

M. Atanasijević, B. Zupančič, F. Bremšak
Fakulteta za elektrotehniko
61000 Ljubljana, Tržaška 25

HIBRIDNA SIMULACIJA RAČUNALNIŠKEGA
VODENJA DESTILACIJSKE KOLONE

HYBRID SIMULATION OF REGULATED
DISTILLATION COLUMN

POVZETEK - V delu smo podali opis pomanjšanega modela semišaržne destilacijske kolone, ki smo ga simulirali na analognem računalniku EAI 580. Na digitalnem računalniku PDP 11/34 smo realizirali kompenzator za razstavljanje ter PI-regulator. S pomočjo povezave obeh sistemov smo ugotavljali uspešnost načrtanega vodenja, ki ga ilustrirajo odzivi reguliranega sistema.

ABSTRACT - Paper deals with reduced model of semi-batch distillation column which was simulated on EAI 580 analog computer. Decoupling compensator and PI-regulator were realised on PDP 11/34 digital computer. With connection of this two systems we have examined the efficiency of determined control system, which is illustrated with some responses of the closed loop system.

1. UVOD

V procesih kemijske industrije se za ločitev komponent na osnovi hlapnosti uporabljajo pretežno kontinuirne destilacijske naprave. V primeru, ko imamo opravka z majhno produkcijo, z majhnim dotokom zmesi in spremembo od šarže do šarže pa moramo uporabiti šaržno destilacijo. Pri regeneraciji topil imamo pogosto opravka z lužnicami, ki vsebujejo dve različni hlapni komponenti ali pa eno lahko hlapno komponento in več težje hlapnih komponent. Lužnice so običajno nevtralne, so pa umazane in po odstranitvi lahko hlapne komponente pogosto spreminjajo viskoznost. Nekatere komponente se nagibajo h kristalizaciji in podobno. V vseh teh primerih je izločanje lahko hlapne komponente s šaržno rektifikacijo zelo primerno zato, ker vse nečistoče ostanejo v kotlu in ne povzročajo zamazanosti same kolone, kot bi se sicer dogajalo pri kontinuirni destilaciji, kjer napajamo kolo- no z napajalno zmesjo na prekatu, ki ima sicer enako sestavo kot napajalna zmes.

Izkoristek posamezne šarže lahko v določenih primerih še nekoliko izboljšamo, če uporabimo namesto šaržne, semišaržno rektifikacijo. Za razliko od šaržne destilacije tu v rebojler neprestano dovajamo napajalno zmes in sicer s takim pretokom, s kakršnim destilat na vrhu kolone odteka v akumulator. Prednost takega obratovanja ni le povečana količina produkta posamezne šarže, ampak tudi konstanten nivo v uparjalniku, kar nadalje zagotavlja konstantno ogrevalno površino, le-ta pa približno konstanten tok hlapov.

V pilotnem obratu Tovarne zdravil KRKA Novo mesto pripravljajo postavitve polindustrijske semišaržne rektifikacijske kolone, ki bi bila večnamenska. Bila naj bi toliko opremljena z ustrezno instrumentalno opremo, da bi na najej lahko zajemali vse parametre za načrtovanje in vodenje večjih namenskih šaržnih kolon industrijskih kapacitet, ki bi delovale zanesljivo in ekonomično, skoraj brez posluževalcev.

Laboratorij za analogno-hibridno računanje in avtomatsko regulacijo je v zvezi s tem projektom dobil nalogo v kateri naj bi proučil možnosti regulacije oz. vodenja omenjene pilotne naprave. V ta namen smo najprej zgradili ustrezne nelinearne modele, ki so dovolj natančno opisovali dani proces. Ker pa je z regulacijskega stališča ugodno izbrati kar najenostavnejši model na osnovi katerega se odločamo za izbiro med danimi možnostmi načrtovanja vodenega sistema, smo dobljene modele linearizirali za delovanje v okolici stacionarnega stanja, ki ga je seveda potrebno v dovolj kratkih časovnih intervalih spreminjati.

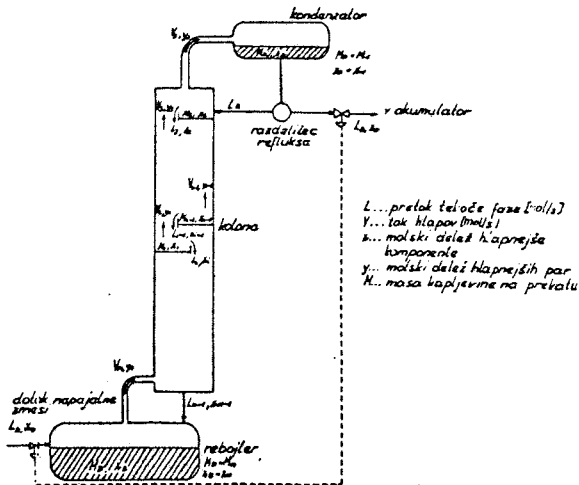
Poleg tega smo tudi ugotovili, da je s postopkom identifikacije v diskretnem prostoru možno vhodno-izhodno obnašanje lineariziranega sistema aproksimirati s sistemom precej nižjega reda. Določitev strukture poenostavljanja modela in njegovih parametrov smo opravili s pomočjo simuliranih odzivov prvotnega lineariziranega sistema pri primerno izbranih vzbujevalnih signalih.

V delu predlagamo možno realizacijo vodenja semišaržne destilacijske kolone na osnovi sinteze kompenzatorja za razstavljanje ter PI-regulatorja pri izbranem lineariziranem modelu. Za preizkus delovanja tako načrtanega vodenja smo se poslužili hibridne simulacije. V ta namen smo povezali analogni računalnik EAI 580, na katerem smo realizirali poenostavljeni linearizirani model ter digitalni računalnik PDP 11/34, s pomočjo katerega smo izračunavali ustrezna regulacijska vhoda.

2. OPIS SISTEMA

Naprava za semišaržno rektifikacijo je sestavljena iz:

- 1) Rebojlerja oz. uparjalnika; to je posoda z vgrajeno grelno površino, priključki za odtok in dotok tekočine ter grelnega medija in merilci nivoja, tlaka in temperature. Od uparjalnika zahtevamo konstaten tok hlapov, kar je nedvomno težko doseči. Pri destilaciji namreč narašča delež teže hlapne komponente v zmesi, ki jo imamo v kotlu. Posledica tega je zvišanje temperature vrelišča in s tem se zmanjša temperaturna razlika med grelnim medijem in zmesjo, kar zmanjša toplotni tok in tok hlapov.
- 2) Nad uparjalnikom imamo postavljeno rektifikacijsko kolono, ki je napolnjena s polnilom ali pa so v njej prekati. Naloga kolone je, da hlape obogati do predpisane sestave.
- 3) Na vrhu kolone je kondenzator, v katerem mora biti zagotovljen tak toplotni tok, da bodo hlapi popolnoma kondenzirali, ni pa potrebno ohlajevanje destilata, ker moramo vračati reflux s temperaturo, ki je blizu temperature vrelišča destilata.
- 4) Imeti moramo še regulator refluxa, ki del destilata vrača v kolono, del pa ga odvaža v akumulator.



Slika 1. Shema destilacijske kolone

3. SINTEZA KOMPENZATORJA ZA RAZSTAVLJANJE IN PI-REGULATORJA

Glavni cilj regulacije semišaržne destilacijske kolone je vzdr-

ževanje zahtevane vrednosti koncentracije laže hlapne komponente na vrhu kolone. Druga zahteva, na katero moramo biti pozorni pa je prenehanje posamezne šarže. Ustavitev destilacije naj bi se izvršila v času, ko koncentracija v rebojlerju pade pod določeno vrednost, oz. ko bi morali vračati v kolono toliko kapaljevine, kot jo prihlapi v kondenzator. Destilacija od tega časa naprej seveda ne bi imela nobenega smisla.

Ena od možnosti načrtovanja takega multivariabilnega sistema je v vpeljavi kompenzatorja za razstavljanje. Na ta način lahko dosežemo vpliv ene vhodne veličine na en sam izhod, oz. to, da je dan izhod vođen le z enim vhodom. Tako razširjen sistem nam nudi zelo jasen pregled na vpliv dane vhodne veličine na ustrezen izhod, poleg tega pa imamo pri načrtovanju takega kompenzatorja tudi določeno svobodo v izbiranju lege nekaterih polov sistema, s čimer imamo nadalje možnost vplivati na obliko odziva razširjenega sistema. Hkrati z izbiro polov lahko izbiramo tudi vrednosti vhodnih ojačenj celotnega sistema in tako povečamo oz. zmanjšamo vpliv vhodne veličine na dan izhod.

Za sistem, ki ga lahko podamo v obliki enačb stanja

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\underline{x}}(t) &= \underline{A} \Delta \underline{x}(t) + \underline{B} \Delta \underline{u}(t) \\ \Delta \underline{y}(t) &= \underline{C} \Delta \underline{x}(t)\end{aligned}\quad (1)$$

dosežemo popolno križno neinterakcijo z vpeljavo povratnozančnega regulacijskega zakona

$$\Delta \underline{u}(t) = \underline{F} \Delta \underline{x}(t) + \underline{G} \Delta \omega(t), \quad (2)$$

če obstaja nesingularna matrika

$$\underline{B}^* = \begin{bmatrix} \underline{C}_1 \underline{A} & d_1 \underline{B} & & \\ \dots & \dots & \dots & \\ \underline{C}_i \underline{A} & d_i \underline{B} & & \\ \dots & \dots & \dots & \\ \underline{C}_m \underline{A} & d_m \underline{B} & & \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

kjer je \underline{C}_i i-ta vrstica izhodne matrike \underline{C} in so d_i definirani kot:

$$d_i = \begin{cases} \min j : \underline{C}_i \underline{A}^j \underline{B} \neq 0, & j = 0, 1, \dots, (n-1) \\ n-1, & \text{če je } \underline{C}_i \underline{A}^j \underline{B} = 0 \text{ za vse } j = 0, 1, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

Obstoj nesingularne matrike \underline{B}^* je potreben in zadosten pogoj, da je sistem mogoče razstaviti iz spremenljivk stanja s pomočjo para \underline{F} , \underline{G} :

$$\begin{aligned}\underline{G} &= (\underline{B}^*)^{-1} \underline{\Gamma} \\ \underline{F} &= (\underline{B}^*)^{-1} \left(\sum_{k=0}^{\underline{v}} \underline{B}_k \underline{C} \underline{A}^k - \underline{A}^* \right),\end{aligned}\quad (5)$$

kjer je $\mathcal{J} = \max d_i$, matrice $\underline{\Lambda}$, \underline{M}_k in $\underline{\Delta}^*$ pa so dane z

$$\underline{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \quad (7)$$

$$\underline{M}_k = \text{diag}(m_{1k}, \dots, m_{ik}, \dots, m_{mk}) \quad (8)$$

$$\underline{\Delta}^* = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \underline{C}_1 & \underline{A}_1^{d_1+1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{C}_1 & \underline{A}_1^{d_1+1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{C}_m & \underline{A}_m^{d_m+1} & \dots & \dots \end{array} \right]^T \quad (9)$$

Z uporabo takšnega kompenzatorja smo uspeli dobiti iz multi-variabilnega sistema z dvema vhodoma in dvema izhodoma dva povsem ločena univariabilna sistema. Na vsakega izmed njiju smo nadalje priključili po en PI-regulator, katerega parametre smo določili s pomočjo analogne simulacije na računalniku EAI 580. Če enačbe za razstavljanje in načrtana regulatorja podamo v obliki ene same prenosne funkcije, dobimo razmere, ki jih podajajo naslednje enačbe:

$$\omega_1 = k_{p1} e_1 + k_{i1} \int e_1 dt \quad (10)$$

$$\omega_2 = k_{p2} e_2 + k_{i2} \int e_2 dt$$

Ob upoštevanju: $e_1(t) = -y_1(t)$ in $e_2(t) = -y_2(t)$, lahko enačbo (10) zapišemo v obliki:

$$\underline{\omega} = -\underline{K}_p \underline{y}(t) - \underline{K}_I \int \underline{y} dt \quad (11)$$

kjer je

$$\underline{K}_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}), \quad \underline{K}_I = \text{diag}(k_{I1}, k_{I2}) \quad (12)$$

in

$$\underline{U}(s) = \left[\underline{R} - \frac{1}{s} \underline{P} \right] \underline{X}(s) \quad (13)$$

kjer je

$$\underline{R} = \underline{F} - \underline{G} \underline{K}_p \underline{C} \quad \text{in} \quad \underline{P} = \underline{G} \underline{K}_I \underline{C} \quad (14)$$

Za realizacijo prenosne funkcije celotnega regulatorja $\left[\underline{R} - \frac{1}{s} \underline{P} \right]$ na digitalnem računalniku, je potrebno le-to poprej še diskretizirati. V ta namen smo se poslužili metode bilinearne transformacije, ki nam je dala prenosno funkcijo celotnega regulatorja v obliki

$$H(z) = \underline{R} - \frac{T}{2} \underline{P} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (15)$$

Hibridna simulacija takšnega zaprtozančnega sistema, kjer smo model kolone realizirali na analognem računalniku EAI 580, regulator pa na digitalnem računalniku PDP 11/34, nam je za čas, ko veljajo razmere:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} -0.43524 & 0.43822 & 0.017224 & -0.019409 \\ -0.12286 & 0.12105 & -0.009228 & 0.010385 \\ -0.19811 & 0.19309 & -0.343070 & 0.353500 \\ 0.10171 & -0.09697 & -0.169810 & 0.161080 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0.12589 & -0.09741 \\ 0.11821 & -0.08017 \\ 0.29233 & -0.11676 \\ 0.21985 & -0.9320 \end{bmatrix}, \quad \underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

in pri izbranih elementih: $\underline{M}_O = \text{diag}(-0.5, -0.6)$, $\underline{=} = \text{diag}(0.0009, 0.0009)$, $\underline{K}_p = \text{diag}(241.5, 140.5, 140.4)$, $\underline{K}_I = \text{diag}(333.3, 291.3)$ ter vhodni motnji n na prvem vhodu dala poteke reguliranih izhodov in regulacijskih vhodov, kot jih prkahujejo slike 2,3 in 4.

4. ZAKLJUČEK

V članku smo podali opis sistema za vodenje semišaržne destilacijske kolone. Predlagan princip vođenja predvideva realizacijo poenostavljenega lineariziranega modela na analognem računalniku EAI 580, medtem ko sta diskretni kompenzator za razstavljanje ter PI-regulator realizirana na digitalnem računalniku PDP 11/34. Učinkovitost predlaganega pristopa ilustrirajo diagrami na slikah 2,3 in 4.

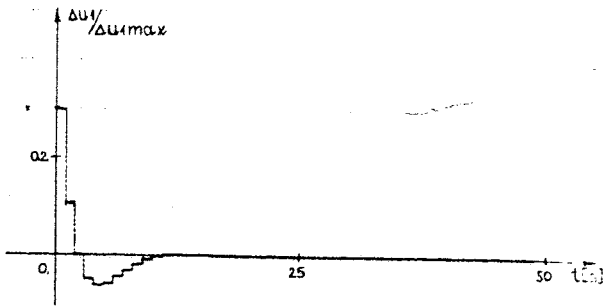
Naše delo pa s tem seveda, še ni končano. Praksa številnih strokovnjakov je pokazala, da nobena regulacijska metoda pa naj bo še tako splošna in popolna, ni najbolj primerna za vse regulirane sisteme. Ko rešujemo specifičen problem, je potrebno izbrati med številnimi obstoječimi postopki in jih nemalokrat prilagoditi danemu sistemu. Zato bomo v nadaljnjem raziskali še druge možne pristope, končno oceno o najprimernejšem pristopu pa bo dala seveda šele realizacija načrtanih principov vođenja na realnem sistemu.

5. LITERATURA

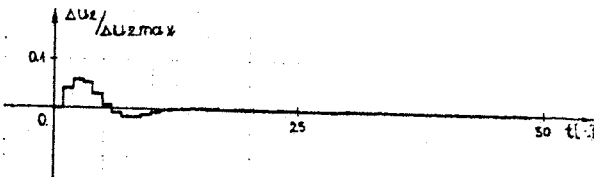
- /1/ J.Golob, V.Grilc, T.Recelj, "Elaborat o regeneraciji topil", 1980.
- /2/ V.Gulič, "Študij šaržne rektifikacije pri regeneraciji topil", Ljubljana, 1981.
- /3/ M.Melčič i E.Bauman, "Šaržna destilacija", Kem. ind., 29(4), 155, 1980.
- /4/ S.Domenech et M.Enjalbert, "Modele mathématique d'une colonne de rectification discontinue - I. Etablissement du modèle", Chemical

Engineering Science, 1974, Vol. 29, pp 1519-1528.

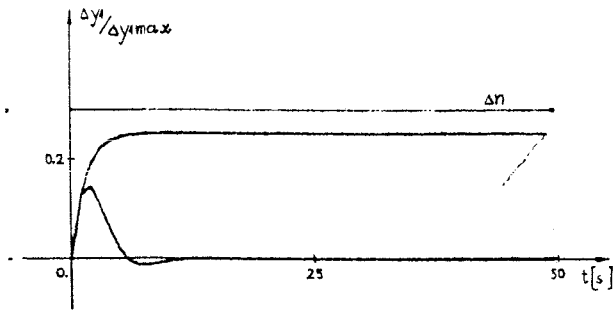
- /5/ M. Atanasijević, "Diplomsko delo", FE, Ljubljana, 1981.
- /6/ M. Atanasijević, F. Bremšak, R. Karba, "Načrtovanje računalniškega vođenja semišaržne destilacijske kolone", Zbornik referatov simpozija o uporabi računalništva in procesne tehnike v kemijski in farmacevtski industriji, pp 286-297, 1982.
- /7/ S. Strmčnik, "Matematično modeliranje velikih sistemov z metodami identifikacije in poenostavljanja", disertacija, Ljubljana 1979



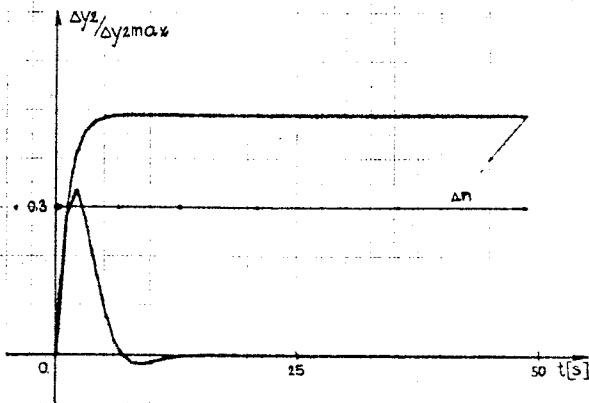
Slika 2a. Potek prvega regulacijskega vhoda



Slika 2b. Potek drugega regulacijskega vhoda



Slika 3. Potek prvega izhoda reguliranega razstavljenega sistema, nereguliranega razstavljenega sistema in motnje na prvem vhodu



Slika 4. Potek drugega izhoda reguliranega razstavljenega sistema, nereguliranega razstavljenega sistema in motnje na prvem vhodu