

# Nekatere prednosti uporabe multivariabilnih regulatorjev pri vodenju industrijskih procesov

Matej Perše

mentor: Maja Atanasijević - Kunc

Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25

1000 Ljubljana, Slovenia

E-mail: [matej\\_pershe@yahoo.com](mailto:matej_pershe@yahoo.com)

## *Some advantages of multivariable Controllers in Industrial Process Control*

### *Abstract:*

*The work deals with two approaches to the control design of binary distillation column, representing frequently treated multivariable industrial process, on the basis of linearized model. The evaluation of the control strategies on the basis of comparative study shows, that multivariable controller enables better control with less energy consumption that corresponding univariable controllers scheme.*

## 1 Uvod

Čas, v katerem živimo, zahteva od podjetij, ki želijo uspeti na vse bolj konkurenčnem trgu, kvalitetnejšo, fleksibilnejšo in vse bolj ceneno proizvodnjo materialnih dobrin ob minimalni porabi surovin in energije. Kompleksnost sistemov, ki lahko zadostijo vsem pogojem, zahteva, da se vse več industrijskih organizacij zateka k novim, naprednejšim znanjem. Med slednja na področju avtomatizacije industrijskih proizvodnih procesov prav gotovo spadajo znanja o multivariabilnih (MV) sistemih.

V delu sta prikazana dva različna pristopa k načrtovanju vodenja lineariziranega modela binarne destilacijske kolone, ki predstavlja lep primer multivariabilnega procesa. Pristopa sta v primerjalni študiji ustrezno ovrednotena.

## 2 Opis binarne destilacijske kolone

Destilacija se veliko uporablja v naftni

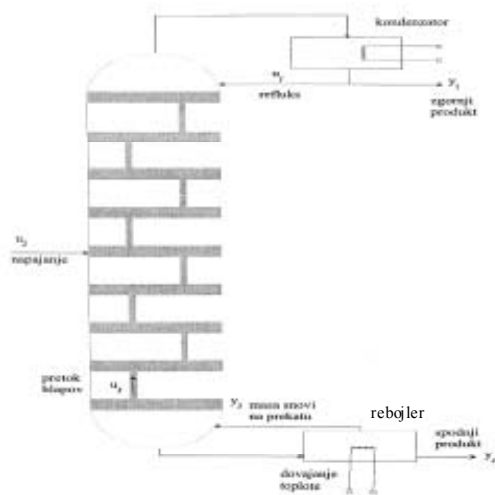
industriji, ter povsod tam, ker je potrebno neko več-komponentno zmes razgraditi na posamezne komponente na osnovi različne hlapnosti. Destilacijsko kolono lahko predstavimo kot multivariabilni sistem, saj spreminjanje referenčne vrednosti koncentracije ene komponente neposredno vpliva na sestavo drugih [3]. Zelo pomembno je tudi spreminjanje toplotnih in tlačnih razmer, ter pretokov, ki se ravno tako odražajo na celotnem profilu sestave snovi.

Splošna lastnost multivariabilnih (MV) sistemov je, da imajo več vhodov in izhodov, vendar pa to ne pomeni, da je vsak sistem, pri katerem lahko merimo več veličin multivariabilen. Tako lahko govorimo o MV sistemu samo v primerih, ko želimo doseči določeno obnašanje izhodov zaprtotlačnega sistema z hkratnim vplivanjem na več vhodov. Pri tem v splošnem predpostavimo možen vpliv vsakega vhoda na izhode.

V primeru, ko ima sistem enako število vhodov in izhodov ter posamezen vhod vpliva le na en izhod in nimamo interakcij med izhodi, pa govorimo o razstavljenih sistemih, saj takšen sistem razpade na več univariabilnih podsistemov, ki jih je mogoče obravnavati ločeno.

Obravnavana destilacijska kolona sestoji iz rebojlerja, destilacijske kolone in kondenzatorja (slika 1). V rebojlerju se preko pripadajočega grelca zagotavlja dotok hlapov, ki se dvigajo po destilacijski koloni in pri tem oddajo del svoje energije na vsakem prekatu, s tem pa še dodatno pripomorejo k izhlapevanju laže hlapne

komponente. Naloga kolone je razgraditi mešanico na predpisane koncentracije komponent, pri čemer se koncentracija lažje hlapne snovi proti vrhu povečuje, koncentracija težje hlapne pa zmanjšuje. V kondenzatorju moramo zagotoviti zadostno izmenjavo toplotne energije, da lahko pride do utekočinjenja par.



Slika 1: Shematski prikaz binarne destilacijske kolone

V primeru nezadostne izmenjave, pa ni nobene potrebe po dodatnem hlajenju destilacijske mešanice, saj se del tekočine vrne na vrh kolone kot refluksni (povratni) tok. To nalogo opravlja regulator refluksa, ki vrača del kapljevine iz kondenzatorja nazaj v kolono, preostanek pa odvaja kot zgornji produkt

Linearizirani model obravnavanega sistema lahko zapišemo v naslednji obliki [2]:

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

kjer so vrednosti matrik A,B,C in D v obravnavanem primeru naloge:

$$A = \begin{bmatrix} -0.0900 & 0.1200 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0600 & -0.1800 & 0.1200 & 0.0000 & 0.0000 & -0.1340 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0600 & -0.2800 & 0.1200 & 0.0000 & 0.1340 & -0.0960 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1600 & -0.2800 & 0.1200 & 0.0000 & 0.0960 & -0.0840 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1600 & -0.2000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0840 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.2000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.2000 & -0.2000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.2000 & -0.2000 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0770 & 0.0000 & -0.0670 \\ 0.1540 & 0.0000 & -0.0330 \\ 0.0000 & 0.1000 & -0.0180 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.0250 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.0990 \\ 0.2000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.2000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(3,4,5)

Vhodne in izhodne spremenljivke pa so:

$u_1(t)$  ... refluksni pretok;

$u_2(t)$  ... dotok napajalne zmesi;

$u_3(t)$  ... tok hlapov po koloni navzgor;

$y_1(t)$  ... sestava lažje hlapne komponente v kondenzatorju na vrhu kolone;

$y_2(t)$  ... sestava težje hlapne komponente v rebojlerju na dnu kolone;

$y_3(t)$  ... masa snovi na prekatu nad rebojlerjem;

Cilj načrtovanja vodenja je kar se da preprost regulator, ki bo omogočal čim kvalitetnejše sledenje spremembam referenčne veličine ob minimalni porabi energije. Maksimalne predvidene spremembe referenčne veličine so:

$$\begin{aligned} |ref1| &\leq 0.05 \\ |ref2| &\leq 0.05 \\ |ref3| &\leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

### 3 Analiza odprtozančnega sistema

Funkcije analize sistema so zagotovo najpogostejše izvajane operacije, tako v fazi priprave modela, kot v fazi načrtovanja regulatorja, saj lahko le ob dobrem poznavanju problema izberemo med potencialno dobrimi postopki načrtovanja regulatorja. V nadaljevanju si bomo ogledali nekatere najpomembnejše lastnosti našega

procesa, ki nam podajajo omejitve pri načrtovanju, prav tako pa nam povedo ali je načrtovanje regulatorja po določeni metodi sploh mogoče.

**a) Stabilnost sistema**, je odvisna od lege polov. Ugotovimo lahko lahko, da je sistem stabilen, saj vsi poli ležijo v levi "s" polravnini.

Poli: -0.4693, -0.2883, -0.2000, -0.2000,  
-0.2000, -0.1870, -0.0644, -0.0211

### b) Vodljivost in spoznavnost

Vodljivost nam govori o spetosti vhodov z načini sistema, medtem ko nam spoznavnost govori o spetosti izhodov z načini sistema.

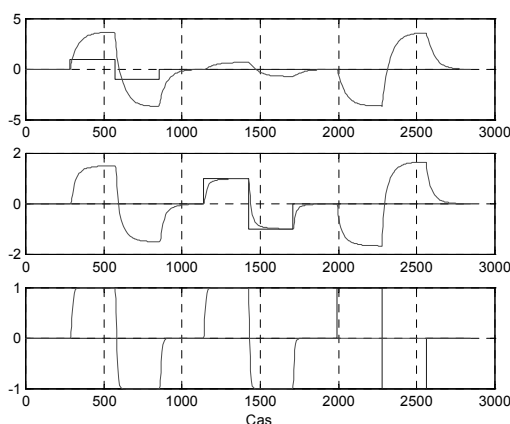
Za naš primer velja, sta ranga vodljivostne in spoznavnostne matrike enakega redu sistema, kar pomeni, da je sistem vodljiv in spoznaven.

### c) Ojačenje sistema v ustaljenem stanju

Matriko enosmernega ojačenja definira izraz:

$$\underline{K}_s = \underline{G}(0) = \begin{bmatrix} 3.6821 & 0.6899 & -3.6268 \\ 1.5067 & 0.9913 & -1.6649 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Iz enačbe 5 je razvidno, da je sistem v ustaljenem stanju interaktiven glede na vse tri izhode. Opazimo lahko tudi, da z vzbujanjem tretjega vhoda ne moremo vplivati na tretji izhod ( $g_{33} = 0$ ). Posamezni vplivi vhodov na izhode so razvidni iz sliki 2.



Slika 2: Časovni odzivi odprto-zančnega sistema na stopničasto vzbujanje

### e) Funkcionalna vodljivost

Funkcionalna vodljivost sistema nam pove ali je mogoče z vhodi linearno neodvisno vplivati na vse izhode. Če hočemo, da bo ta pogoj izpolnjen, mora biti matrika prenosnih funkcij  $\underline{G}(s)$  nesingularna in ugotovimo lahko, da je v našem primeru temu pogoju zadoščeno.

### f) Ničle sistema

S stališča omejitev pri načrtovanju so velikega pomena nespremenljive ničle, ki so v obravnavanem primeru, ker je sistem vodljiv in spoznaven, kar enake prenosnim. Vplivajo namreč na lastnost izhodne funkcionalne vodljivosti. V našem primeru lahko ugotovimo, da ima sistem štiri prenosne ničle:

- prenosna ničla(1) = -0.1400
- prenosna ničla(2) = -0.5004 + 0.0336i
- prenosna ničla(3) = -0.5004 - 0.0336i
- prenosna ničla(4) = -0.0796

### e) Izhodna funkcionalna vodljivost

Izhodna funkcionalna vodljivost pomeni razširitev lastnosti funkcionalne vodljivosti. Če prenosne ničle ležijo v desni s-polravnini lahko v splošnem pričakujemo, da bodo večja zančna ojačenja zaprtizančni sistem destabilizirala.

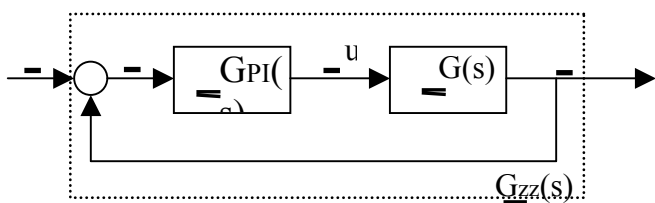
## 4 Načrtovanje vodenja multivariabilnega sistema

V nadaljevanju bomo prikazali pristop k načrtovanju univariabilnih in multivariabilnih regulatorjev za vodenje obravnavanega multivariabilnega sistema. V primeru, da sistem z več vhodi in več izhodi ne bi imel križnih povezav (razstavljen sistem), bi lahko za vsak vhodno – izhodni par spremenljivk načrtali posamezen regulator popolnoma identično, kot v primeru univariabilnih sistemov. Vendar pa so ravno križne povezave glavna značilnost multivariabilnih sistemov in zato pride pri realizaciji posamezne povratne zanke do spremembe lastnosti celotnega sistema. Tako se lahko zgodi, da postanejo, pri realizaciji ene povratne zanke, nestabilne vse predhodno realizirane zanke ali pa se njihove lastnosti (stabilnost, časovne konstante, itd.) zelo

poslabšajo. Neupoštevanje tega dejstva lahko pripelje do povsem neuporabnih končnih rezultatov.

#### 4.1 Načrtovanje univariabilnih regulatorjev za vodenje multivariabilnega sistema

S stališča enostavnosti načrtovanja in obravnave regulatorja je ta metoda zelo uporabna, saj lahko v določenih primerih dosežemo popolnoma zadovoljivo kvaliteto vodenja. Slika 3 prikazuje bločno shemo zaprtozračnega sistema.



Slika 3: Bločna shema zaprtozračnega sistema

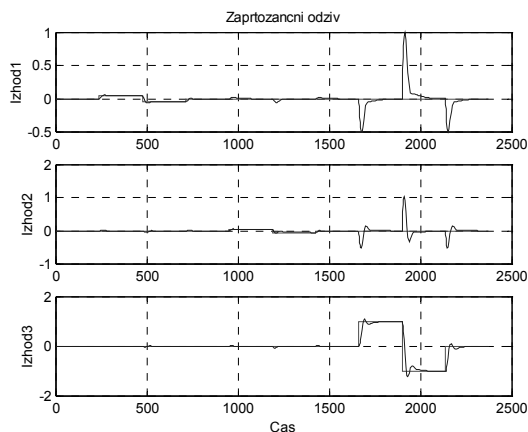
Ker imamo opravka z proporcionalnim sistemom, smo se najprej odločili za uporabo univariabilnih PI (proporcionalno – integrirnih) regulatorjev v posameznih zankah. Matriko regulatorja lahko tako predpostavimo kot:

$$G_{PI}(s) = \begin{bmatrix} kp_{11} & 0 & 0 \\ 0 & kp_{22} & 0 \\ 0 & 0 & kp_{33} \end{bmatrix} + \frac{1}{s} \begin{bmatrix} ki_{11} & 0 & 0 \\ 0 & ki_{22} & 0 \\ 0 & 0 & ki_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

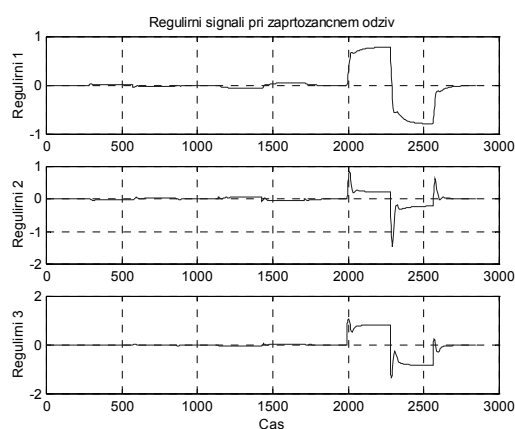
Postopek načrtovanja vodenja multivariabilnega sistema z univariabilnimi regulatorji poteka tako, da najprej nastavimo ojačenje elementa  $kp_{11}$ , ostali elementi pa so enaki nič. V naslednjem koraku nastavimo ojačenje  $kp_{22}$  in tako naprej, vse do elementa  $ki_{33}$ . Seveda je načrtovanje iterativen postopek in moramo zato posamezne korake večkrat ponoviti.

Na slikah 4 in 5 so prikazani časovni poteki izhodnih signalov in regulirnih veličin zaprtozračnega sistema, pri naslednjih nastavitvenih parametrih regulatorja:

$$kp_{11} = 0.5349, kp_{22} = 1.1653, kp_{33} = 0.8387, \\ ki_{11} = 0.0530, ki_{22} = 0.055, ki_{33} = 0.070$$



Slika 4: Časovni odzivi zaprtozračnega sistema



Slika 5: Časovni poteki regulirnih veličin

Kot je razvidno iz slik 4 in 5, dobimo kar zadovoljivo sledenje referenčnim veličinam. Na slikah je tudi lepo razvidna prisotnost križnih povezav, ki jih z uporabo univariabilnih regulatorjev nismo odpravili. Vzemimo za primer odziv prvega izhoda. Vpliv križnih povezav bi lahko zmanjšali z večanjem ojačenja prve znake, vendar pa bi se kmalu izkazalo, da bi s tem, zaradi vpliva prvega vhoda na ostale izhode, poslabšali odzive ostalih izhodov. Tovrstne probleme skušajo na tak ali drugačen način odpraviti metode za načrtovanje multivariabilnih regulatorjev.

#### 4.2 Načrtovanje multivariabilnega regulatorja

Klub temu, da je bilo preizkušenih več različnih metod načrtovanja MV – regulatorjev, kot so:

- metoda za diagonalizacijo matrike prenosnih funkcij (Daviso-nova metoda),
- metode inverznih Nyquistovih diagramov

(Rosenbrockova metoda, Edmunds-ova optimizacija),

- metode za premikanje polov (povratne zveze iz stanj, povratne zveze iz izhodov),
- metode za razstavljanje sistema

pa je v nadaljevanju predstavljena le metoda Edmunds-ove optimizacije, pri kateri so bili, glede na podane zahteve (kvaliteta vodenja, poraba energije, kompleksnost načrtovanja, itd.), dobljeni najboljši rezultati.

### Metoda Edmunds-ove optimizacije

Osnovna ideja te metode je, s pomočjo enotine povratne zanke in dinamičnega regulatorja  $G(s)$  (glej sliko 3), zagotoviti želeno obliko zaprtozančnega sistema  $\underline{G}_{zz}(s)$ .

Z regulatorjem skušamo tako v našem primeru odpraviti vpliv križnih povezav. Ker je načrtovanje takšnega regulatorja zelo odvisno od presoje in spretnosti načrtovalca, je Edmunds predlagal optimizacijski postopek, ki ga vršimo v frekvenčnem prostoru.

Pri tem postopku je potrebno podati fre-kvenčni karakteristiki odprtozančnega, in zelenega zaprtozančnega sistema (enačba 9), imenovalca regulatorja ter strukturo števec regulatorja.

$$\underline{G}_{zz}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(Ts+1)^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(Ts+1)^3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(Ts+1)^3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

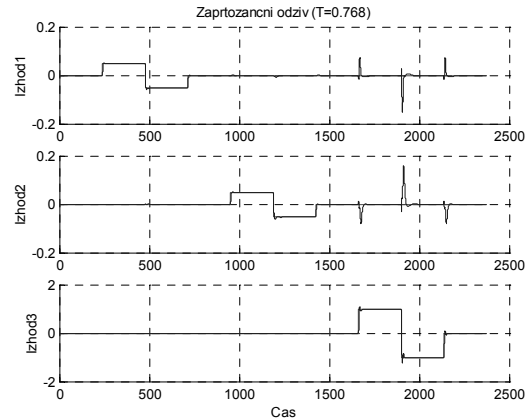
$$T = 0.768 \text{ s}$$

Odločili smo se za načrtovanje multivariabilnega PI – regulatorja, s čimer je definiran tudi skupni imenovalca. Optimizacijski postopek je predlagal naslednjo obliko regulatorja:

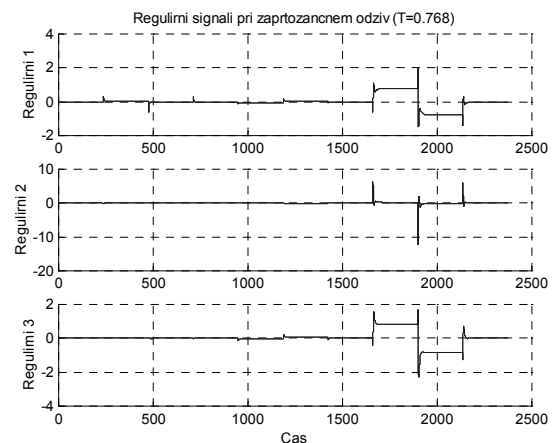
$$G_{PI}(s) = \begin{bmatrix} 6.081 + \frac{0.645}{s} & -2.352 & -\frac{0.6338}{s} & -0.618 + \frac{0.5704}{s} \\ -0.711 - \frac{0.897}{s} & -0.0830 + \frac{0.409}{s} & 6.275 - \frac{0.155}{s} \\ -0.158 + \frac{0.114}{s} & -3.025 - \frac{0.927}{s} & -0.428 - \frac{0.6203}{s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Na slikah 6 in 7 sta prikazana časovna odziva zaprtozančnega sistema in regulirne

veličine, kjer lepo je razvidno, da se je amplituda motenj, zaradi vpliva križnih interakcij pri uporabi tega regulatorja zmanjšal kar za petkrat.

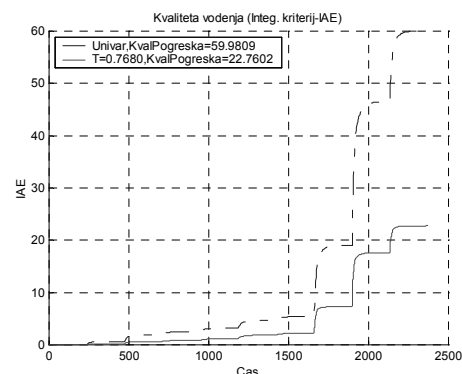


Slika 6: Časovni odzivi zaprtozančnega sistema

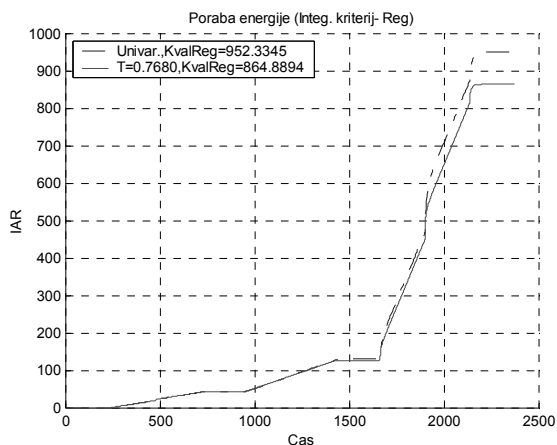


Slika 7: Časovni poteki regulirnih veličin

Razlika v kvaliteti vodenja in porabi energije je še lepše razvidna iz slik 8 in 9, kjer sta prikazana integrala absolutne vrednosti vseh pogreškov (IAE) in regulirnih veličin (IAU).



Slika 8: Prikaz kvalitete vodenja pri uporabi posameznega regulatorja



Slika 9: Prikaz porabe energije pri uporabi posameznega regulatorja

Kot lahko razberemo iz zgornjih dveh slik, je kvaliteta vodenja binarne destilacijske kolone z multivariabilnim regulatorjem za kar 310 % boljša, kot v primeru uporabe UV - regulatorja. Poleg tega pa je manjša tudi energija, ki je potrebna za doseg tega cilja (za 10 %). V prid uporabe multivariabilnega regulatorja pa govorijo tudi podatki prikazani v tabeli 1.

Tabela 1: Splošni kriteriji vrednotenja posameznega zaprtozančnega sistema

	UV – regulator	MV - regulator
IAE	69,98	22,76
IAU	952,33	864,89
mpp [%]	100,3	20,8
max (U)	1,08	6,27
min (U)	- 1,46	- 13,3
sprememba pri 50% omejitvi reg. veličine	opazna	neopazna
kompleksnost regulatorja	nizka	nizka
težavnost načrtovanja	nizka	srednja

opomba: mpp...maksimalni procentualni prevzpon

V tabeli 1 so podane samo nekatere najsplošnejše karakteristike posameznega regulatorja. Če si jih natančneje ogledamo, ter pri tem upoštevamo tudi časovne odzive na izhodnih signalov, lahko ugotovimo, da kažejo vsa navedena dejstva v prid uporabe multivariabilnega regulatorja. Tudi dejstvo, da potre-

bujemo pri multivariabilnem regulatorju večje amplitude regulirne veličine ni problem, saj se v primeru, da te omejimo tudi do 50 %, odziv sistema bistveno ne spremeni.

Na koncu se lahko vprašamo, zakaj bi sploh uporabili multivariabilni regulator in porabili velike vsote denarja, če dobimo zadovoljive rezultate že z uporabo univariabilnega. Odgovor na to vprašanje je zelo preprost: Živimo v krutem kapitalističnem svetu, v katerem je prodor na trg mogoč le z najkvalitetnejšimi izdelki. Kar pa zadeva sam finančni vložek potreben za dograditev in vzdrževanje, lahko ugotovimo, da se investicija lahko zelo hitro povrne zaradi manjše porabe energije, manjšega izpada produkta ter ne nazadnje višje prodajne cene zaradi boljše kvalitete produkta.

## 5 Zaključek:

V delu sta obravnavana dva različna pristopa k načrtovanju vodenja multivariabilnega sistema destilacijske kolone. Prikazane so bile nekatere prednosti uporabe multivariabilnega regulatorja.

Ugotovljeno je bilo, da se da z primerno izbiro multivariabilnega regulatorja doseči veliko boljšo kvaliteto vodenja in zmanjšati porabo energije, ki je potrebna za doseg zastavljenega cilja.

## Literatura:

- [1] **I. M. Maciejowski**, *Multivariable Feedback Design*, Addison – Wisley Ltd., 1989.
- [2] **W. Harmon Ray**, *Advanced, Advanced Process Control*, McGraw – Hill Book Company, 1981.
- [3] **D. Matko, R. Karba, B. Zupančič**, *Simulation and modelling of continuous systems*, Prentice Hall international Ltd., Ljubljana 1992.
- [4] *Multivariable Frequency Domain Toolbox (A Tutorial)*