

Riadenie mnohorozmerových chemickotechnologických procesov metódou adaptívneho λ -sledovania

Monika Bakošová, Magdaléna Ondrovičová, Mária Karšaiová

Príspevok je venovaný aplikácii metódy adaptívneho λ -sledovania na riadenie mnohorozmerových (MIMO) nelineárnych procesov chemickej a potravinárskej technológie. Metóda adaptívneho λ -sledovania predstavuje účinný a jednoduchý nástroj na syntézu riadenia takýchto typov procesov, pretože rieši problémy súvisiace s nemerateľnosťou stavových veličín, neurčitostami modelu a robustnosťou riadenia. Výhodou metódy je, že pre syntézu riadenia nie je potrebné poznať model riadeného procesu.

Úvod

Chemickotechnologické procesy majú viacero takých vlastností, ktoré kladú špecifické požiadavky na vlastnosti riadiaceho systému. Okrem toho, že často majú nemerateľné stavové veličiny a sú mnohorozmerové, pri syntéze riadenia treba brať do úvahy aj ich silnú nelinearitu a neurčitosti, ktoré sa v týchto procesoch vyskytujú. Jedným z prístupov, ktoré umožňujú riešiť problémy syntézy riadenia spomenutých systémov, je i metóda adaptívneho λ -sledovania [1], [2]. Táto metóda je jednou z koncepcií riadenia s veľkým zosilnením (high-gain control). λ -sledovanie znamená, že riadené výstupné veličiny sa neradia na žiadané veličiny, ale do λ -okolía žiadaných veličín alebo trajektórií žiadaných veličín, kde λ reprezentuje povolenú regulačnú odchýlku. Adaptívny λ -regulátor je vhodný tak pre riadenie jednorozmerových (SISO), ako aj mnohorozmerových (MIMO) systémov. Aplikácii metódy adaptívneho λ -sledovania na syntézu riadenia SISO systémov boli venované napr. práce [3], [4]. Tento príspevok prezentuje rozšírenie použitia metódy na syntézu riadenia systémov MIMO, konkrétne na príklade riadenia etážovej rektifikačnej kolóny. Aj keď v súčasnosti priemyselne rektifikačné kolóny sú väčšinou riadené ako systémy SISO, tento príspevok je zároveň pokusom o návrh takého riadenia, kde sa spätným tokom a prietokom pár kolónou riadi zloženie destilátu aj zvyšku súčasne. Takáto konfigurácia riadenia sa označuje ako LG konfigurácia riadenia [6].

Riadený MIMO systém

Predpokladáme, že riadený MIMO systém možno opísať modelom v tzv. Byrnesovom – Isidoriho normálnom tvare [5]:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= f(t, y(t), z(t)) + g(t, y(t), z(t))u(t) \\ \dot{z}(t) &= h(t, y(t), z(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

kde $y(t)$ je vektor výstupných riadených veličín, $u(t)$ je vektor vstupných riadiacich veličín, f je m -rozmerná vektorová funkcia, g je matica s m stĺpcami a m riadkami, h je $(n-m)$ -rozmerná vektorová funkcia, n predstavuje počet stavových a m počet vstupných veličín. Ďalej predpokladáme, že rovnovážny stav dynamického systému (1) existuje a vieme ho určiť.

Na základe opisu (1) možno definovať požiadavky, ktoré musí riadený systém spĺňať, aby pre návrh jeho riadenia bolo možné použiť metódu adaptívneho λ -sledovania:

1. funkcie f , g , h sú spojité a ohraničené,
2. nie je potrebné poznať počet stavových veličín n , ale systém má byť relatívneho 1. rádu,
3. systém je v globálne minimálne fázový.

Všetky požiadavky na riadený systém sú teoreticky sformulované a zdôvodnené napr. v [2]. Je zrejmé, že také požiadavky na riadený systém, ako je relatívny rád 1 alebo globálna minimálna fázovosť, mnoho riadených systémov nespĺňa. V chemických a potravinárskych technológiách však možno pri riešení praktických problémov riadenia nájsť veľa takých systémov, ktoré tieto podmienky spĺňajú. Systémami, ktoré uvedené podmienky spĺňajú, sú i rektifikačné kolóny.

Metóda adaptívneho λ -sledovania

Cieľ riadenia pre metódu adaptívneho λ -sledovania možno sformulovať nasledovne: pre dané $\lambda > 0$ je potrebné zabezpečiť, aby riadené výstupné veličiny pre $t \rightarrow \infty$ konvergovali do λ -okolía žiadaných veličín. Matematicky sformulovaný cieľ riadenia mnohorozmerového systému je opísaný nasledovne:

$$\|y(t) - w(t) + v(t)\| < \lambda \quad \text{pre } t \rightarrow \infty \quad (2)$$

kde $w(t)$ je vektor žiadaných veličín a $v(t)$ je šum. Z (2) je zrejmé, že spätnoväzbové riadenie, určené metódou adaptívneho λ -sledovania, zároveň rieši problém robustnosti, napr. s ohľadom na chyby merania.

Pre uvedený cieľ riadenia (2) má zákon riadenia po zavedení adaptácie do zosilnenia $k(t)$ nasledovný tvar:

$$u(t) = -k(t)[y(t) + n(t)] + \delta \quad (3)$$

$$k(t) = \begin{cases} \gamma(\|y(t) + n(t)\| - \lambda)\|y(t) + n(t)\| & \text{ak } \|y(t) + n(t)\| \geq \lambda \\ 0 & \text{ak } \|y(t) + n(t)\| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

kde $n(t) = -w(t) + v(t)$.

Za predpokladu že $\gamma, \lambda > 0, \delta \in R$ a MIMO systém (1) spĺňa všetky uvedené obmedzujúce podmienky, použitie spätnej väzby v tvare (3), (4) vedie k riešeniu uzavretého obvodu riadenia, a toto riešenie má nasledovné vlastnosti [2]:

1. $\lim_{t \rightarrow \infty} k(t) = k_{\infty}$ existuje a je konečná
2. $\|y(t) - w(t) + v(t)\| < \lambda$ pre $t \rightarrow \infty$

To znamená, to požadovaný cieľ riadenia možno dosiahnuť jednoduchou stratégiou riadenia (3), (4). Zo štruktúry zákona riadenia (3), (4), ktorá vôbec nezávisí od matematického modelu procesu, je zjavné, že o riadenom procese nepotrebujeme mať veľa informácií a že systém musí spĺňať len uvedené predpoklady.

Zo zákona riadenia je ďalej zjavné, že v ňom vystupujú tri parametre, ktoré treba vhodne nastaviť. Sú to parametre γ, δ a λ . Parameter γ ovplyvňuje rýchlosť adaptácie a jeho odporúčaná voľba zodpovedá rádu prevrátenej hodnoty dominantnej časovej konštanty riadeného systému. Parameter δ predstavuje vstup do riadeného systému v tom rovnovážnom stave, ktorý je zároveň aj hlavným pracovným bodom. Parameter λ má zjavne vzťah k regulačnému pochodu v tom zmysle, že predstavuje maximálnu prípustnú trvalú regulačnú odchýlku. V zákone riadenia je skrytý ešte jeden parameter, ktorý tiež treba vhodne nastaviť, a tým je začiatočná hodnota $k(0)$ adaptívneho zosilnenia $k(t)$. Ak je dobrý odhad tohto parametra známy, napr. na základe predchádzajúcich experimentov alebo znalosti modelu a prípadne i veľkosti porúch, tento odhad možno použiť ako začiatočnú hodnotu $k(0)$. Treba dať však pozor na to, aby adaptívne zosilnenie $k(t)$ nebolo príliš veľké, pretože zbytočne veľká hodnota $k(t)$ zvyšuje citlivosť metódy adaptívneho λ -sledovania na šumy merania. Teoretický návod na voľbu parametrov γ, δ a λ možno nájsť napr. v [1].

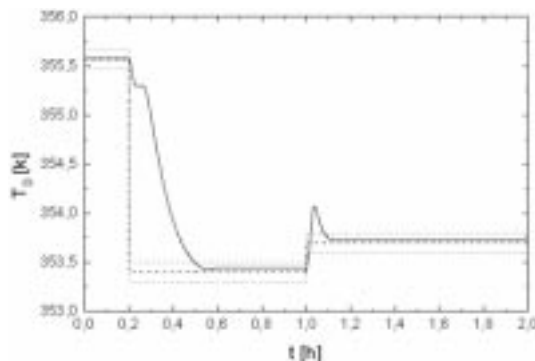
Etážová rektifikačná kolóna pre delenie binárnej zmesi benzén-toluén

Vhodnosť použitia metódy adaptívneho λ -sledovania pre riadenie MIMO systémov bola simulačne overená riadením etážovej rektifikačnej kolóny s 25 etážami pre delenie binárnej zmesi benzén-toluén. Nástriek sa privádza na štrnástu etáž. Destilát sa odoberá po skondenzovaní pár v kondenzátore a zvyšok z varáka. Časť kondenzátu sa vracia do kolóny ako spätný tok L . Za predpokladu LG konfigurácie riadenia predstavuje kolóna MIMO systém s 2 vstupmi a 2 výstupmi. Riadenými výstupnými veličinami sú teplota pary na hlave kolóny T_D a teplota pary prichádzajúca na 1. etáž T_W . Riadiacimi vstupnými veličinami sú spätný tok L a prietok parnej fázy kolónou G . Syntéza riadenia pre opísanú kolónu nie je jednoduchá práve z dôvodu komplikovanosti matematického modelu, silnej nelineárnosti a veľkej citlivosti na poruchy.

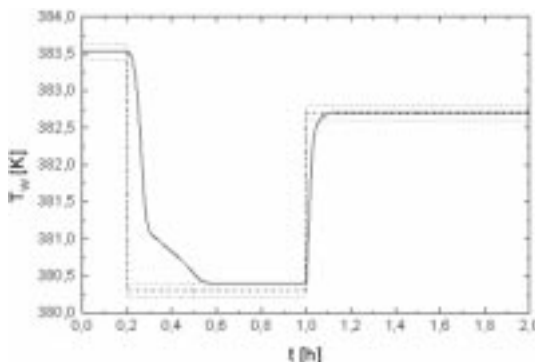
Aby sa dala aplikovať metóda adaptívneho λ -sledovania pri návrhu adaptívneho regulátora na riadenie opísanej kolóny, bolo by potrebné dokázať, že sú splnené všetky tri predpoklady uvedené v predchádzajúcej časti. Pre priemyselné aplikácie λ -sledovania je však dosť typické, že dokázať splnenie týchto predpokladov nie je jednoduché. Tak je to aj v prípade opísanej rektifikačnej kolóny, ktorá predstavuje nelineárny MIMO systém minimálne 27. rádu. Na základe teoretickej analýzy dynamických vlastností možno tvrdiť, že v prípade rektifikačných kolón je druhý predpoklad splnený, ak riadiacimi veličinami je spätný tok a prietok pár kolónou. Vyplýva to zo skutočnosti, že tieto riadiace veličiny ovplyvňujú dynamiku každej etáže, čo sa prejaví v matematickom modeli relatívnym rádom 1. Kombináciou teoretickej analýzy a fyzikálneho prístupu k riadenému systému – kolóne, sa dá dokázať, že sú splnené aj ďalšie dva predpoklady.

λ -regulátor navrhnutý metódou adaptívneho λ -sledovania bol použitý na simuláciu riadenia opísanej rektifikačnej kolóny.

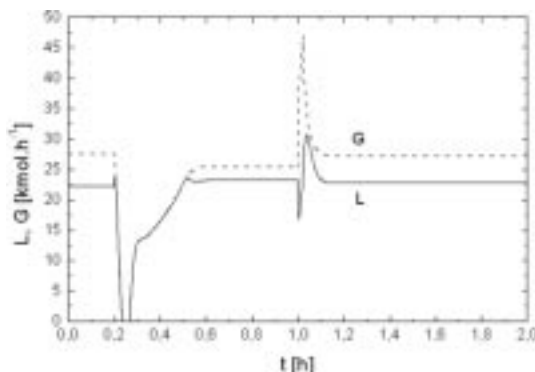
Na obr. 1, 2 je znázornený priebeh teplôt T_D, T_W pri riadení do λ -okolí meniacich sa žiadaných veličín. Prvá hodnota žiadanej



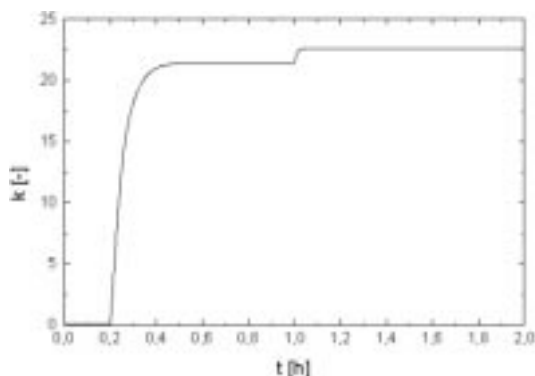
Obr.1 Riadenie teploty T_D na hlave kolóny pri zmene žiadanej veličiny



Obr.2 Riadenie teploty T_W na dne kolóny pri zmene žiadanej veličiny

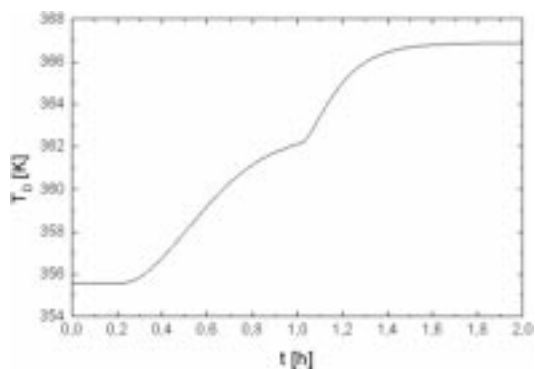


Obr.3 Priebeh riadiacích veličín – spätného toku L a prietoku pár kolónou G pri zmene žiadanej veličiny

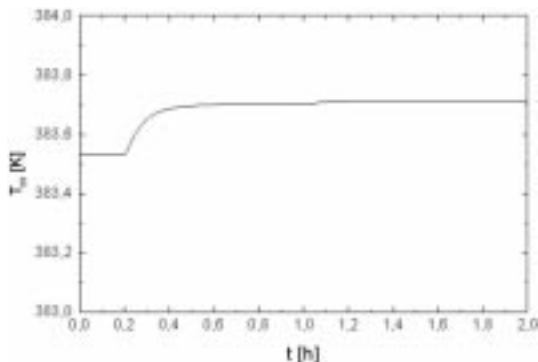


Obr.4 Priebeh adaptívneho parametra $k(t)$

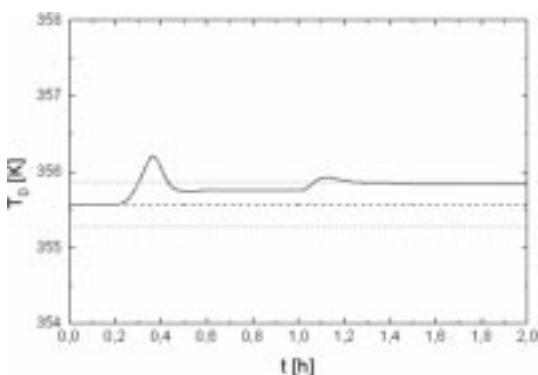
veľičiny pre T_D bola 355,6 K. V čase 0,2 h sa zmenila na hodnotu 353,4 K a potom v priebehu 1h na hodnotu 353,7K. Prvá hodnota žiadanej veličiny pre T_W bola 383,5 K. V čase 0,2 h sa zmenila na hodnotu 380,3 K a potom v čase 1h na hodnotu 382,7 K. Priebeh žiadanej veličiny je znázornený čiarkovanou líniou. λ -okolie žiadanej veličiny je znázornené bodkovanou líniou. Parameter λ pre riadenie teplôt bol zvolený $\lambda = 0,1$. Priebeh riadiacích veličín spätného toku L a prietoku pár kolónou G pri riadení kolóny



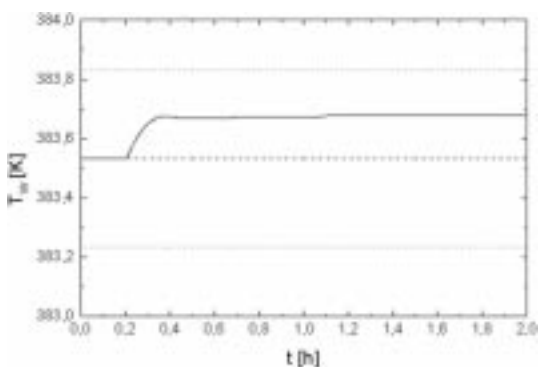
Obr.5 Odozva teploty T_D na hlave kolóny na poruchy v prietoku a zložení nástreku



Obr.6 Odozva teploty T_W na dne kolóny na poruchy v prietoku a na zloženie nástreku



Obr.7 Priebeh teploty T_D na hlave kolóny pri eliminovaní vplyvu porúch λ -regulátorom



Obr.8 Priebeh teploty T_W na dne kolóny pri eliminovaní vplyvu porúch λ -regulátorom

λ -regulátorom s meniacou sa žiadanou veličinou je na obr. 3. Priebeh adaptívneho zosilnenia regulátora $k(t)$ je znázornený na obr. 4.

Simulačne sa sledovala aj možnosť použitia λ -regulátora pri odstraňovaní vplyvu porúch. Žiadaná hodnota teploty T_D v tomto prípade bola konštantná, a to 355,6 K. Žiadaná hodnota teploty T_W bola 383,5 K. Použitím adaptívneho λ -regulátora bolo treba elimi-

noviť vplyv poruchy, ktorú v čase 0,02 h predstavovala +20 % skoková zmena prietoku nástreku F . V čase 1h začala pôsobiť i druhá porucha, ktorou bola -15 % skoková zmena zloženia nástreku x_F . Parameter λ bol v tomto prípade zvolený $\lambda = 0,3$. Kvôli porovnaniu bola simulovaná aj odozva kolóny na už opísané poruchy, ale bez použitia regulátora. Priebehy výstupných veličín T_D a T_W pri pôsobení porúch bez regulácie sú znázornené na obr. 5, 6. Priebehy T_D a T_W v prípade odstraňovania vplyvu deterministických porúch pomocou adaptívneho λ -regulátora sú zobrazené na obr. 7, 8.

Záver

Príspevok opisuje možnosti použitia metódy adaptívneho λ -sledovania pri riadení etážových rektifikačných kolón ako MIMO nelineárnych systémov. Použitelnosť metódy bola demonštrovaná simuláciou riadenia etážovej rektifikačnej kolóny pre delenie binárnej zmesi benzén-toluén. Navrhnutý adaptívny λ -regulátor je veľmi jednoduchý, ide v podstate o P regulátor, ktorý nepotrebuje žiadne špeciálne ladenie. Je veľmi ľahko implementovateľný a má výrazné robustné vlastnosti.

Tento príspevok vznikol s grantovou podporou VEGA MŠ SR a SAV pre projekty č. 1/8108/01 a 1/0135/03.

Literatúra

- [1] ALLGÖWER, F., ASHMAN J., ILCHMAN A. (1995): High-gain adaptive λ -tracking for nonlinear systems. Report A-95-15. Institute of Mathematica, Medical University of Lübeck.
- [2] ALLGÖWER, F., ILCHMANN, A., ASHMAN, J. (1997): High-gain adaptive λ -tracking for nonlinear systems. Automatica 33, pp. 881 – 888.
- [3] BAKOŠOVÁ, M., ONDROVIČOVÁ, M., KARŠAIOVÁ, M. (2000): Riadenie rektifikačných kolón metódou adaptívneho λ -sledovania. AT&P journal 7 (4), s. 76 – 77.
- [4] BAKOŠOVÁ, M., ONDROVIČOVÁ, M., KARŠAIOVÁ, M.: Použitie metódy adaptívneho lambda-sledovania pre riadenie chemických reaktorov. AT&P journal 9 (4), 2002, s. 77 – 79.
- [5] BYRNES, C. I., ISIDORI, A. (1984): A frequency domain philosophy for nonlinear systems with application to stabilization and to adaptive control. In: Proc. 23rd IEEE Conf. on Decision and Control, Las Vegas, pp. 1569 – 1573.
- [6] SKOGESTAD, S., MORARI, M.: Control configuration selection for distillation columns. AIChE Journal 33, 1987, pp. 1620 – 1635.

doc. Ing. Monika Bakošová, CSc.
Ing. Magdaléna Ondrovičová
Ing. Mária Karšaiová, CSc.

Katedra informatizácie a riadenia procesov
FCHPT STU Bratislava
e-mail: bakosova@chtf.stuba.sk