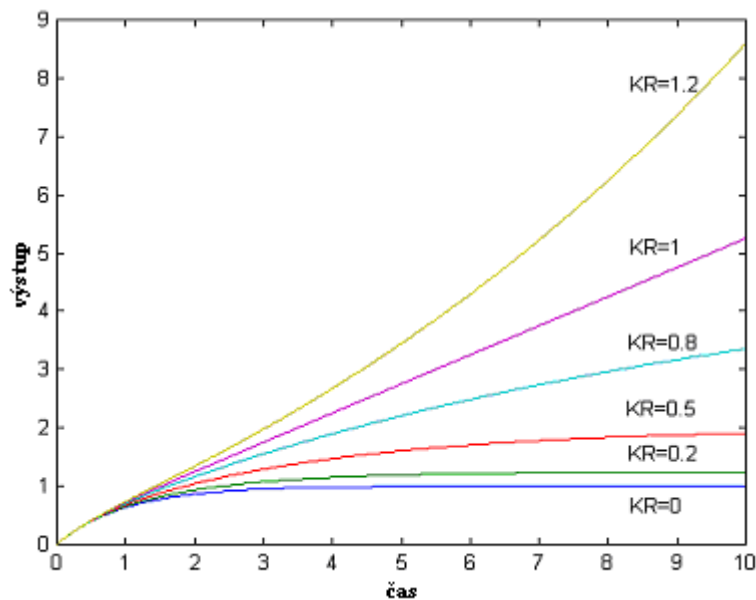
a vypočítaním limít G_S pre krajné hodnoty K_R a τ_R z tej istej rovnice dostaneme

$$\lim_{K_R \rightarrow 0} G_S = G_M, \quad \lim_{K_R \rightarrow \infty} G_S = 0 \quad (1.6)$$

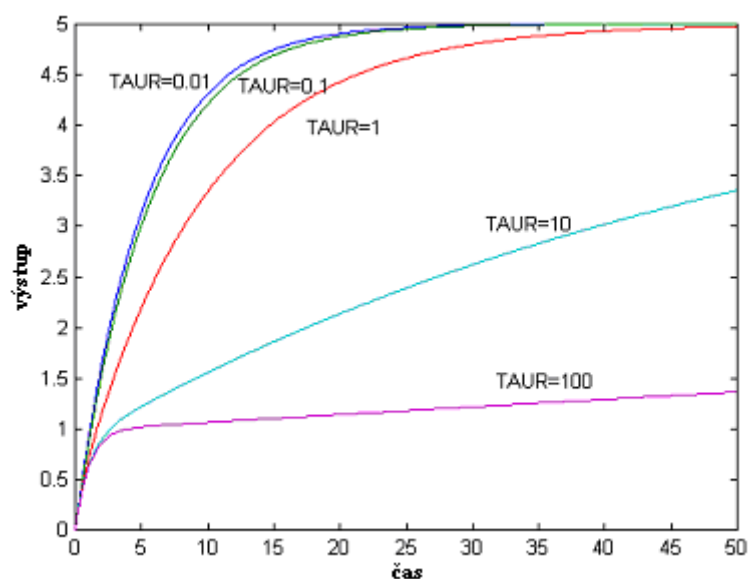
$$\lim_{\tau_R \rightarrow 0} G_S = \frac{\frac{K_M}{1 - K_M K_R}}{\frac{\tau_M}{1 - K_M K_R} s + 1}, \quad \lim_{\tau_R \rightarrow \infty} G_S = G_M \quad (1.7)$$

Rovnice (1.6) a (1.7) vyjadrujú, že recirkulačný efekt sa znižuje pre veľmi nízke hodnoty zosilnenia, takisto ako pre veľmi vysoké hodnoty časovej konštanty. Vysoké hodnoty K_R spôsobujú nestabilitu a veľmi vysoké hodnoty zastavujú celý proces, zatiaľ čo veľmi nízke hodnoty τ_R redukujú stupeň procesu.

Na ukázanie vplyvov recirkulácie boli vykonané simulácie odozvy. Na obr. 3. a obr. 4. sú navzájom porovnané odozvy výstupných veličín pre rôzne hodnoty K_R a τ_R . Ostatné parametre počas mali nasledujúce hodnoty: $K_M = \tau_M = 1$, $K_M = \tau_M = 1$, $K_R = 0,8$. Dá sa povedať, že vplyv K_R je viac jasný, pretože ovplyvňuje celkové zosilnenie a dynamiku, pokiaľ τ_R mení povahu systému len dočasne.



obr. 3 Vplyv zosilnenia na dynamiku procesu



obr. 4 Vplyv časovej konštanty na dynamiku procesu

Z teoretických výsledkov a výsledkov simulácií je zrejmé, že jeden z najdôležitejších vplyvov recirkulácie je spomalenie odozvy systému, to znamená zvyšovanie celkovej časovej konštanty.

1.2 Vplyv oneskorenia recirkulácie

Ak recirkulačná väzba svojou zostavou predstavuje oneskorené chovanie, ktoré je spôsobené mŕtvym časom jednotky, jeho prenosová funkcia bude mať približne tvar

$$G_{RD}(s) = G_R e^{-\tau_{RD}s} \quad (1.8)$$

Kde τ_{RD} je dopravné oneskorenie, potom celková prenosová funkcia systému bude mať tvar

$$G_{SD}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G_M}{1 - G_M G_R e^{-\tau_{RD}s}} \quad (1.9)$$

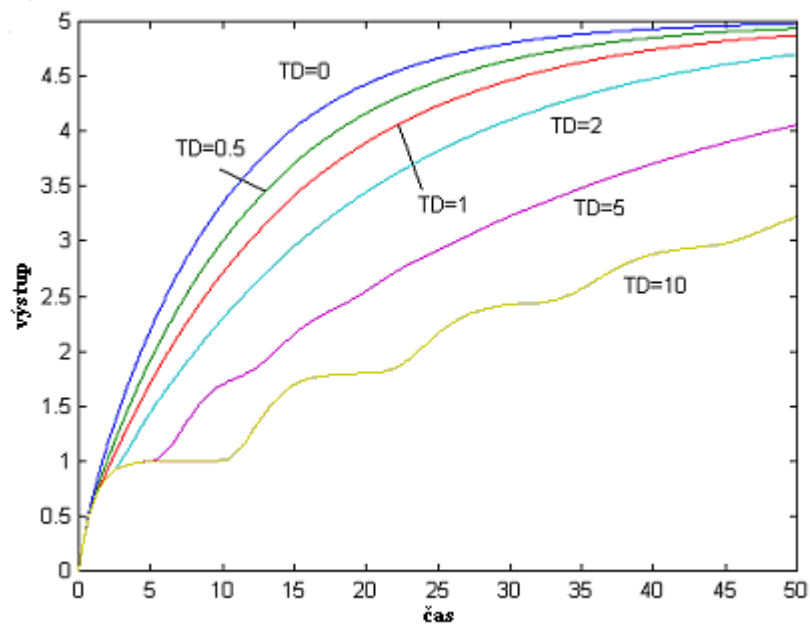
Ak si predstavíme, že recirkulačný proces je zložený z dynamických systémov 1. rádu dostaneme prenos rozšírený mŕtvym časom

$$G_{RD} = \frac{K_R e^{-\tau_{RD}s}}{\tau_R s + 1} \quad (1.10)$$

pre celkovú sústavu dostaneme

$$G_S = \frac{K_M (\tau_R s + 1)}{\tau_M \tau_R s^2 + (\tau_M + \tau_R)s + 1 - K_M K_R e^{-\tau_{RD}s}} \quad (1.11)$$

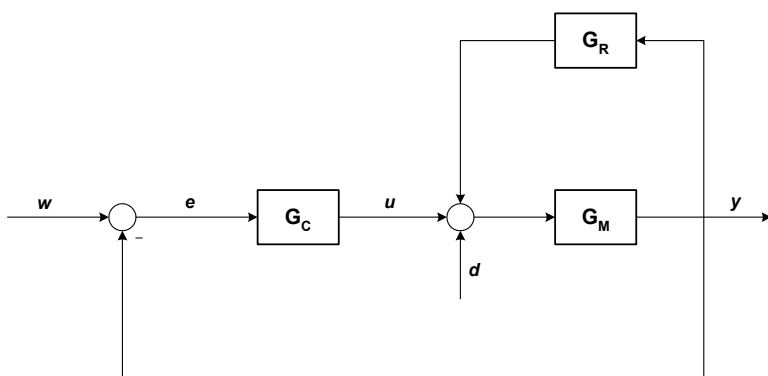
Tvar výstupných veličín pre rôzne hodnoty oneskorenia je zobrazený na *obr. 5* ($K_M = \tau_M = \tau_R = 1$, $K_R = 0,8$)



obr. 5 Vplyv oneskorenia na dynamiku procesu

2. UZAVRETÝ SYSTÉM S RECIRKULÁCIOU

Na elimináciu alebo redukovanie záporného vplyvu recirkulačného obvodu na celkovú dynamiku systému bol zavedený uzavretý regulačný obvod. Jeho jednoduchá schéma je znázornená na obr. 6. G_C je prenosová funkcia, u je riadiaca veličina, d je poruchová veličina, e je regulačná odchýlka a w je žiadaná veličina.



obr. 6 Uzavretý regulačný obvod s recirkuláciou

Na základe (1.1) výstup zo zariadenia y súvisí so žiadanou veličinou na základe prenosovej funkcie.

$$G_W = \frac{G_C G_S}{1 + G_C G_S} = \frac{G_M G_C}{1 - G_M G_R + G_M G_C} \quad (2.1)$$

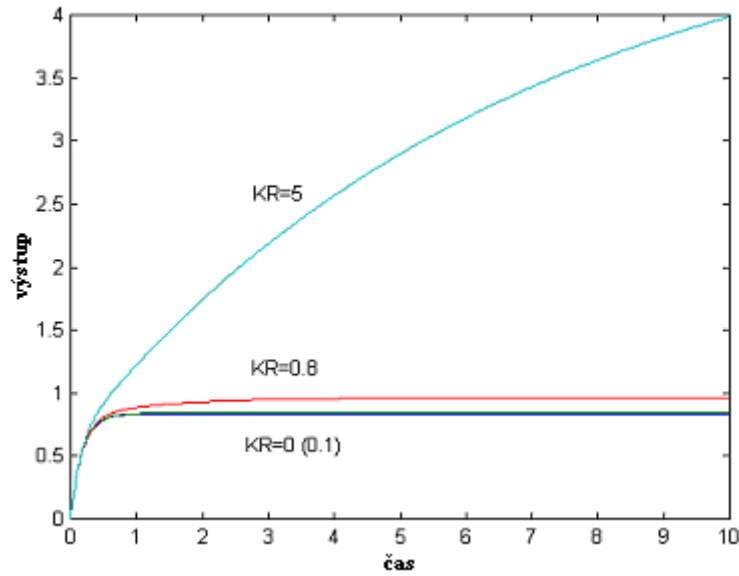
2.1 Proporcionálny (P) regulátor

Predstavme si sústavu prvého rádu opísanú rovnicou (1.2) a P regulátor, t. j. $G_C = K_C$, kde K_C je zosilnenie, potom prenosová funkcia má tvar

$$G_W = \frac{K_C K_M \tau_R s + K_M K_C}{\tau_M \tau_R s^2 + s(\tau_M + \tau_R + K_C K_M \tau_R) + 1 - K_M K_R + K_C K_M} \quad (2.2)$$

Jeho nežiadaný vplyv na dynamiku zariadenia sa zredukoval ako je znázornený na obr. 7. Počas simulácie boli používané nasledovné hodnoty a parametre regulátora:

$K_M=\tau_M=\tau_R=1$, $K_R=0,8$, $w=1$, $K_C=5$.



obr. 7 Vplyv zosilnenia recirkulačného obvodu na dynamiku procesu s P regulátorom

2.2 Proporcionálno – integračný (PI) regulátor

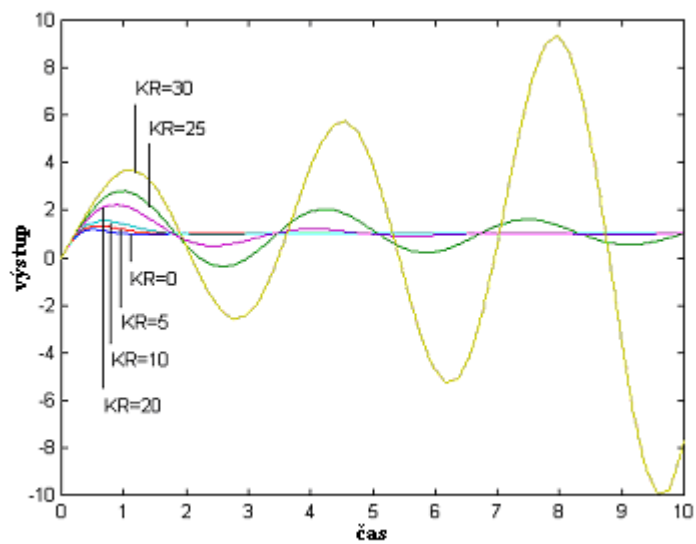
Na eliminovanie trvalej regulačnej odchýlky objavujúceho sa v prípade P regulátora, ktorá stúpa narastaním K_R , regulátor s integračnou činnosťou môže byť výhodný pre systémy s recirkuláciou. To však má za následok vyšší rád celkového systému a vedie k spomaleniu odozvy uzavretého systému. Predpokladajme PI regulátor opísaný prenosovou funkciou

$$G_C = \frac{K_C(T_I s + 1)}{T_I s} \quad (2.3)$$

a systému prvého rádu (1.2), potom charakteristická rovnica má tvar

$$\tau_M \tau_R s^3 + (\tau_M + \tau_R + \tau_R K_M K_C) s^2 + (1 - K_M K_R + \frac{\tau_R K_C K_M}{T_I} + K_C K_M) s + \frac{K_C K_M}{T_I} = 0 \quad (2.4)$$

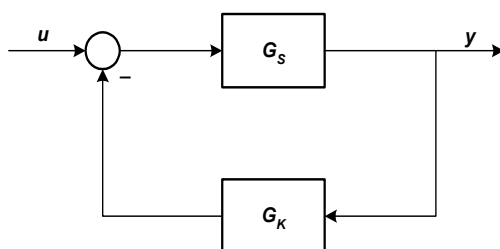
Vplyv zosilnenia recirkulácie na dynamiku procesu s PI regulátorom, pre zvolené parametre $K_M=\tau_M=\tau_R=1$, $K_C=5$, a $T_I=0,2$ a pre rôzne hodnoty K_R je znázornený na *obr. 8*.



obr. 8 Vplyv zosilnenia recirkulačného obvodu na dynamiku procesu s PI regulátorom

3. KOMPENZÁCIA RECIRKULAČNÝCH EFEKTOV

Negatívny vplyv recirkulácie môže byť odstránený použitím kompenzátora recirkulácie (*obr. 9*), kde G_S je definovaný rovnicou (1.1) a G_K je kompenzátor.

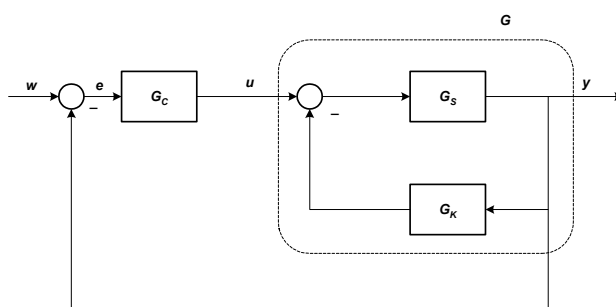


obr. 9 Recirkulačný obvod kompenzátorom

Prenosová funkcia kompenzovanej sústavy je

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G_S}{1 + G_S G_K} \quad (3.1)$$

Ak sa kompenzátor v rovnici (2.16) dá realizovať a nie sú modelové odchýlky, efekt recirkulácie môže byť úplne eliminovaný a riadiace zariadenie G_C na *obr. 10* môže byť navrhnutý aj na procesy bez recirkulácie.



obr. 10 Spätnoväzbový recirkulačný obvod kompenzátorom

Analyzujeme správanie kompenzovaného systému. Prenosová funkcia kompenzátora má tvar

$$G_K = \frac{K_K}{\tau_K s + 1} \quad (3.2)$$

Problém nezhody modelu v recirkulácii môže viesť k štyrom rôznym prípadom :

a) Ideálny prípad: $G_K \equiv G_R$, to znamená $G = G_M$ (3.3)

b) $G_K \neq G_R$: $\tau_R = \tau_K$, $K_R \neq K_K$, potom

$$G = \frac{K_M(\tau_R s + 1)}{\tau_M \tau_R s^2 + (\tau_M + \tau_R)s + 1 - K_M K_R + K_M K_K} \quad (3.4)$$

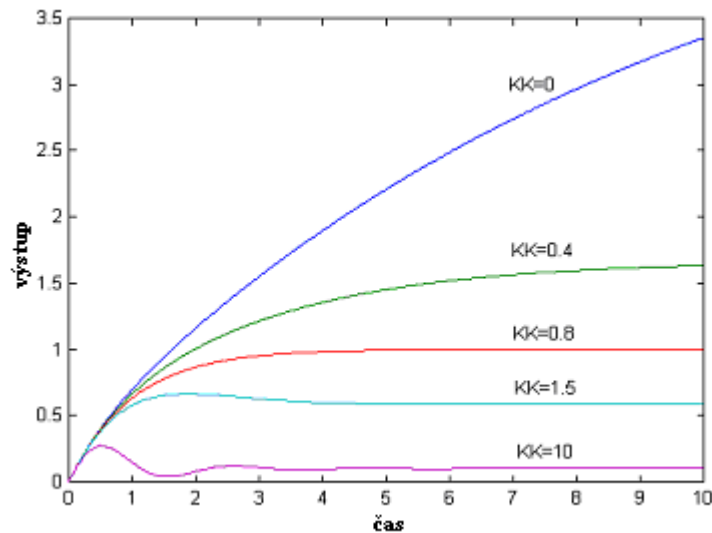
c) $G_K \neq G_R$: $K_K = K_R$, $\tau_K \neq \tau_R$, potom

$$G = \frac{K_M(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1)}{(\tau_M s + 1)(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1)} \quad (3.5)$$

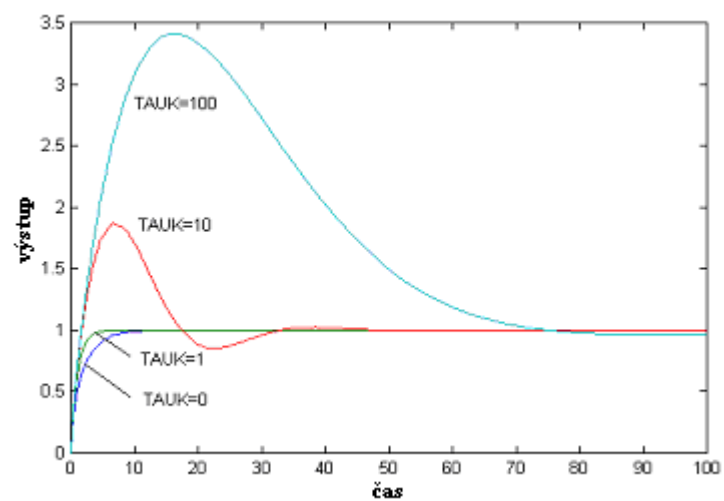
d) $G_K \neq G_R$: $K_K \neq K_R$, $\tau_K \neq \tau_R$, potom

$$G = \frac{K_M(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1)}{(\tau_M s + 1)(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1) - K_M K_R + K_M K_K} \quad (3.6)$$

Ako môžeme vidieť najhorší je prípad d), kde kompenzátor zhoršuje celkovú charakteristiku tým, že zvyšuje rád a zmení zosilnenie. Ideálny prípad a) je ťažko splniteľný za normálnych okolností. Na demonštráciu prípadov b) a c) ako najviac realistických vidíme vplyv nezhody modelu medzi recirkulačným obvodom a kompenzátorom počas zmeny zosilnenia kompenzátora K_K a časovej konštanty kompenzátora τ_K . Pribehy sú znázornené na *obr. 11* a *obr. 12*. Simulácie boli vykonané pre parametre $K_M = \tau_M = \tau_R = 1$, $K_R = 0,8$; a $\tau_K = 1$ a $K_K = 0,8$



obr. 11 Vplyv zosilnenia kompenzátora na dynamiku procesu



obr. 12 Vplyv časovej konštanty kompenzátora na dynamiku procesu

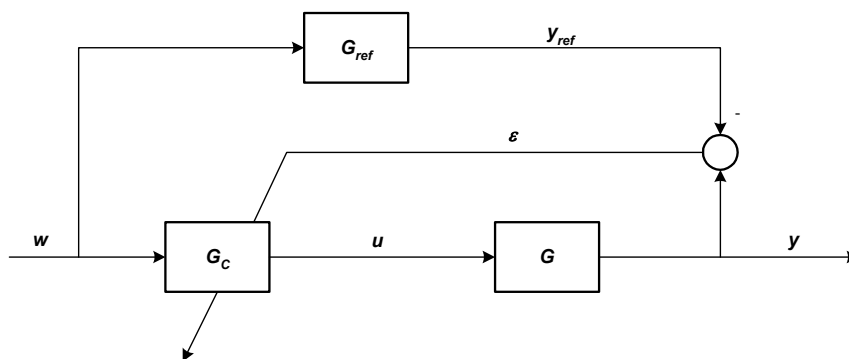
4. ADAPTÍVNE NAVRHOVANIE ZOSILNENIA

Z analýzy vidíme, že kompenzátor sám nezvládne riadenie sústavy s recirkuláciou. Problém nezhody modelu medzi recirkuláciou a jeho kompenzovaným modelom môže byť prekonaný rozšírením návrhu riadenia na adaptívne.

Adaptívne riadenie je riadenie, ktoré sa prispôsobuje neznámym meniacim sa vlastnostiam riadených systémov. Je možné realizovať rôznymi spôsobmi. Jeden zo spôsobov je adaptívne riadenie pomocou referenčného modelu (MRAS). Cieľom tohto spôsobu riadenia je prispôbiť odozvu sústavy k požadovanému chovaniu pri konštantných poruchových veličinách, taktiež odstrániť vplyv poruchových veličín pri konštantnom riadení.

Na optimalizáciu celkového zosilnenia procesu je prijaté pravidlo MIT, ktoré je založené na stratégii adaptívneho riadenia otvoreného obvodu a aplikované v zmysle referenčného modelu systému (MRAS). Štruktúra adaptívneho systému je zobrazená na obr. 13, kde G_{REF} označuje referenčný model s výstupom y_{REF} a ε je referenčná odchýlka.

$$\varepsilon(t) = y - y_{ref} \quad (4.1)$$



obr. 13 Bloková schéma adaptívneho navrhovania zosilnenia

Nech K_C je jediný nastaviteľný parameter regulátora G_C , potom adaptívny zákon, ktorý požaduje aby nasledovná účelová funkcia splnila podmienku

$$J(K_C) = \frac{1}{2} \varepsilon^2(t) = \min \quad (4.2)$$

predpokladajúci jedno nastaviteľné adaptívne zosilnenie γ je nasledovný

$$\frac{dK_C}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial K_C} = -\gamma \varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial K_C} \quad (4.3)$$

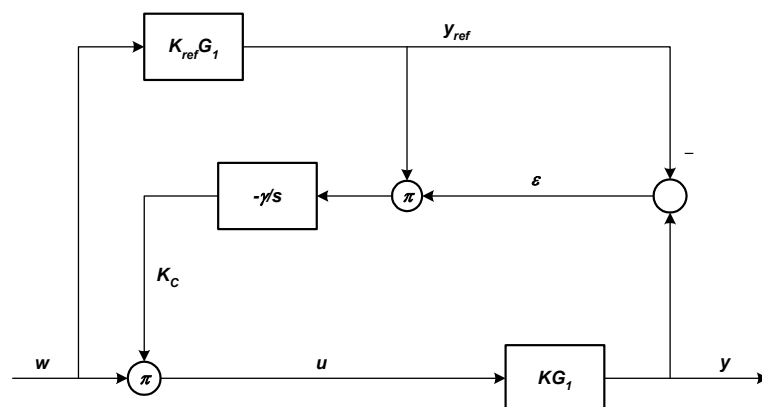
Nech $G(s) = KG_1(s)$ nahradzuje sústavu s recirkuláciou s presne určenou dynamikou a zle určeným stacionárnym zosilnením K . Chceme udržiavať celkové zosilnenie sústavy na požadovanej hodnote K_{REF} . To vyžaduje, aby referenčný model bol určený ako

$$G_{ref}(s) = K_{ref} G_1(s) \quad (4.4)$$

Predpokladajme pre simulačnú analýzu adaptívnej kompenzovanej sústavy s recirkuláciou konfiguráciu systému prvého rádu. Adaptívny zákon riadenia je nasledujúci

$$\frac{dK_C}{dt} = -\gamma' \frac{\partial \varepsilon}{\partial K_C} \varepsilon = -\gamma' \frac{K}{K_0} y_{ref} \varepsilon = -\gamma \cdot y_{ref} \varepsilon \quad (4.5)$$

Realizovateľná regulačná schéma je uvedená na *obr. 14*, kde K_{G1} zahŕňa recirkulačnú sústavu s kompenzátorom.



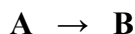
Obr. 14 Schéma pre adaptívne navrhovanie zosilnenia

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

5. NELINEÁRNY SYSTÉM REAKTOR - REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA

Proces pozostáva z chemického reaktora a rektifikačnej kolóny (*obr. 14*). Chovanie takých systémov závisí od rôznych komplikovaných javov, napr. výmena tepla alebo difúzia sú často tak komplikované, že sa dajú opísať len zavedením určitých zjednodušujúcich podmienok.

Základom skúmaného procesu je prietokový chemický reaktor s objemom V , v ktorom prebieha nevratná chemická reakcia prvého rádu

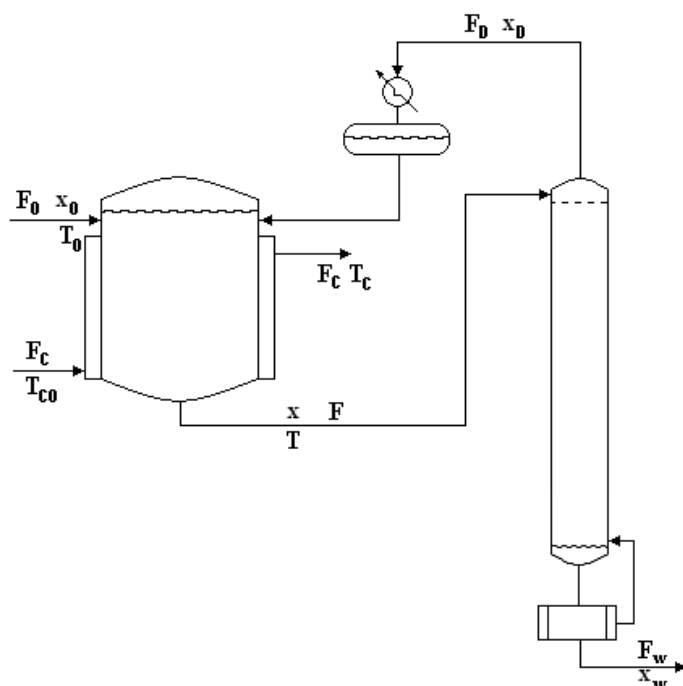


pri odvodu tepla plášťom, teplovýmennou plochou A . Do reaktora sa privádza reakčná zmes, s prietokom F_0 , vstupným zložením x_0 a teplotou T , a recirkulačný prúd z hlavy kolóny s prietokom F_D a zložením x_D . Teplota v reaktore je T . Pri skúmaní dynamických vlastností prietokového reaktora sa musia brať do úvahy aj dynamické vlastnosti chladiaceho média. Materiálová a entalpická bilancia reaktora odpovedajú rovniciam (1. .) až (1. .).

Z dna reaktora je odvádzaný produkt s prietokom F a zložením x , ktorý obsahuje väčšie množstvo nezreagovanej látky A , preto tento prúd je privedený do rektifikačnej kolóny, kde sa oddelia jednotlivé zložky. Predpokladajme, že sa bude destilovať zmes s konštantnou relatívnou prchavosťou α a 100% účinnosť etáží. Kolóna pozostáva zo 14 etáží, nástrek sa privádza na prvú etáž. Prietok pár a kvapaliny kolónou sú považované za konštantné, podobne ako aj relatívna prchavosť. Z dna kolóny odteká produkt (látka B), s rýchlosťou F_w a zložením x_w , z hlavy kolóny je odvádzaný destilát, obsahujúci zložku A , s rýchlosťou F_D a zložením x_D , ktorý je privádzaný naspäť do reaktora ako spätný (tzv.

recirkulačný) tok. Zvyšok odtekajúci z dna kolóny, je jediný prúd, ktorým materiál opúšťa celú sústavu, a nástrek do reaktora je jediný prúd, ktorým sa materiál privádza do sústavy.

V procese je uvažovaný aj mŕtvy čas (DO), ktorého vplyv na dynamiku sústavy bol vyšetrený simuláciou skokových zmien pri rôznych hodnotách mŕtveho času.



- F_0 – prietok nástreku
- x_0 – mólový zlomok nástreku
- T_0 – teplota nástreku
- F_c – prietok CHM
- T_{c0} – teplota CHM na vstupe
- T_c – teplota CHM na výstupe
- F – prietok produktu z reaktora
- x – mólový zlomok produktu
- T – teplota produktu
- F_D – prietok destilátu
- x_D – mólový zlomok destilátu
- F_w – prietok zvyšku
- x_w – mólový zlomok zvyšku

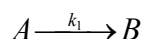
obr. 14 Jednoduchý systém s recirkuláciou

6. VYTVORENIE MATEMATICKÉHO MODELU

Na ukazovanie vplyvu recirkulácie na dynamiku systémov bol vytvorený model jednoduchého procesu.

6.1 REAKTOR

V reaktore prebieha nevratná reakcia prvého rádu



s rozsahom reakcie

$$\xi_v = k_1 x, \quad (6.1)$$

kde k_1 je rýchlosť reakcie

$$k_1 = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (6.2)$$

Matematický model je odvodený z materiálovej a entalpickej bilancie reakčnej zmesi (RZ) (rovnice () a ()) a entalpickej bilancie chladiaceho média (rovnica ()) (CHM)

Materiálová bilancia:

$$F_0 x_0 + v_A \xi_v V + F_D x_D = F x + \frac{d[Vx]}{dt} \quad (6.3)$$

Entalpická bilancia:

Reakčná zmes:

$$F_0 c_p T_0 + F_D c_p T_D = F c_p T + A k [T - T_c] + \xi_v V \Delta_r H + \frac{dV c_p T}{dt} \quad (6.4)$$

Chladiace médium:

$$F_c c_{pc} T_{c0} + A k [T - T_c] = F_c c_{pc} T_c + \frac{dV c_{pc} T_c}{dt} \quad (6.5)$$

6.2 REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA

V rektifikačnej kolóne delíme binárnu zmes. Nástrek zmesi sa privádza na prvú etáž ako vriaca kvapalina. Rovnováha medzi kvapalinou a parou je opísaná rovnicou rovnovážnej krivky ()

$$y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x_A} \quad (6.6)$$

kde α_{AB} je relatívna prchavosť zmesi a x_A je zloženie mólový zlomok látky A na jednotlivých etážach. Rovnice () opisuje materiálovú bilanciu kondenzátoru, rovnice () až () materiálovú bilanciu na etážach a rovnice () a () materiálovú bilanciu varáka.

V kondenzátore uvažujeme, že sa skondenzuje celé množstvo pary, a nepoužívame reflux.

$$n_v y_1 = D x_D + \frac{d[H_0 x_D]}{dt} \quad (6.7)$$

$$\text{1. etáž:} \quad n_F x_F + n_V y_2 = n_V y_1 + n_F x_1 + \frac{d[H_1 x_1]}{dt} \quad (6.8)$$

$$y_1 = f(x_1) \quad (6.9)$$

$$\text{i. etáž:} \quad n_F x_{i-1} + n_V y_{i+1} = n_V y_i + n_F x_i + \frac{d[H_i x_i]}{dt} \quad (6.10)$$

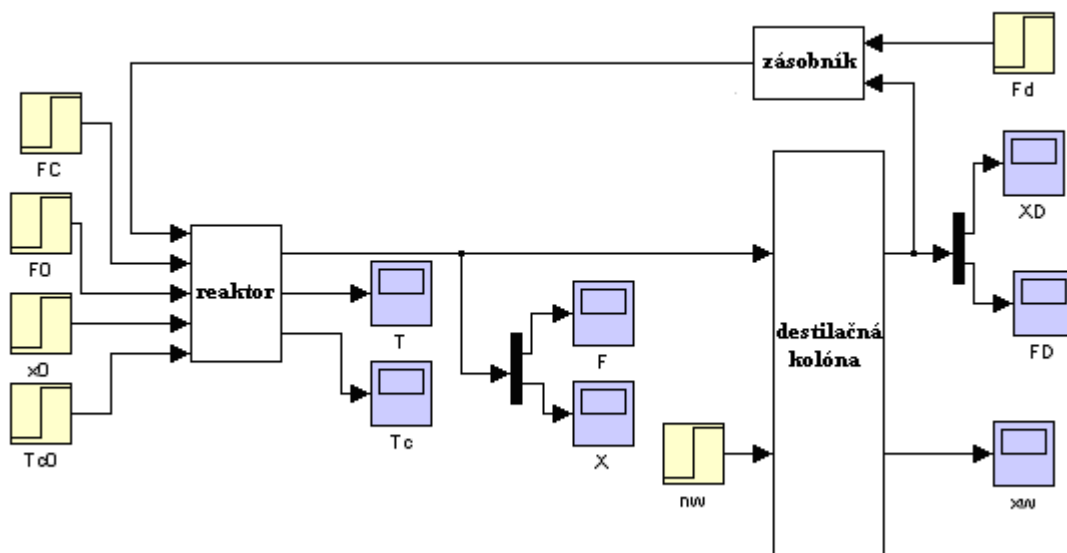
$$y_i = f(x_i) \quad (6.11)$$

$$\text{varák:} \quad n_F x_n = n_V y_{n+1} + n_F x_{n+1} + \frac{d[H_{n+1} x_{n+1}]}{dt} \quad (6.12)$$

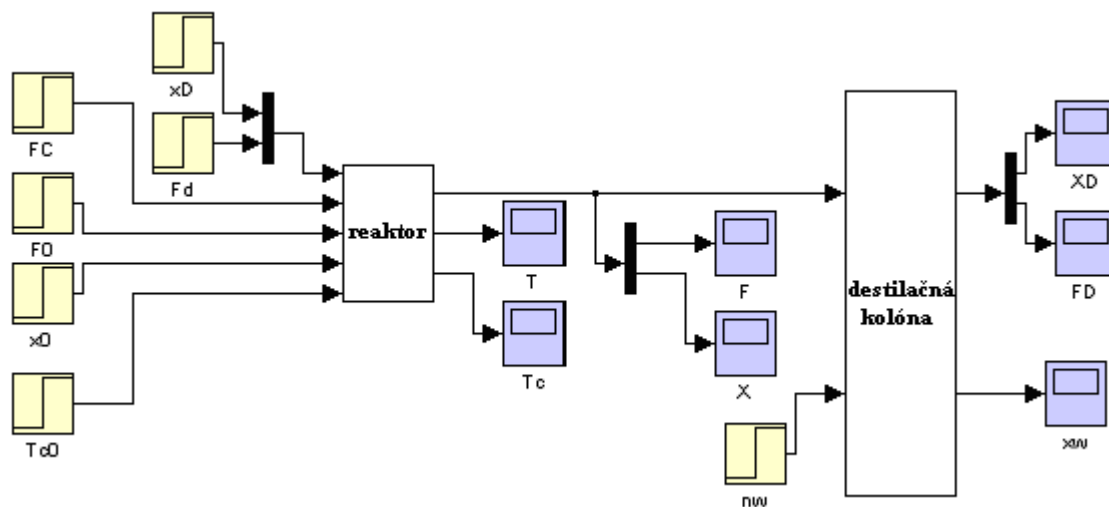
$$y_{n+1} = f(x_{n+1}) \quad (6.13)$$

7. ANALÝZA

Za účelom spoznania dynamiky systému a výberu riadiacich veličín boli vytvorené simulačné schémy sústavy s recirkuláciou a bez recirkulácie, ktoré sú znázornené na *obr. 15* a *obr. 16*, a boli vykonané simulácie na jednotlivé skokové zmeny vstupných veličín. Bol vyšetrený aj vplyv mŕtveho času na dynamiku sústavy simuláciou skokových zmien pri rôznych hodnotách mŕtveho času. Za výstupnú veličinu bolo zvolené zloženie produktu, čiže zloženie prúdu z dna rektifikačnej kolóny, lebo cieľom výrobného procesu je získavanie čistého produktu (látky B).



obr. 15 Simulačná schéma sústavy s recirkuláciou

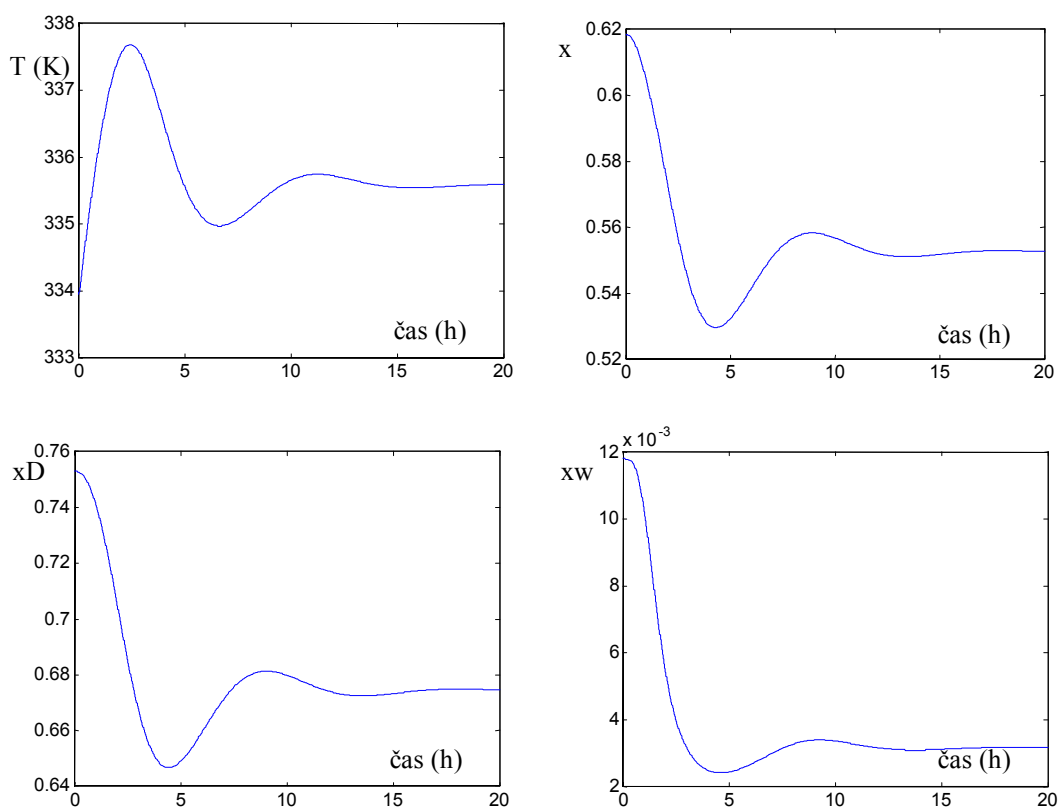


obr. 16 Simulačná schéma sústavy bez recirkulácie

Získané prechodové charakteristiky sú uvedené v prílohe diplomovej práce. Z uvedených grafov vyplýva, že za riadiace veličiny je možné zvoliť teplotu a prietok chladiaceho média a zloženie nástreku. Príslušné prechodové charakteristiky sú znázornené na obr.

Teplota chladiaceho média:

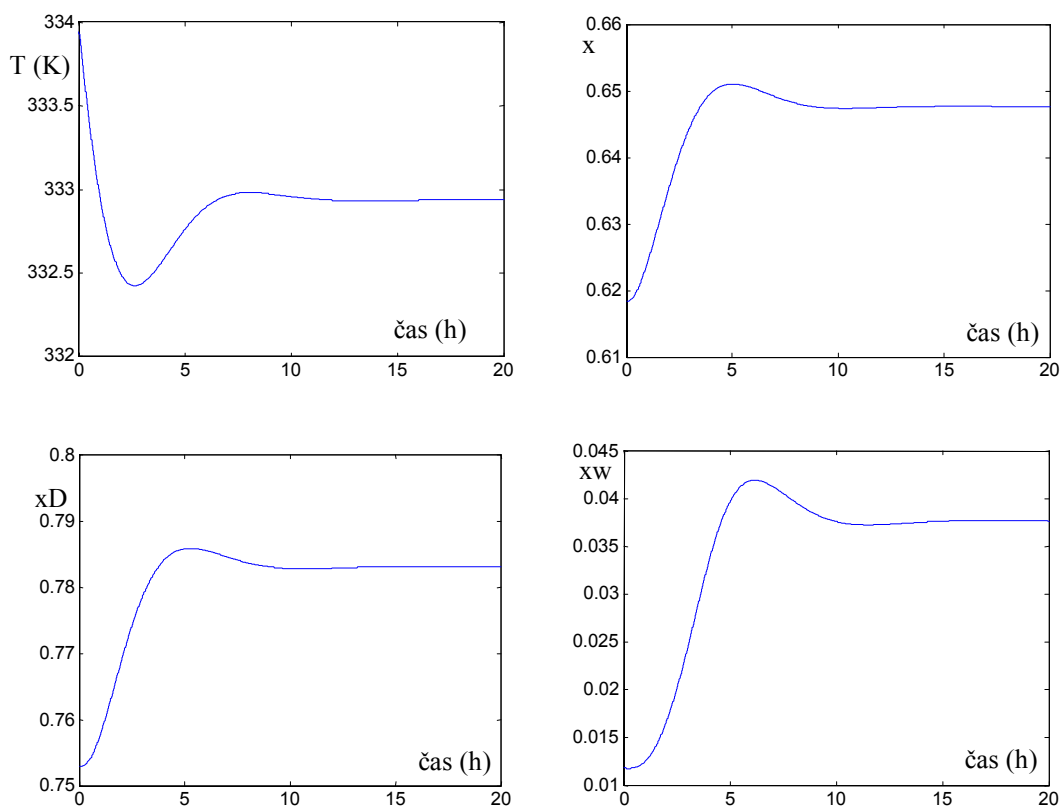
Zmena teploty chladiaceho média tiež dáva prechodové charakteristiky vyššieho rádu s malou časovou konštantou, z toho vyplýva, že zmenu teploty chladiaceho média môžeme používať ako riadiacu veličinu.



obr. 17 Odozvy systému (T , x , x_D , x_w) pre skokovú zmenu teploty chladiaceho média

Prietok chladiaceho média:

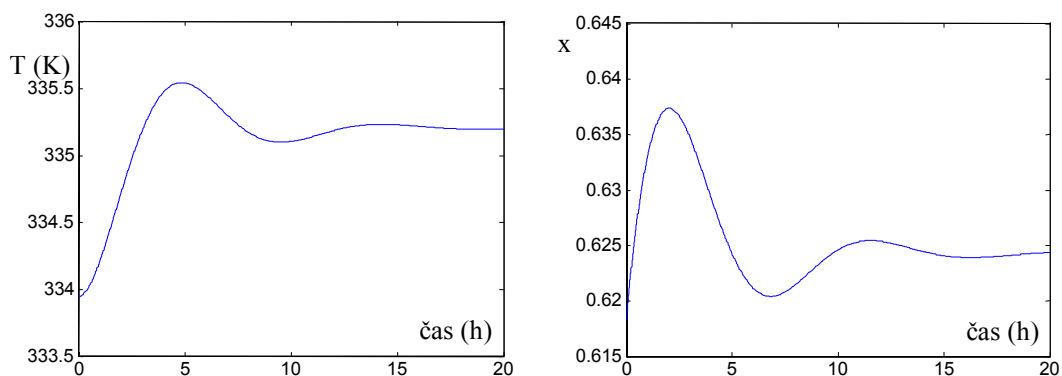
Zmena prietoku chladiaceho média dáva prechodové charakteristiky vyššieho rádu s malou časovou konštantou, to znamená, že zmena prietoku chladiaceho média tiež umožňuje riadenie sústavy.

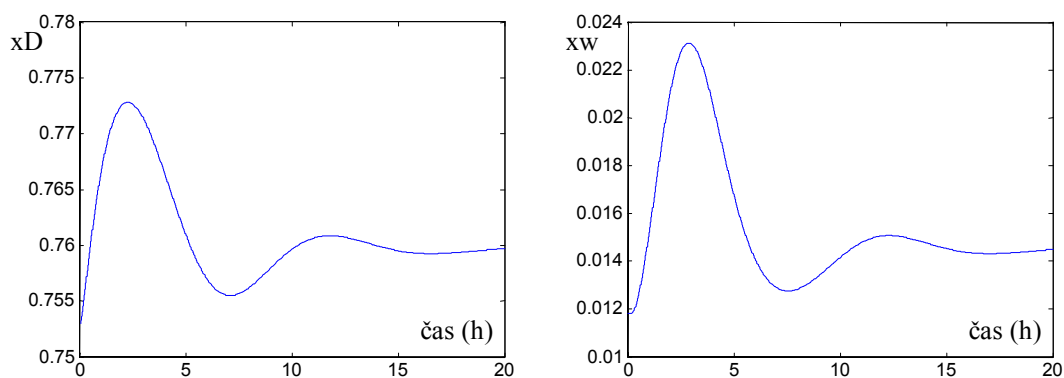


obr. 18 Odozvy systému (T , x , x_D , x_W) pre skokovú zmenu prietoku chladiaceho média

Zloženie reakčnej zmesi na vstupe do reaktora:

Zmena koncentrácie latky A v nástreku do reaktora dáva prechodové charakteristiky vyššieho rádu s malou časovou konštantou, z toho vyplýva, že zmenu koncentrácie latky A v nástreku môžeme používať ako riadiacu veličinu.

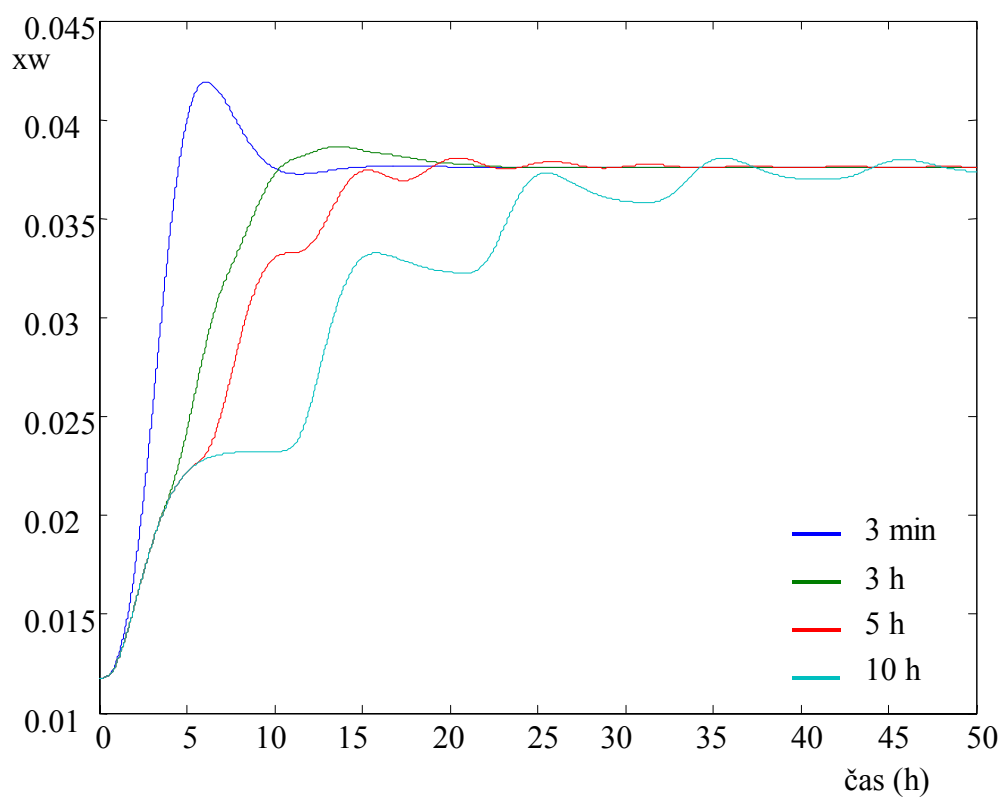




obr. 19 Odozvy systému (T , x , x_D , x_W) pre skokovú zmenu zloženia reakčnej zmesi na vstupe do reaktora

Mŕtvy čas (dopravné oneskorenie):

Dopravné oneskorenie má veľký vplyv na časovú konštantu celého zariadenia. Následkom príliš veľkého dopravného oneskorenia je schodiskový a kmitavý tvar prechodovej charakteristiky, ako je to znázornené na obr. 20.

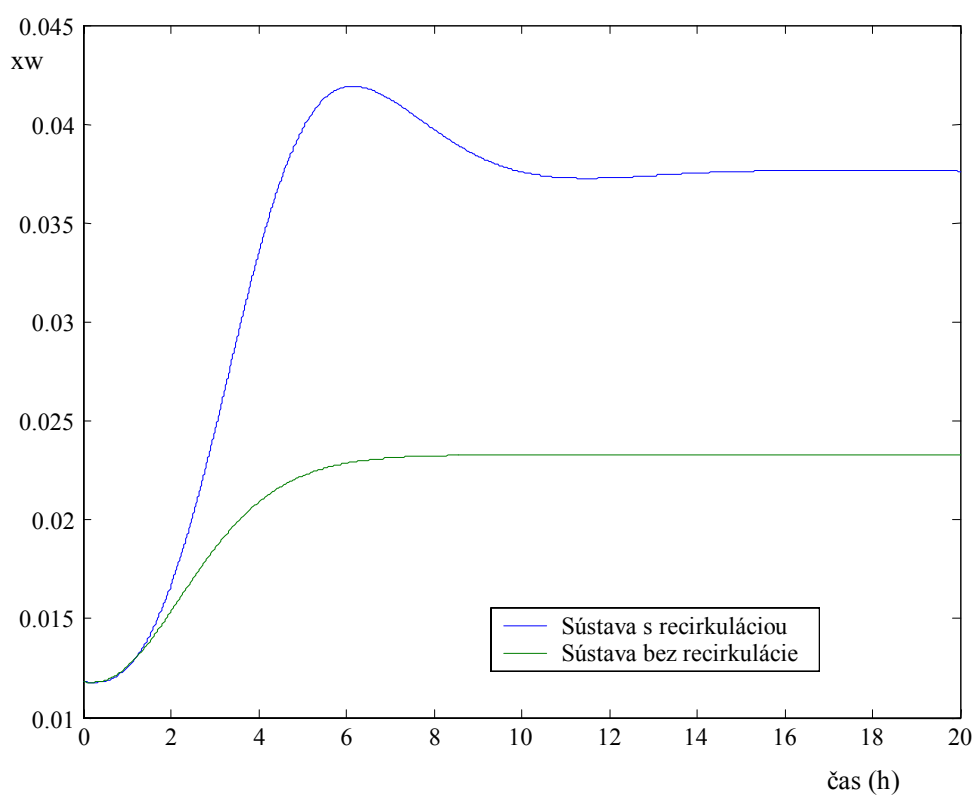


obr. 20 Zmena x_W vo zvyšku pri zmene dopravného oneskorenia

Riadenie systému používaním teploty chladiaceho média by bolo neekonomické, lebo je ťažké vyriešiť ohrev a chladenie chladiaceho média. Manipulácia prietoku je jednoduchá, preto je prietok chladiaceho média najvhodnejšou riadiacou veličinou.

POROVNANIE SYSTÉMU S RECIRKULÁCIOU A BEZ RECIRKULÁCIE

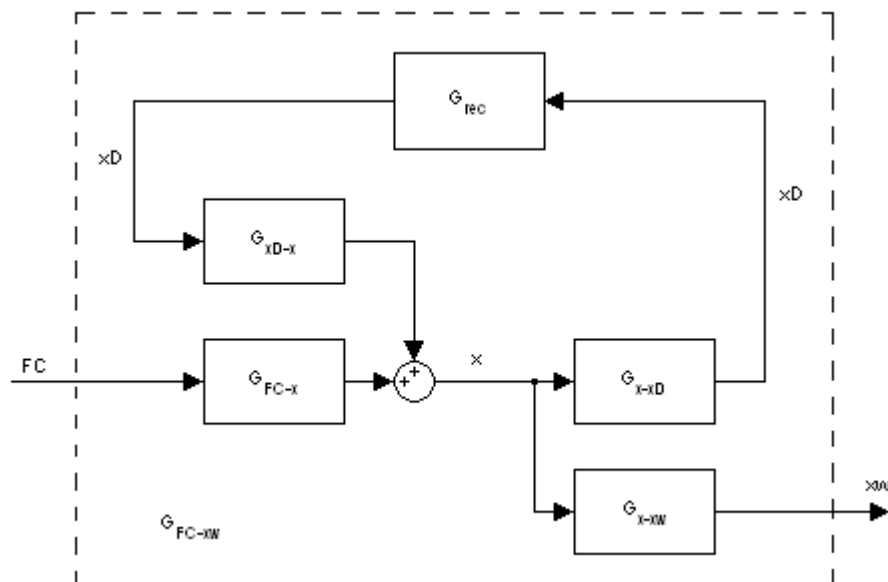
Za účelom porovnania systému s recirkuláciou a bez recirkulácie boli vykonané aj simulácie na skokové zmeny pre systém bez recirkulácie, čiže v ktorom je prerušený recirkulačný prúd. Je porovnaná prechodová charakteristika zloženia produktu (x_w) na skokovú zmenu prietoku chladiaceho média.



obr. 21 Porovnanie odoziev systému s recirkuláciou a bez recirkulácie

8. IDENTIFIKÁCIA

Za účelom získania lineárneho modelu sústavy (obr. 22) a prenosovej funkcie recirkulácie bola vykonaná identifikácia sústavy a jednotlivých častí sústavy.



obr. 22 Lineárny model sústavy reaktor - kolóna

Vo väčšine prípadov sústava bola identifikovaná ako systém druhého rádu (obr. 23) s prenosovou funkciou

$$\frac{Z}{T^2 s^2 + 2.T.\xi.s + 1} \quad (8.1)$$

Zosilnenie systému je dané ako hodnota prechodovej charakteristiky v nekonečne $Z = y(\infty)$.

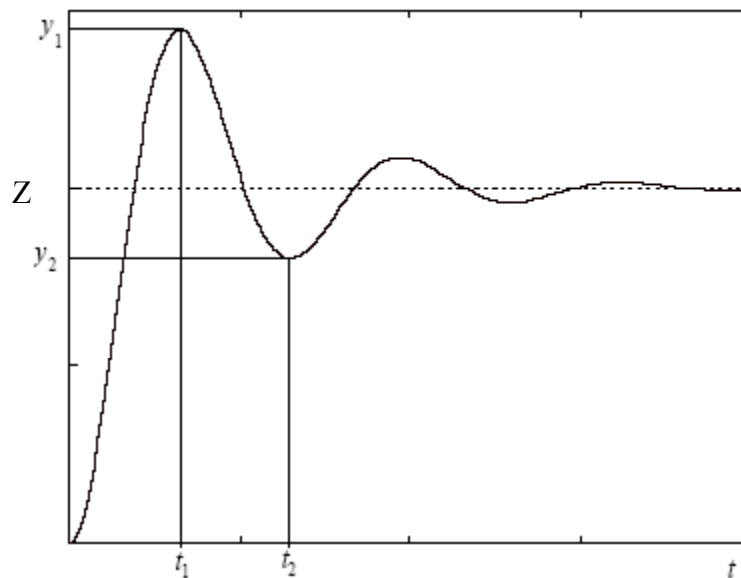
Postup získavania neznámych parametrov je potom nasledovný:

$$1. \quad Z = y(\infty), \quad (8.2)$$

$$2. \quad y_1 = Z(1 + M); y_2 = Z(1 - M^2) \Rightarrow M = \frac{y_1 - y_2}{y_1}, \quad (8.3)$$

$$3. \quad M = e^{-\frac{1}{P}\pi\xi} \Rightarrow \xi = \left| \frac{\ln M}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 M}} \right| \quad (8.4)$$

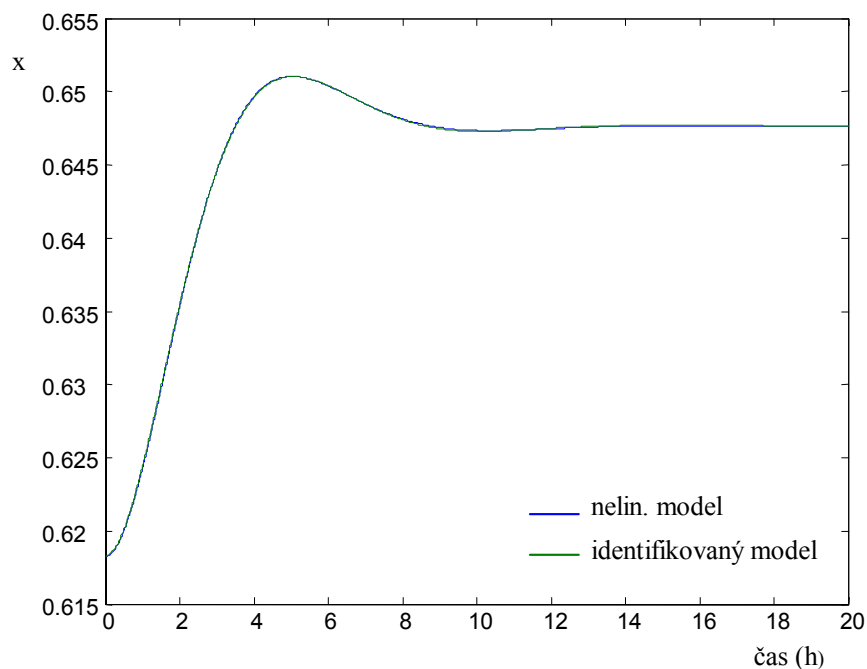
$$4. \quad t_1 = \frac{\pi}{\omega_0 P}, t_2 = \frac{2\pi}{\omega_0 P} \Rightarrow \omega_0 = \frac{\pi}{(t_2 - t_1)P}, T = \frac{1}{\omega_0}, \text{ kde } P = \sqrt{1 - \xi^2} \quad (8.5)$$



obr. 23 Prechodová charakteristika kmitavého systému

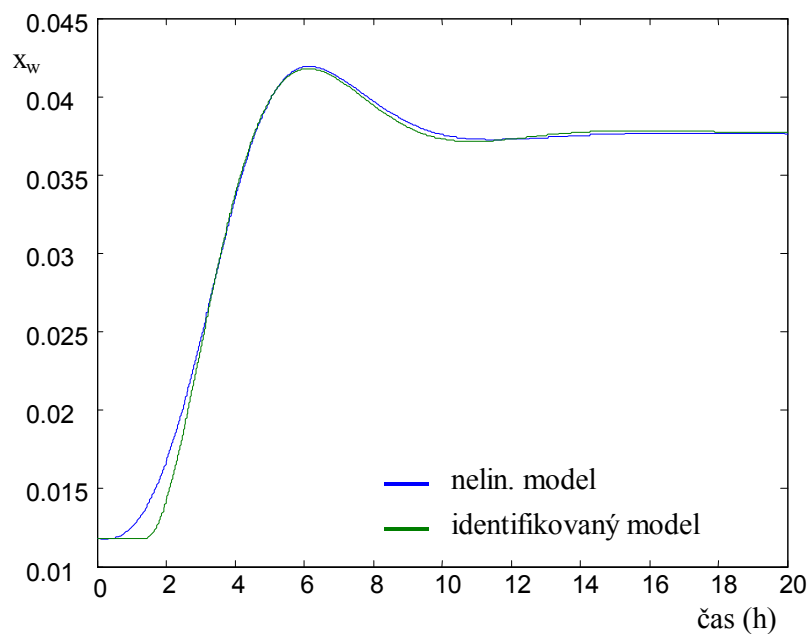
Získané prenosy boli odsimulované a porovnané s prechodovými charakteristikami nelineárneho modelu. Jednotlivé prechodové charakteristiky sú uvedené na obr. až obr.

$$\frac{0,00979}{1,33^2 s^2 + 2.1,33.0,568s + 1}$$



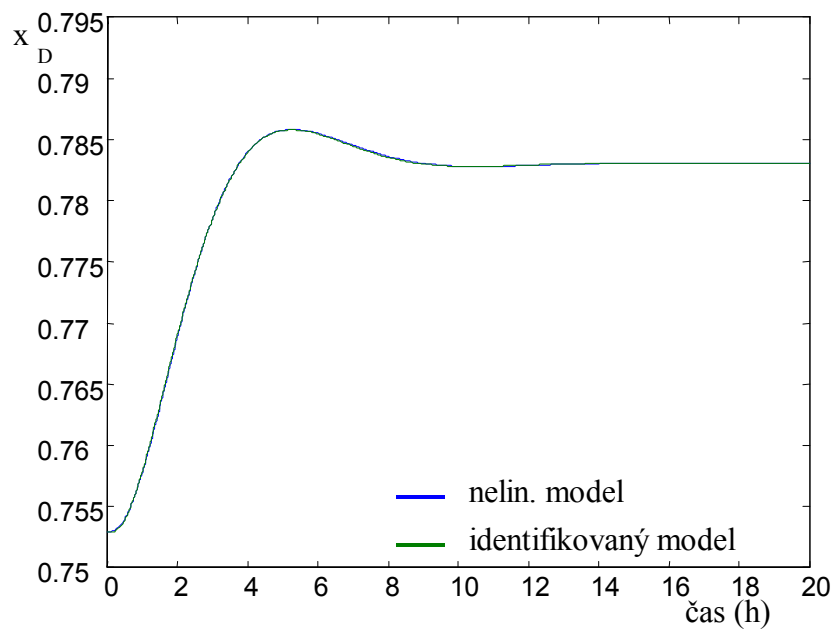
obr. 24 Porovnanie PCH (zloženie reakčnej zmesi) nelineárneho a lineárneho systému pre skokovú zmenu prietoku chladiaceho média

$$\frac{0,00865}{1,3^2 s^2 + 2.1,3.0,51s + 1} \text{ dopr. onesk } 1,4$$



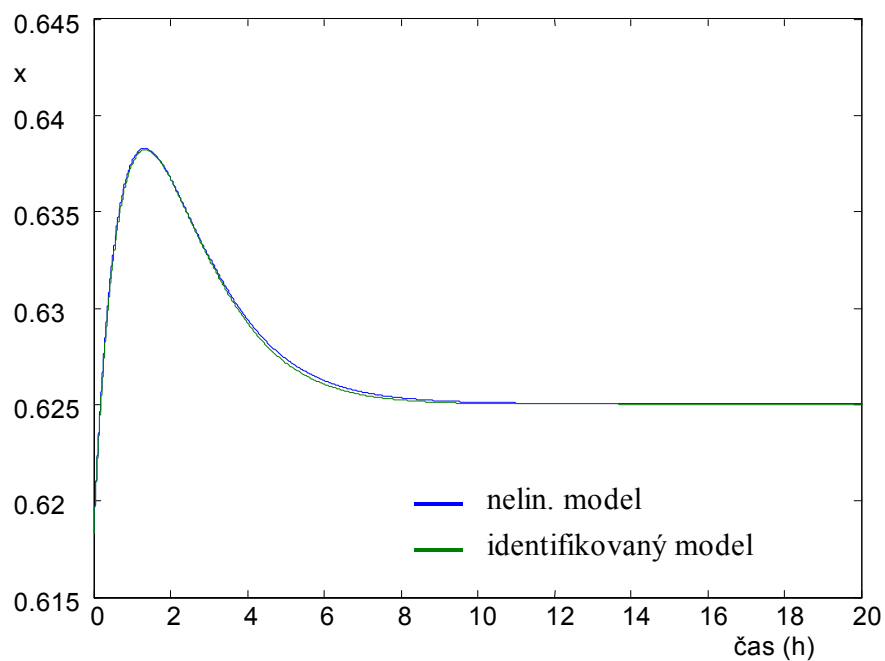
obr. 25 Porovnanie PCH (zloženie zvyšku) nelineárneho a lineárneho systému pre skokovú zmenu prietoku chladiaceho média

$$\frac{0,01005}{1,3^2 s^2 + 2.1,3.0,605s + 1}$$



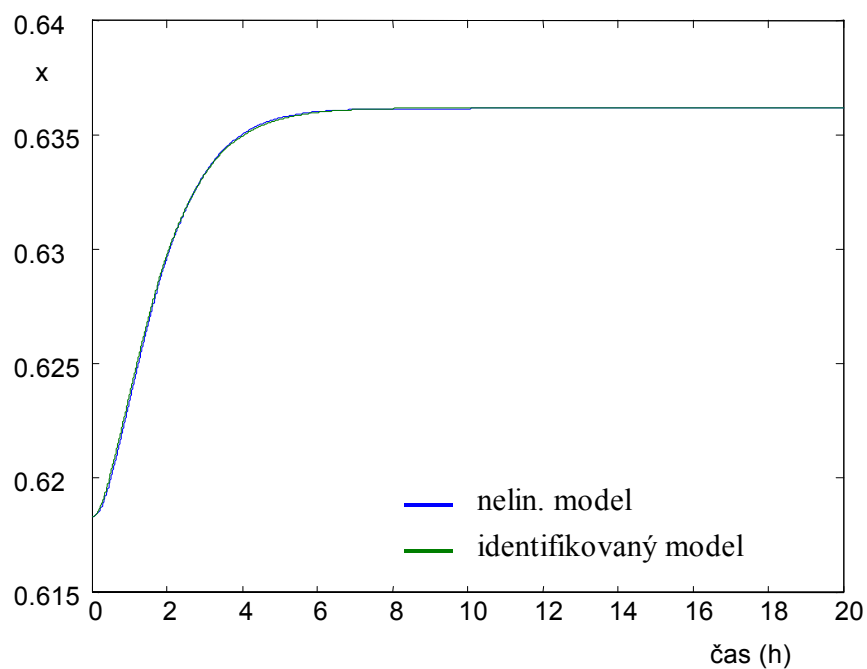
obr. 26 Porovnanie PCH (zloženie destilátu) nelineárneho a lineárneho systému pre skokovú zmenu prietoku chladiaceho média

$$G_{xD-x} = \frac{1,38s + 0,168}{1,15^2 s^2 + 2,15 \cdot 0,98s + 1}$$



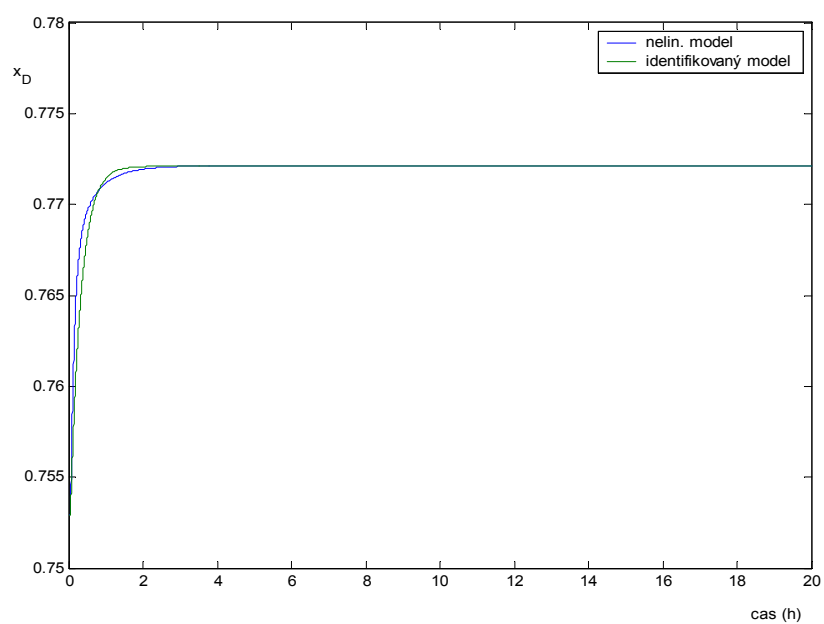
obr. 27 Porovnanie PCH (zloženie reakčnej zmesi) nelineárneho a lineárneho systému pre skokovú zmenu zloženia destilátu (pre reaktor)

$$G_{FC-x} = \frac{0,005966}{0,92^2 s^2 + 2,0,92 \cdot 1s + 1}$$



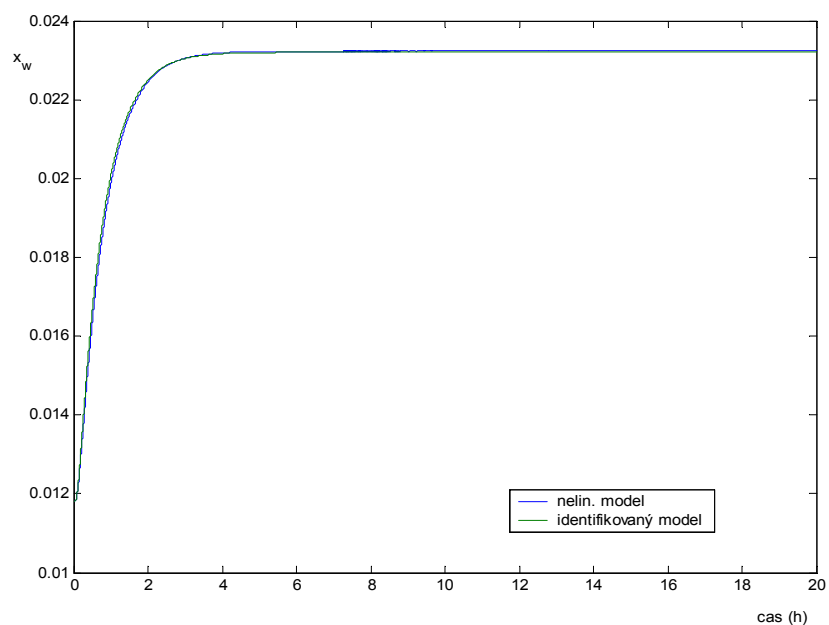
obr. 28 Porovnanie PCH (zloženie reakčnej zmesi) nelineárneho a lineárneho systému pre skokovú zmenu prietoku chladiaceho média (pre reaktor)

$$G_{x-xD} = \frac{1,07865}{0,285s + 1}$$



obr. 29 Porovnanie PCH (zloženie destilátu) nelineárneho a lineárneho systému pre skokovú zmenu zloženia reakčnej zmesi (pre kolónu)

$$G_{x-xw} = \frac{0,64045}{0,05s^2 + 0,75s + 1}$$



obr. 30 Porovnanie PCH (zloženie zvyšku) nelineárneho a lineárneho systému pre skokovú zmenu prietoku chladiaceho média (pre sústavu bez recirkulácie)

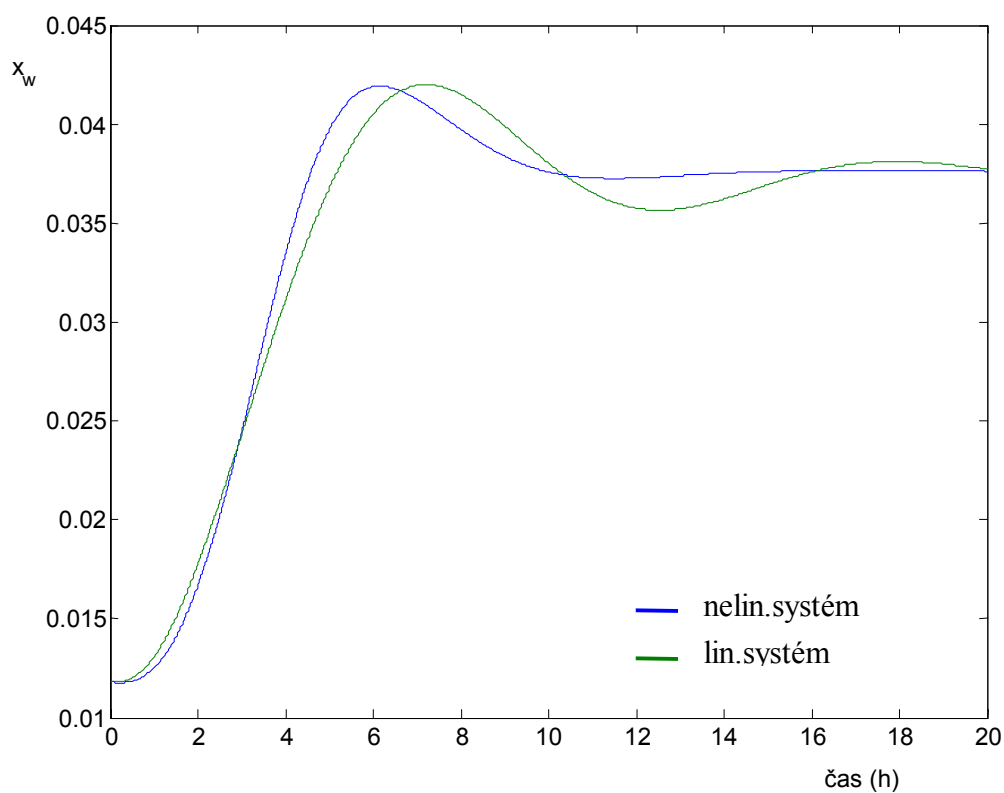
Z čiastkových prenosov bol vypočítaný celkový prenos systému (*obr. 22*) podľa rovnice ()

$$G_{FC-xw} = \frac{G_{x-xw} G_{FC-x}}{1 - G_{x-xD} G_{xD-x} G_{rec}} \quad (8.6)$$

Porovnávaním nelineárneho modelu s lineárnym modelom bol nastavený prenos recirkulácie, ktorý má tvar

$$G_{rec} = \frac{3.8s + 3.06}{s^2 + 0.9s + 1} \quad (8.7)$$

Na *obr. 31* je porovnaná prechodová charakteristika nelineárneho a lineárneho systému s recirkuláciou.

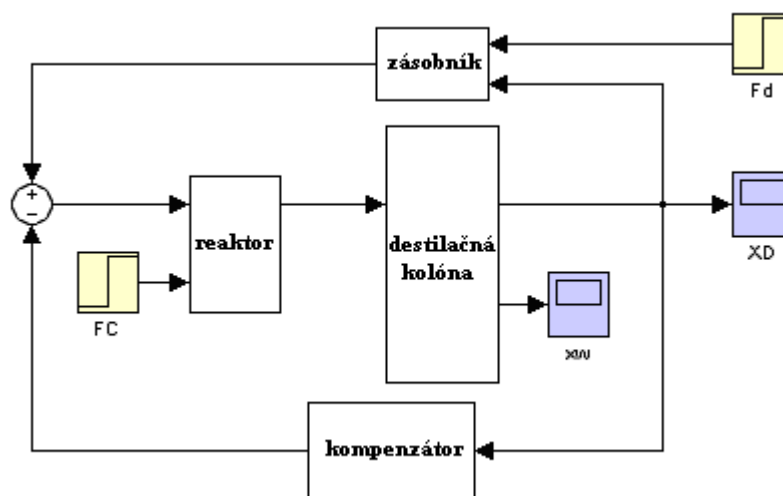


obr. 31 Porovnanie nelineárneho a lineárneho systému

9. KOMPENZÁCIA RECIRKULÁCIE

Na kompenzáciu negatívnych vplyvov recirkulácie Taiwo zaviedol kompenzátor recirkulácie (1986). Schéma zapojenia kompenzátoru je znázornená na obr. 9.

Na obr. 32 je znázornená simulačná schéma sústavy reaktor – rektifikačná kolóna s priamou kompenzáciou

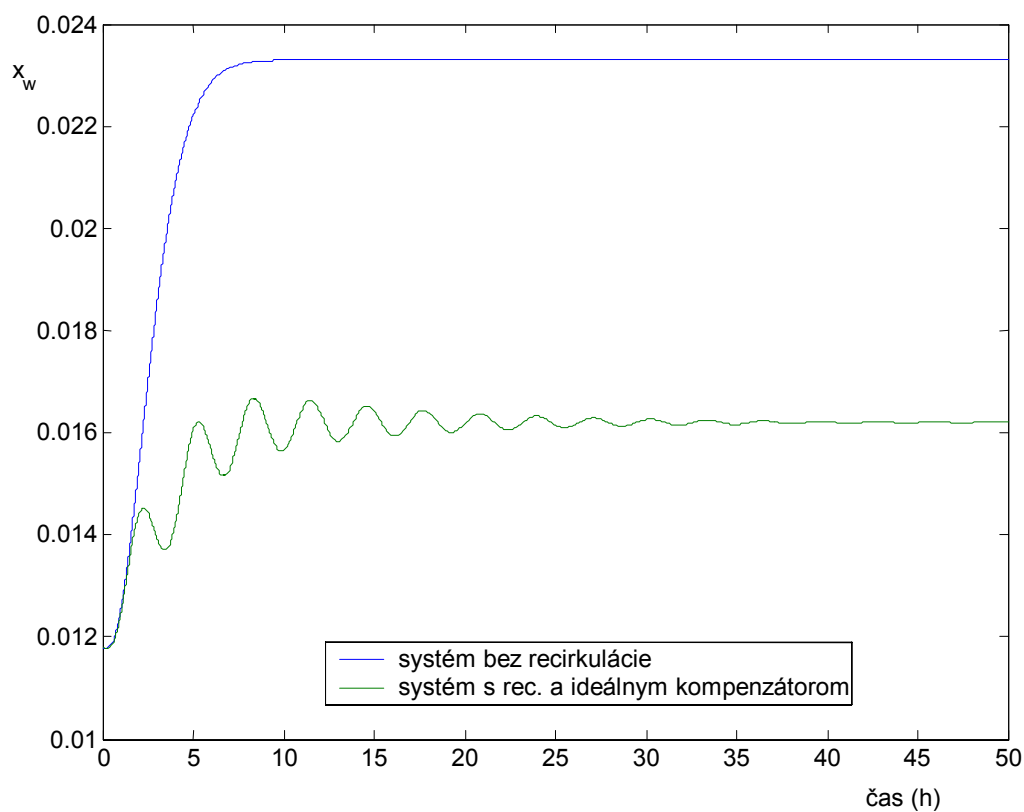


obr. 32 Simulačná schéma systému s kompenzátorom

a) *Ideálny prípad:* $G_K \equiv G_R \Rightarrow G = G_M$

$$G_K = G_R = \frac{3.8s + 3.06}{s^2 + 0.9s + 1}$$

Po vytvorení simulačnej schémy bola porovnaná prechodová charakteristika systému s recirkuláciou a ideálnym kompenzátorom s prechodovou charakteristikou systému bez recirkulácie (obr. 33).

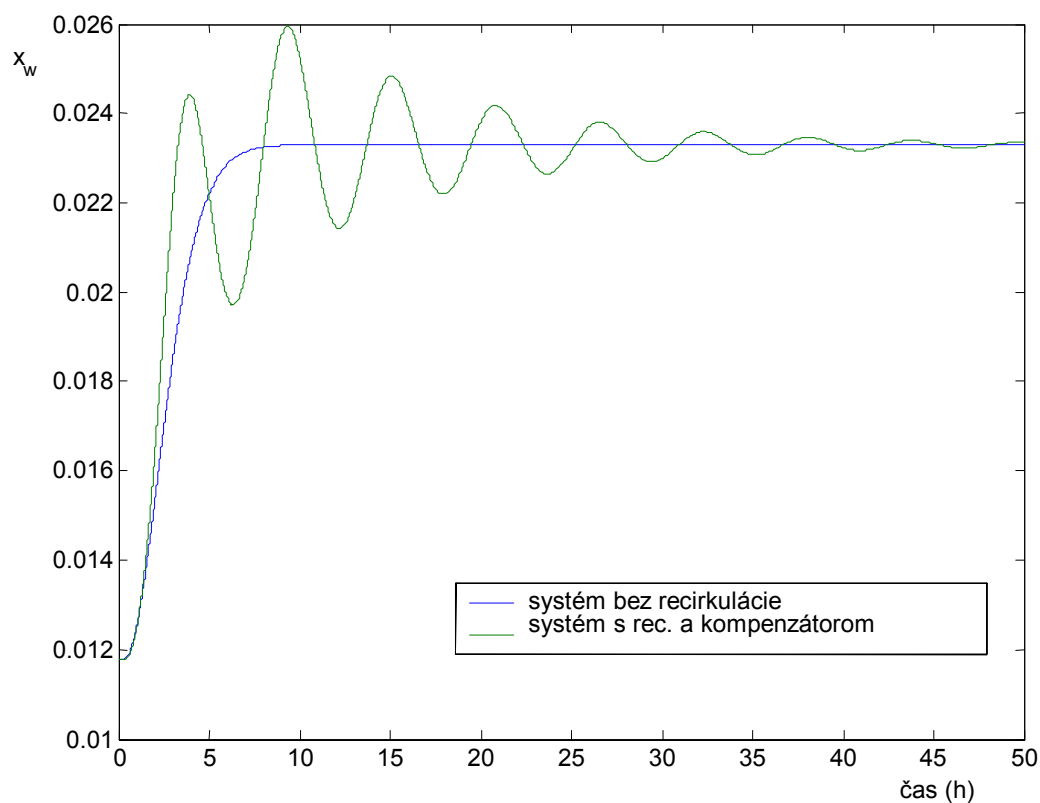


obr. 33 Porovnanie odozvy systému bez recirkulácie a systému s recirkuláciou a ideálnym kompenzátorom

Ako vidno z **obr. 33** ideálny prípad je ťažko splniteľný za normálnych okolností. Odozva sústavy je kmitavý a nedosiahne žiadanú hodnotu, lebo zosilnenie kompenzátoru je príliš veľké.

b) $G_K \neq G_R : \tau_R = \tau_K, K_R \neq K_K$

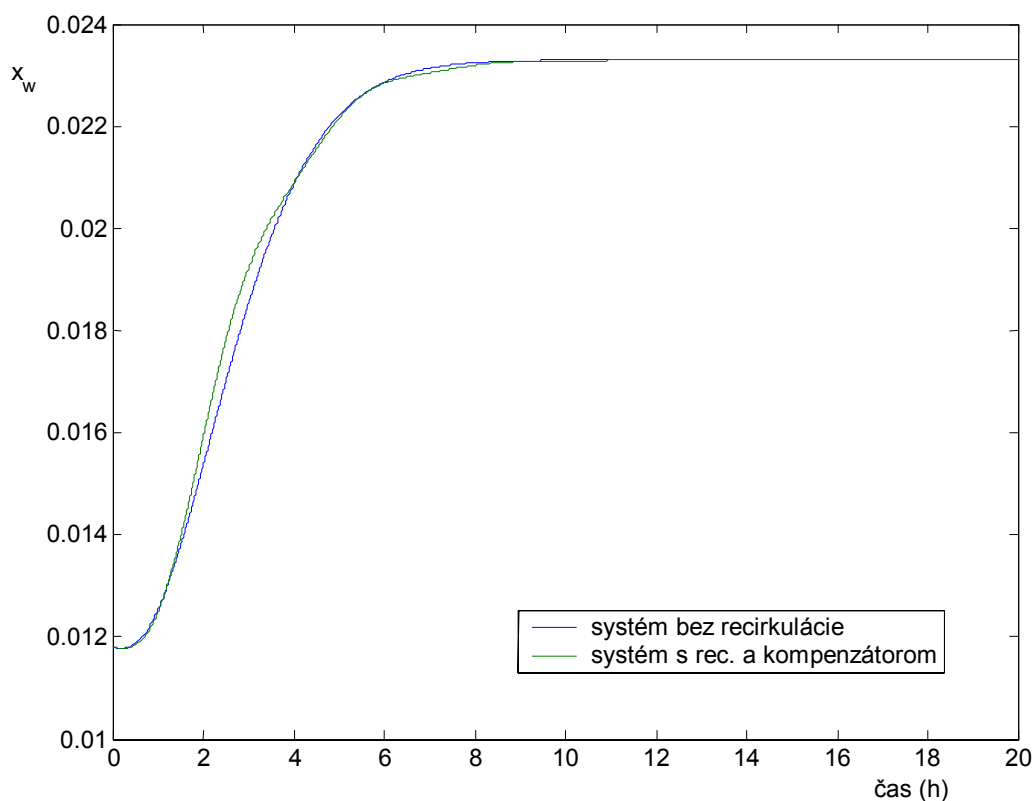
Znížením zosilnenia kompenzátoru na hodnotu $K_K=1$ prechodová charakteristika dosiahne danú hodnotu ale ponechá oscilačný charakter. (**obr. 34**)



obr. 34 Porovnanie odozvy systému bez recirkulácie a systému s recirkuláciou a kompenzátorom

c) $G_K \neq G_R : K_K \neq K_R, \tau_K \neq \tau_R$

Nastavením zosilnenia kompenzátora na hodnotu $K_K=1$ a znížením hodnoty časovej konštanty kompenzátora na hodnotu $\tau_K=0,4$ prechodová charakteristika dosiahne danú hodnotu. Síce kompenzátor dokáže kompenzovať recirkuláciu vo veľkej miere, ale kompenzátor zhoršuje celkovú charakteristiku tým, že zvyšuje rád a zmení zosilnenie.

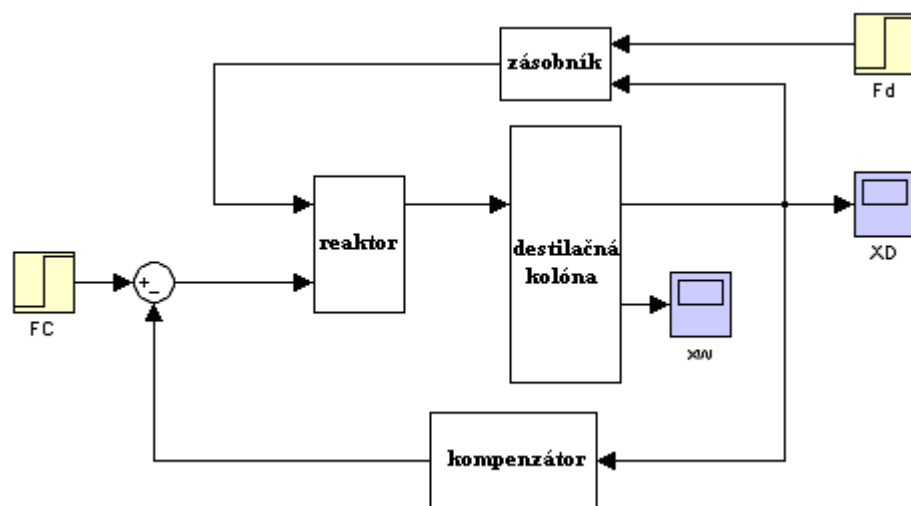


obr. 35 Porovnanie odozvy systému bez recirkulácie a systému s recirkuláciou a kompenzátorom

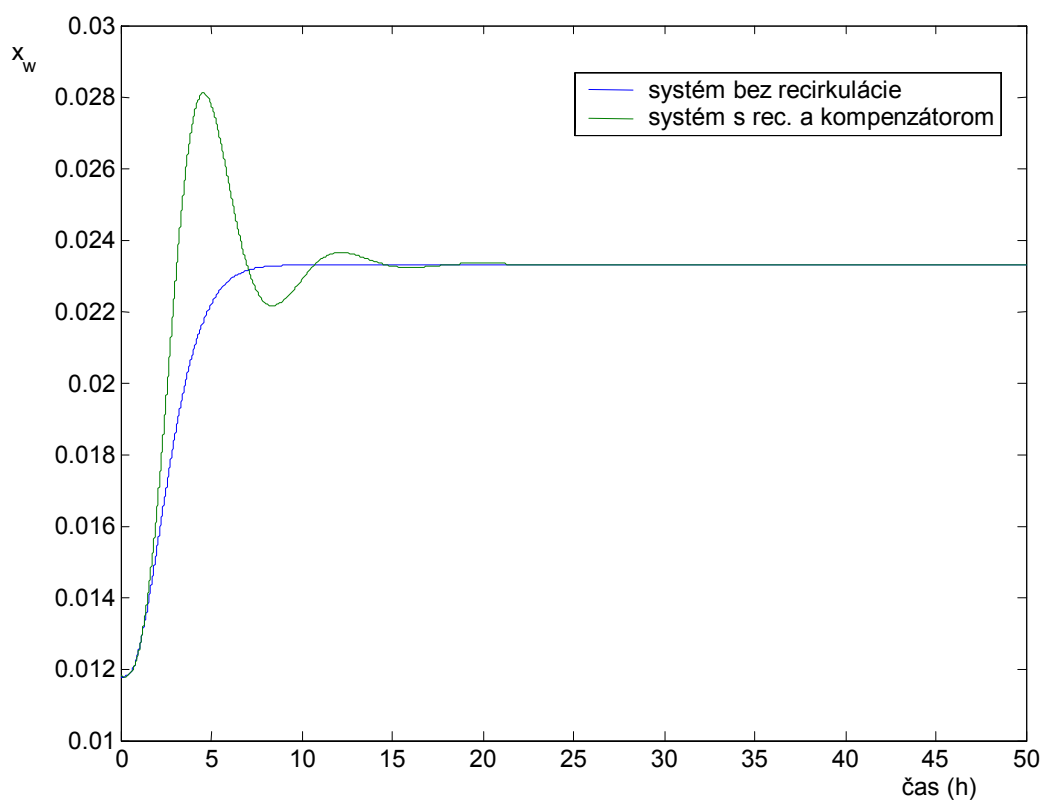
Navrhnutý kompenzátor kompenzuje priamo veličinu, ktorá spôsobuje odchýlku, čiže zloženie destilátu. Takáto kompenzácia je ťažko realizovateľná v praxi, preto boli vyšetrené aj iné možnosti kompenzácie recirkulácie. Sú to kompenzácia prietokom chladiaceho média, prietokom reakčnej zmesi, ktorú privádzame do reaktora.

I. Kompenzácia recirkulácie pomocou prietoku chladiaceho média (F_C)

Na **obr. 36** je znázornená simulačná schéma sústavy s kompenzátorom pomocou prietoku chladiaceho média.



obr. 36 Simulačná schéma systému s kompenzátorom pomocou prietoku chladiaceho média

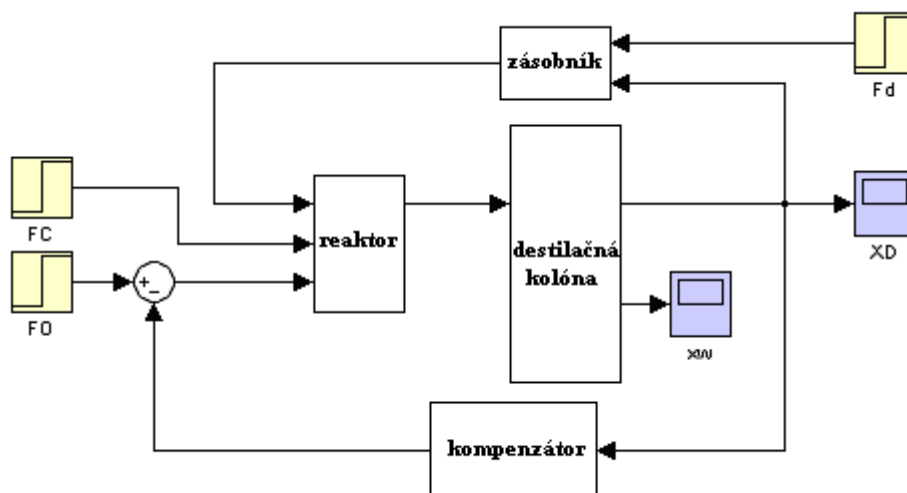


obr. 37 Porovnanie odozvy systému bez recirkulácie a systému s recirkuláciou a kompenzátorom

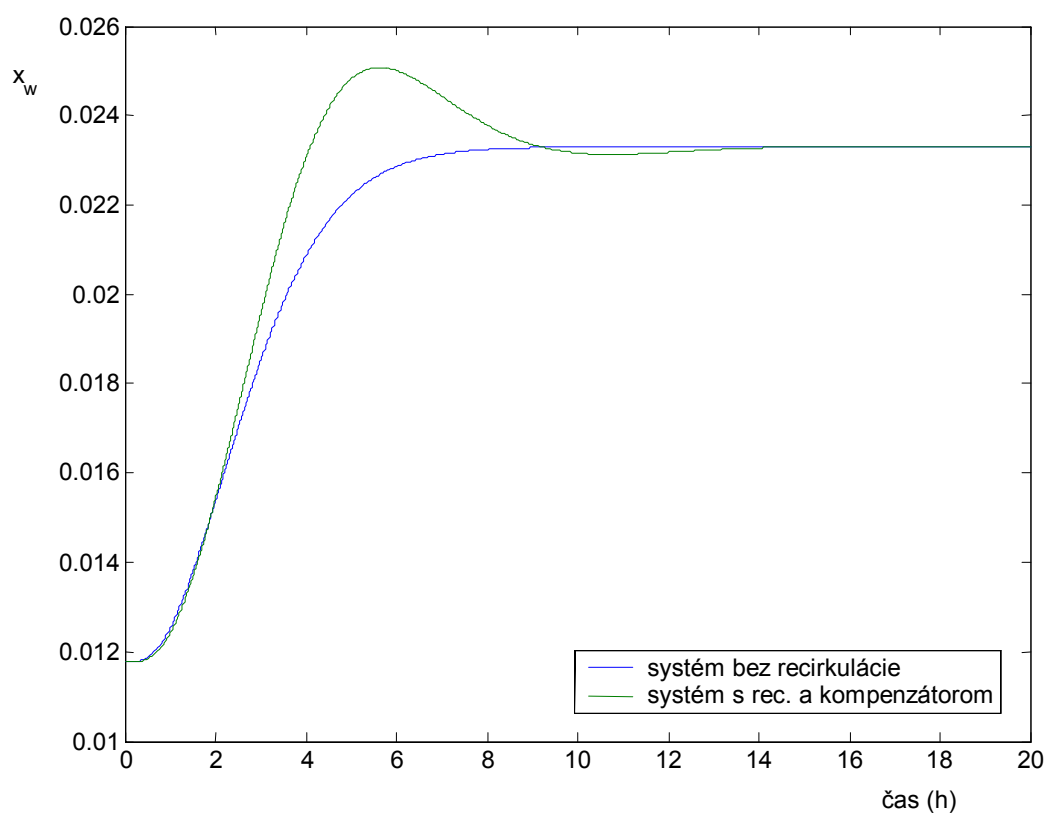
Porovnaním s priamou kompenzáciou takáto kompenzácia je ľahšie realizovateľná v praxi ale ako vidno na obr. 37 má horší priebeh odozvy.

II. Kompenzácia recirkulácie pomocou prietoku reakčnej zmesi (F_0)

Na obr. 38 je znázornená simulačná schéma sústavy s kompenzátorom pomocou prietoku chladiaceho média.



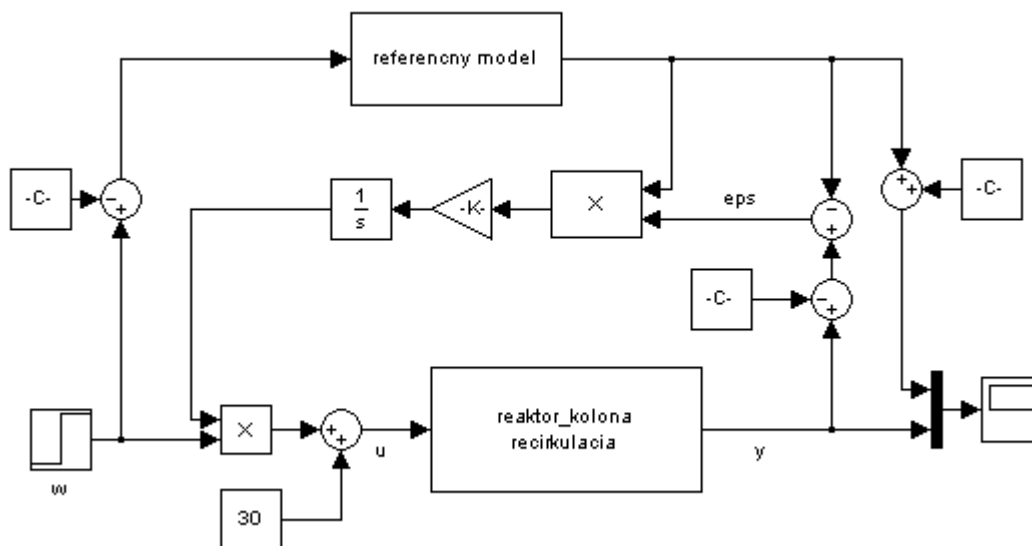
obr. 38 Simulačná schéma systému s kompenzátorom pomocou prietoku reakčnej zmesi



obr. 39 Porovnanie odozvy systému bez recirkulácie a systému s recirkuláciou a kompenzátorom

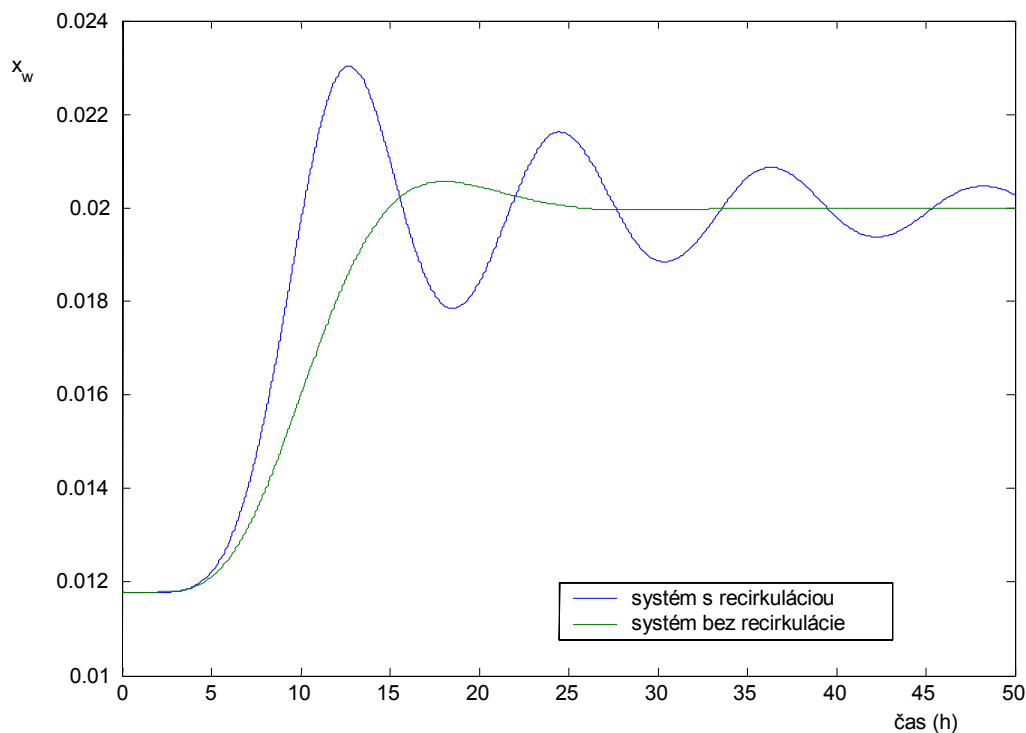
10. ADAPTÍVNE RIADENIE SÚSTAVY REAKTOR – REKTIFIKAČNÁ KOLÓNA

Na odstránenie vplyvu recirkulácie bol zavedený kompenzátor recirkulácie. Kompenzátor sám nezvládne riadenie sústavy s recirkuláciou, preto riadenie bolo rozšírené na adaptívne. Jeden zo spôsobov je adaptívne riadenie pomocou referenčného modelu (MRAS). Na obr. 40 je znázornená simulačná schéma adaptívneho riadenia sústavy. Po nastavení statického zosilnenia na hodnotu 300 000 bola odsimulovaná odozva sústavy pre jednotlivé spôsoby kompenzácie recirkulácie na skokovú zmenu žiadanej hodnoty z 0,0118 na 0,02.



obr. 40 Simulačná schéma adaptívneho riadenia sústavy s recirkuláciou

Na obr. 41 je znázornené porovnanie odozvy systému s recirkuláciou (bez kompenzátora) a bez recirkulácie. Z grafu vyplýva, že riadenie systému bez recirkulácie je oveľa lepšie ako riadenie systému s recirkuláciou. Úlohou kompenzátora v regulačnom obvode je, aby znížil vplyv recirkulácie na dynamiku systému, čiže znížiť kmitanie a vylepšiť kvalitu riadenia.

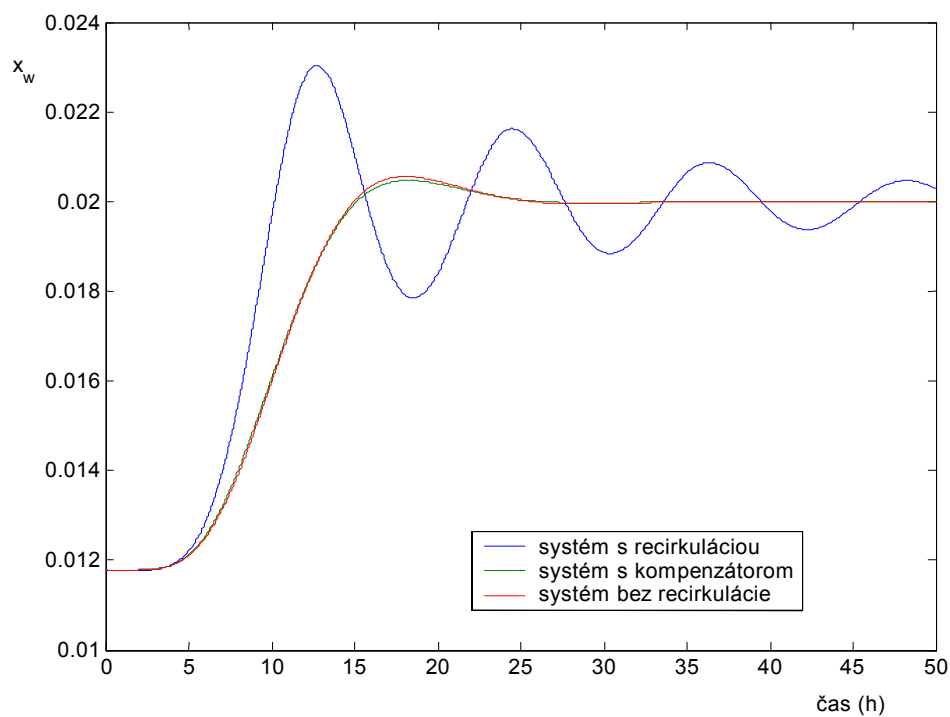


obr. 41 Porovnanie odozvy systému s recirkuláciou a bez recirkulácie pri adaptívnom riadení

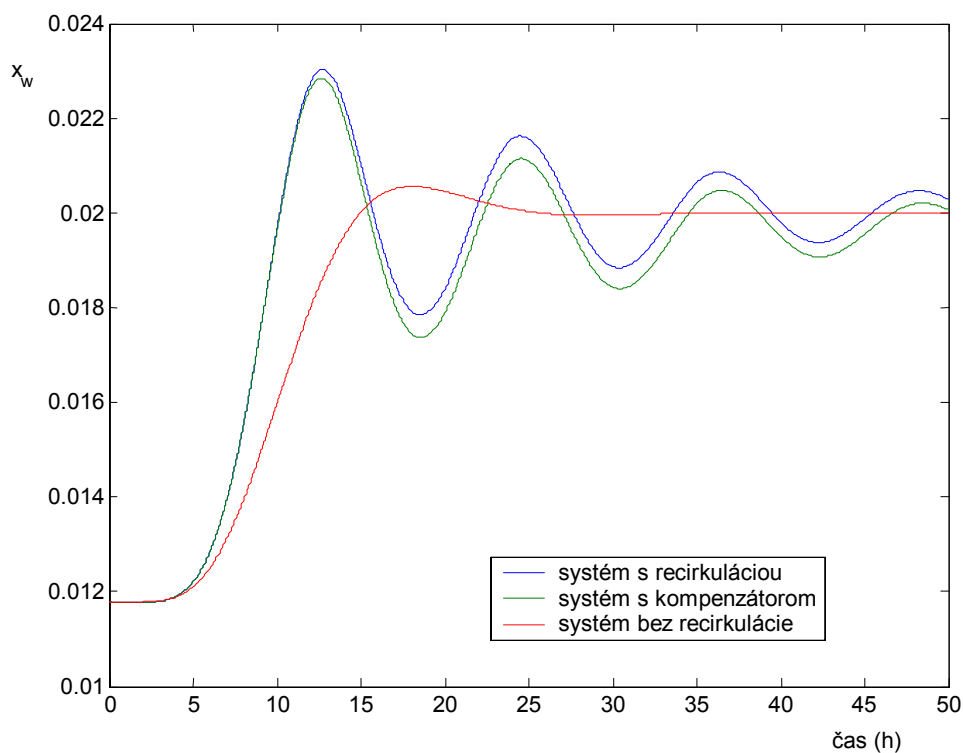
Po zapojení kompenzátora do obvodu boli odsimulované odozvy sústavy. Na obr. 42 je znázornená odozva sústavy s recirkuláciou a priamym kompenzátorom. Kompenzátor dokáže veľmi dobre kompenzovať vplyv recirkulácie (obr. 35) a pri riadení priebeh odozvy je rovnaký ako pri riadení sústavy bez recirkulácie.

Na obr. 43 vidíme porovnanie prechodových charakteristík pri adaptívnom riadení sústavy bez recirkulácie, s recirkuláciou a kompenzátorom recirkulácie pomocou prietoku chladiaceho média. Síce kompenzátor dobre kompenzuje recirkuláciu, ale neodstráni oscilačný charakter sústavy, ktorý vo veľkej miere ovplyvní riadenie. Priebeh prechodovej charakteristiky v porovnaní s prechodovou charakteristikou nekompenzovanej sústavy sa zmení v malej miere a ostáva kmitavá.

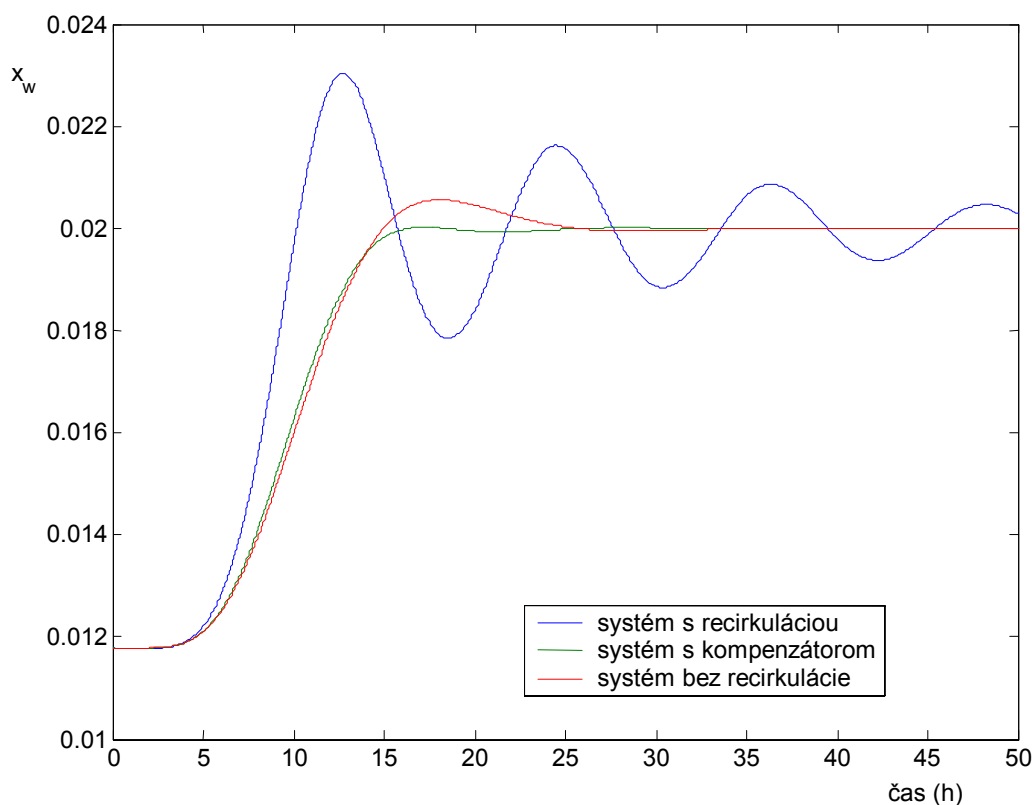
Na obr. 44 je uvedené porovnanie riadenia sústavy bez recirkulácie, s recirkuláciou a kompenzátorom recirkulácie pomocou prietoku reakčnej zmesi privádzaného do reaktora. Ako z uvedeného grafu vyplýva, hoci kompenzátor nedokázal úplne odstrániť vplyv recirkulácie, ale pri riadení odozva systému je dokonca lepšia ako pri riadení sústavy bez recirkulácie.



obr. 42 Porovnanie odozvy systému s recirkuláciou, bez recirkulácie a s kompenzátorom recirkulácie pri adaptívnom riadení



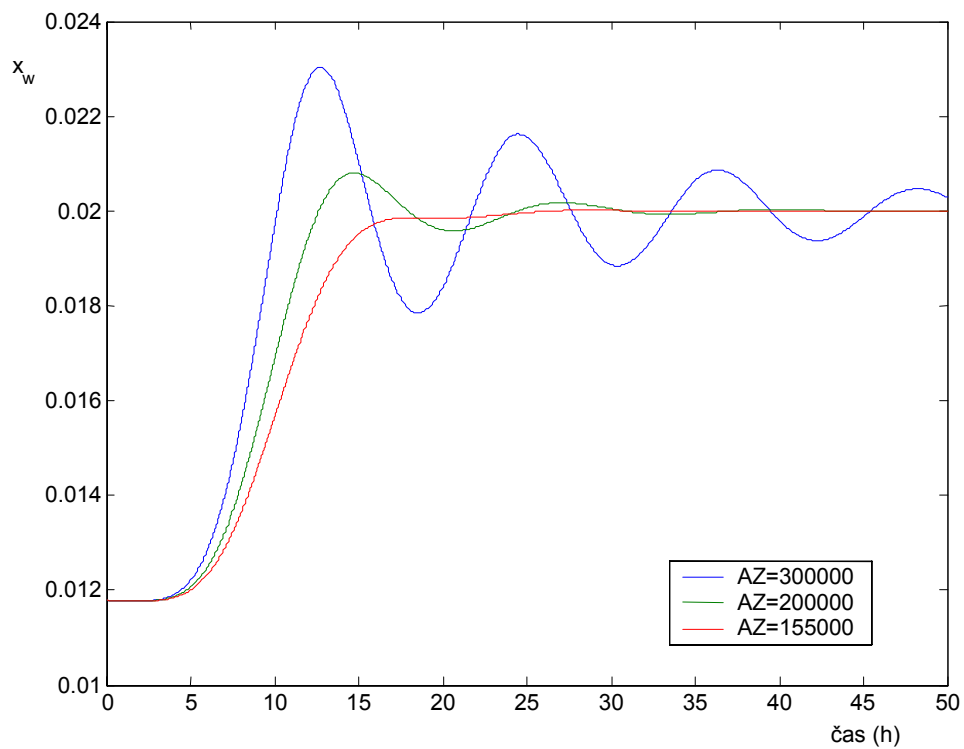
obr. 43 Porovnanie odozvy systému s recirkuláciou, bez recirkulácie a s kompenzátorom recirkulácie pri adaptívnom riadení



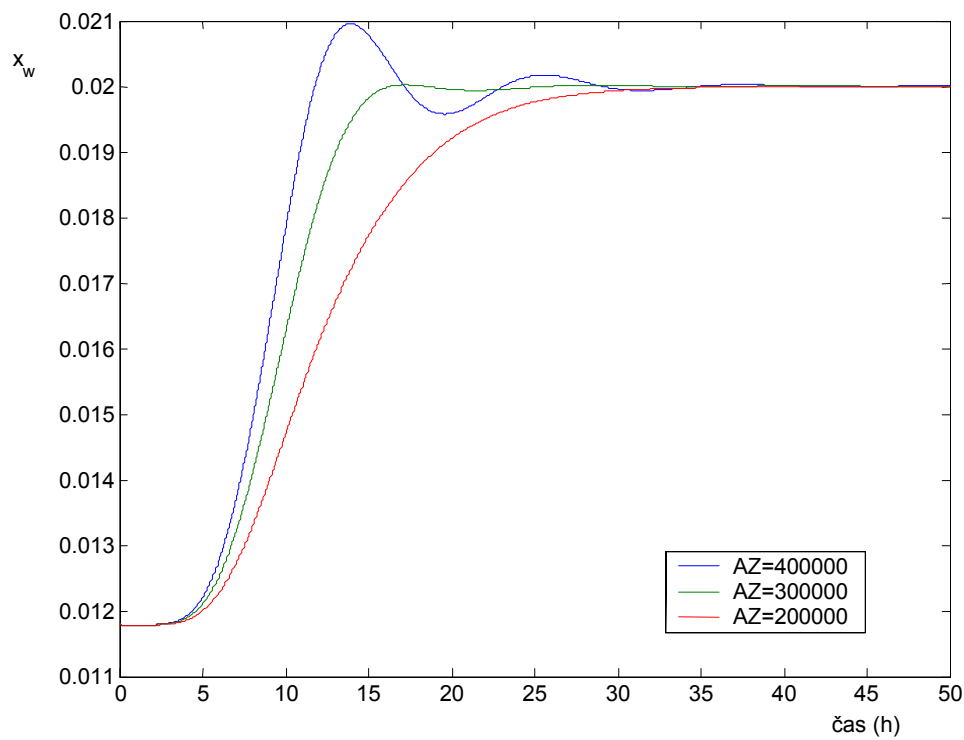
obr. 44 Porovnanie odozvy systému s recirkuláciou, bez recirkulácie a s kompenzátorom recirkulácie pri adaptívnom riadení

Na vyšetrenie vplyvu statického zosilnenia na odozvu systému boli vykonané simulácie pri rôznych hodnotách statického zosilnenia pre systém bez kompenzátora a s kompenzátorom recirkulácie. Ako z uvedených grafov vyplýva statické zosilnenie má veľký vplyv na odozvu systému. Na obr. 45 je porovnaný vplyv statického zosilnenia na odozvu systému s recirkuláciou a kompenzátorom. Pre nižšie hodnoty zosilnenia odozva sa stáva pomalým. Pri vyšších hodnotách zosilnenia odozva má kmitavý charakter, pri veľmi vysokých hodnotách sústava stráca stabilitu.

Na obr. 46 je znázornený vplyv statického zosilnenia na sústavu bez kompenzátora. Pre taký prípad pri nízkych hodnotách zosilnenia odozva prestane kmitať a môžeme riadiť sústavu bez kompenzátora. Nevýhodou riadenia bez kompenzátora je, že systém sa ustáli pomaly. Pri vyšších hodnotách zosilnenia sústava tiež sa stáva nestabilným.



obr. 45 Porovnanie odozvy systému s recirkuláciou bez kompenzátora recirkulácie pri rôznych hodnotách adaptívneho zosilnenia



obr. 46 Porovnanie odozvy systému s recirkuláciou a kompenzátorom recirkulácie pri rôznych hodnotách adaptívneho zosilnenia

ZÁVER

Cieľom práce

LITERATÚRA

- [1] Mészáros, A., Mizsey, P., Horváth, M., Fonyó, Z., Dynamic analysis and control of recycle processes, 2004
- [2] Luyben, W.L., Dynamics and control of recycle systems 1. 1993a, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 466-475.
- [3] Luyben, W.L., Dynamics and control of recycle systems 2. 1993b, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 476-486.
- [4] Mikleš, J., Hutla, V., Teória automatického riadenia, 1986, ALFA, SNTL
- [5] Chmúrny, D., a kol., Navrhovanie a projektovanie automatizovaných systémov riadenia technologických procesov, 1990, ALFA
- [6] Bafrnec, M., Bálež, V., Langfelder, I., Longauer, J., Chemické inžinierstvo 1, 1999, Malé Centrum
- [7] Dojčanský, J., Longauer, J., Chemické inžinierstvo 2, 2000, Malé Centrum
- [8] Bildea, C. S., Dimian, A. C., Cruz, S. C., Iedema, P. D., Design of tubular reactors in recycle systems, 2004, *Computers and Chemical Engineering* 28, 63-72
- [9] Fikar, M., Mikleš, J., Identifikácia systémov, STU Bratislava, 1998
- [10] Taiwo, O., Krebs, V., Robust control system design for plants with recycle