

# Učinkovitost ekspertnih sistemov pri načrtovanju vodenja industrijskih procesov

Maja Atanasijević-Kunc in Rihard Karba

Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-mail: [maja.atanasijevic@fe.uni-lj.si](mailto:maja.atanasijevic@fe.uni-lj.si), [rihard.karba@fe.uni-lj.si](mailto:rihard.karba@fe.uni-lj.si)

## *Efficacy of Expert Systems in Industrial Process Control Design*

*Abstract: In the paper the idea of expert system aid is presented for the industrial process control design. The goal of the program development is to simplify some of design steps while in the same time it should stimulate the study of solution efficacy, of individual design goal importance and of relative evaluation of given solutions as such analytical results can represent the starting point also for the economic evaluation.*

### 1 Uvod

Ugotovimo lahko, da ima težavnost načrtovanja vodenja vzroke v svoji raznolikosti in specifičnosti posameznih problemov [1]. Ta raznolikost ima za posledico, da je v eksaktni (numerično definirani) obliki praktično nemogoče zaobjeti vse značilnosti obravnavanega problema, tj. opisa delovanja sistema (model, omejitve delovanja, cilji načrtovanja), kaj šele, da bi omenjeno problematiko lahko predstavili v enotni obliki, primerni za vse situacije. Te ugotovitve lahko razširimo tudi na načrtovanje rešitve, saj je pri tem potrebno izbrati oz. izbirati tako med različnimi pristopi oz. metodami k načrtovanju, nikakor pa ne moremo izvzeti dejstev, kot so zatečena situacija, ekonomska upravičenost, možnosti vzdrževanja in podobno.

Takšna kompleksnost problematike je seveda lahko neprijetna in glede na objavljene podatke dostikrat vodi v situacijo, kjer smo z rešitvijo, ki "deluje" zadovoljni, ne da bi se pri tem vprašali, ali bi morda z nekoliko več truda dejansko lahko izboljšali delovanje procesa ali pa morda

to pravzaprav iz ekonomsko upravičenih razlogov ni smiselno.

Na osnovi podanega razmišljanja bi lahko zaključili, da bi bila načrtovalcu vodenja v precejšnji pomoč programska oprema, ki bi skušala vsaj deloma poenostaviti omenjeno problematiko v posameznih fazah, to pomeni v fazi definicije problema načrtovanja, v fazi samega načrtovanja, v fazi vrednotenja oz. ocenjevanja uspešnosti načrtovanja in bi na osnovi tega omogočila sklepanje o nadaljnjih korakih v cikličnem postopku načrtovanja. Prav zadnja od naštetih faz pa je tista, ki predstavlja eno glavnih značilnosti programske opreme, ki je v literaturi pogosto definirana kot ekspertni sistem (ES).

V nadaljevanju bomo na primeru značilnega procesnega problema, tj. destilacije, skušali ilustrirati pristop k reševanju nekaterih od naštetih problemov.

### 2 Struktura načrtovanja

Predlagan koncept načrtovanja izhaja iz značilnih aktivnosti načrtovalca, pri čemer smo skušali čim bolj zadostiti tudi naslednjim zahtevam:

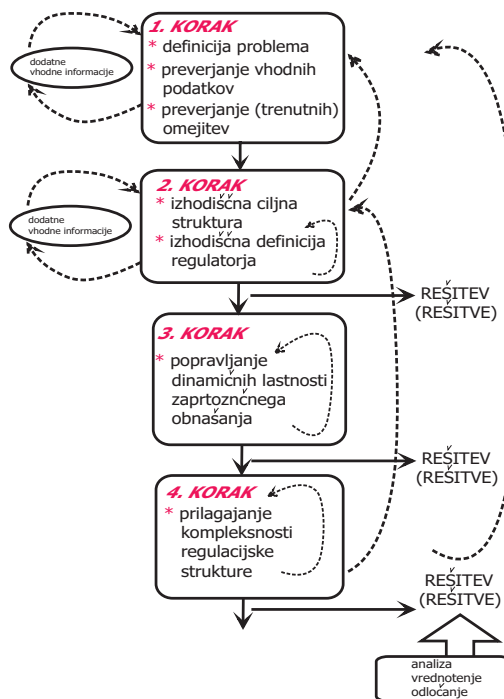
- izhodiščna situacija mora biti preprosta in modularna;
- modularnost naj zagotovi po eni strani enostavno dograjevanje,
- po drugi pa naj skuša na čim bolj učinkovit način povezati želene lastnosti obnašanja zaprtozančnega sistema s potekom načrtovanja;
- realizacija načrtovanja naj omogoča vključevanje različnih algoritmov pa

- tudi izkušenj, ki so pogosto ključnega pomena pri iskanju primernih rešitev;
- rezultati načrtovanja naj bodo predstavljeni v takšni obliki, da bodo omogočali preprosto analizo in vrednotenje glede na zastavljene cilje, spodbujali pa naj bi tudi k premisleku o pomembnosti posameznih kriterijev; preglednost rezultatov je pomembna tudi pri odločanju o nadaljnjih korakih načrtovanja;
  - uporaba programske opreme naj bo preprosta in naj omogoča prilagajanje načrtovalcu.

Nakazane ideje smo preizkušali v programskem okolju Matlab, ki omogoča uporabo številnih orodij in enostavnost prilagajanja posameznih izračunov uporabniku, poleg tega pa lahko načrtovalec zaradi prisotnosti podatkov v delovnem prostoru praktično v katerikoli fazi nadaljuje z načrtovanjem na osnovi lastnih idej.

Sam potek načrtovanja smo zasnovali na osnovi diagrama, kot je ilustriran na sliki 1. Vidimo, da je razdeljen v 4 glavne korake oz. faze načrtovanja, ki jih, ob upoštevanju ugotovitev, dobljenih med načrtovanjem, lahko v primernem zaporedju izvedemo tudi večkrat. Takšen pristop je potreben zaradi dejstva, ker metode načrtovanja ne zagotavljajo doseganja vseh zastavljenih ciljev, ne omogočajo direktnega upoštevanja določenih zelenih lastnosti, poleg tega pa praviloma tudi ne ponujajo upoštevanja strukturnih lastnosti same realizacije. Lahko bi tudi ugotovili, da bo načrtovalec zaupal določeni rešitvi, če bo preiskal dovolj širok spekter možnosti in bo na osnovi vrednotenja glede na zastavljene cilje lahko argumentirano izbral v množici potencialno zanimivih realizacij načrtovanja. Vloga posameznih korakov oz. faz načrtovanja je tako naslednja.

V 1. koraku definiramo informacijo o sistemu in ciljnih načrtovanja ter po potrebi preverimo konsistentnost vhodnih podatkov. Sledi preverjanje numeričnih lastnosti sistema glede na vgrajene možnosti načrtovanja.



Slika 1: Pomembnejši koraki načrtovanja

V 2. koraku ocenimo “limitno” najpreprostejšo dosegljivo zaprtzožnčno strukturo in glede na zastavljene cilje tudi njene parametre. Sledi določanje ustrezne kompleksnosti regulatorja, s pomočjo katere se bomo skušali čim bolj približati zadanim ciljem.

V 3. koraku se izvrši prilagajanje parametrov regulatorja ob hkratnem upoštevanju omejitev reguliranih signalov in želenih hitrosti prehodnih pojavov zaprtzožnčnega sistema.

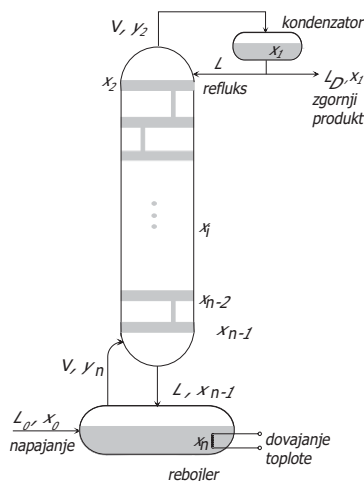
V okviru 4. koraka pa je omogočeno proučevanje prilagajanja in poenostavljanja regulacijske strukture ob hkratnem vrednotenju rešitev glede na zastavljene cilje.

Ilustrirajmo nekoliko natančneje opisani potek za primer načrtovanja vodenja destilacijske kolone.

### 3 Načrtovanje vodenja binarne destilacijske kolone

Shematično je naprava ilustrirana na sliki 2.

V obravnavanem primeru binarne kolone gre za ločevanje dveh pomešanih komponent na osnovi različne hlapnosti.



Slika 2: Shematični prikaz obravnavane destilacijske kolone

Na delovanje procesa lahko vplivamo z refluksnim pretokom  $L(t)$  ter spreminjanjem dovajanja toplotne energije v rebojler in s tem na pretok hlapov  $V(t)$  po koloni navzgor. Sistem torej deluje kot multivariabilen, z dvema vhodnima veličinama ( $L(t)$  in  $V(t)$ ) ter dvema izhodoma (sestava lažje hlapne komponente v kapljevinski fazi na vrhu kolone  $x_2(t)$  in na dnu  $x_{n-1}(t)$ ).

Kot smo omenili, načrtovanje pričenjamo na osnovi informacij o procesu, poznanih omejitvah in želenih ciljeh. Informacijo o samem procesu vnesemo v obliki linearnega modela v prostoru stanj, ki ima v obravnavanem primeru naslednjo obliko [2]:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -0.4352 & 0.4382 & 0.0172 & -0.0194 \\ -0.1229 & 0.1211 & -0.0092 & 0.0104 \\ -0.1981 & 0.1931 & -0.3431 & 0.3535 \\ 0.1017 & -0.0970 & -0.1698 & 0.1611 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.1259 & -0.0974 \\ 0.1182 & -0.0802 \\ 0.2923 & -0.1168 \\ 0.2198 & -0.0932 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x(t)$$

Omejitve se v danem primeru nanašajo na hod obeh regulirnih signalov:

$$|u_1| \leq 0.045; \quad |u_2| \leq 0.07$$

Nadalje lahko predvidevamo spremembe referenčnih signalov znotraj naslednjega območja:

$$|ref_1| \leq 0.02; \quad |ref_2| \leq 0.05$$

V kolikor se odločimo za definiranje ciljev načrtovanja v časovnem prostoru (pogost primer pri problemih procesnega vodenja), je le-te

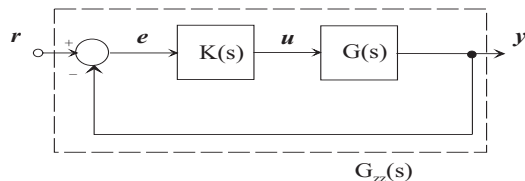
mogoče bolj ali manj natančno definirati s šestimi kriteriji, ki se nanašajo na stabilnost, maksimalno in minimalno časovno konstanto, kompleksnost regulacijske strukture, matriko enosmernih ojačenj, čase umiritve in maksimalne prenehaje. V mnogih praktičnih primerih načrtovalec še nima dovolj dobre predstave o konkretnih vrednostih posameznih kriterijev, želi pa si, da bi bilo delovanje sistema stabilno, ostale lastnosti pa kar mogoče dobre ob uporabi čim preprostejše regulacijske strukture. V takšnem primeru (to privzemimo tudi mi) ciljev sploh ni potrebno definirati.

V delovnem prostoru Matlab-a lahko definiramo tudi ti. komunikacijski vektor, s pomočjo katerega lahko vplivamo na obseg izpisov in pojasnil izračunov, stopnjo preverjanja konsistentnosti in smiselnosti posameznih podatkov ter uravnavamo nivo pomoči, ki lahko zadeva vse od izbire prostih parametrov načrtovanja do preusmeritve toka načrtovanja (seveda v okviru danih možnosti).

Vsi omenjeni podatki se morajo pred pričetkom načrtovanja nahajati v delovnem prostoru Matlab-a. Omenimo, da smo izdelali grafični vmesnik, ki omogoča enostaven prenos teh podatkov iz vnaprej pripravljenih datotek, kot tudi dostop do nadaljnjih operacij načrtovanja. Uporabnik lahko prične načrtovanje samo s pritiskom na ustrezen gumb v pripravljenem grafičnem oknu.

V kolikor smo tako definirali parametre komunikacijskega vektorja, se pred pričetkom načrtovanja izvede tudi ustrezna analiza sistema [3], ki preveri, ali lastnosti sistema omogočajo načrtovanje glede na vgrajene možnosti. Trenutno mora sistem zadoščati naslednjim pogojem: biti mora stabilen, kvadraten, fazno minimalen in razstavljen. Pravzaprav predstavlja resnejšo omejitev le stabilnost in sicer zaradi predvidene uporabe frekvenčnega odziva, pa še ta problem je mogoče zaobiti v primeru predhodne stabilizacije ali razširitve vgrajenih optimizacijskih možnosti. Vse ostale zahteve so predvsem posledica trenutno izvedenih izračunov in jih bo v nadaljevanju mogoče premostiti. Prepričamo se lahko, da obravnavani

proces zadošča vsem potrebnim lastnostim in preidemo lahko na drugi korak načrtovanja. Pri tem predvidevamo uporabo klasične regulacijske, kot je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Klasična regulacijska struktura

V tem koraku najprej konstruiramo ciljno matriko prenosnih funkcij  $G_{zz}(s)$ , torej željeni model zaprtozančnega sistema glede na zastavljene cilje načrtovanja. Za uspešno načrtovanje je potrebno kar se da realistično oceniti tako dosegljivo strukturo kot parametre. Pri tem si pomagamo z orodjem za analizo [3], ki omogoča ugotavljanje pomembnih strukturnih lastnosti procesa, ki so pri tem ključnega pomena. Ciljno matriko (vsaj v izhodiščnem poskusu) tvorimo v naslednji obliki:

$$G_{zz}(s) = \text{diag} \left\{ \frac{(s+z_1) \cdots (s+z_m)}{(\tau_{zz}s+1)^{d_i+1} (s+z_1) \cdots (s+z_m)} \right\} \quad (2)$$

Izbrali smo jo kot diagonalno (po eni strani zaradi enostavnosti, vendar izničenje križnih povezav lahko tudi bistveno pripomore h kvaliteti), posamezni podsistemi so reda  $d_i+1$ , v členih pa so prisotne tudi sistemske ničle, ki jih z nobeno regulacijsko strukturo ne moremo premakniti. Časovne konstante minimalne realizacije pa so enake. Izbrani redi  $d_i+1$  so posledica ti. stopnje ničel multivariabilnega sistema v neskončnosti in predstavljajo najmanjšo možno dosegljivo število kasnitev med istoležnimi vhodi in izhodi. Takšno situacijo lahko numerično eksaktno sicer dosežemo zgolj ob uporabi raztavljanja iz stanj (tudi izračun ciljne strukture trenutno izvajamo s funkcijami ustreznega orodja), mi pa se ji bomo skušali z načrtovanjem približati. Pri razstavljenem sistemu lastne vrednosti sovpadajo s singularnimi vrednostmi (glavna ojačenja), oz. tudi s frekvenčnimi karakteristikami diagonalnih členov. S tem se torej skušamo približati situaciji, ko sta

najmanjša in največja singularna vrednost enaki, kar pa je v splošnem ugodno s stališča robustnosti. Poleg tega je potrebno v ciljni strukturi izbrati le en parameter, tj.  $\tau_{zz}$ . Tega pa določamo ob upoštevanju naslednjih odločitev: če so v ciljih predpisani časi umiritve,  $\tau_{zz}$  izberemo kot 1/10 srednje vrednosti le-teh v direktnih poteh, če ta pogoj ni specificiran, kot srednjo vrednost zelene minimalne in maksimalne časovne konstante, v nasprotnem primeru (kamor sodi tudi naš) pa kot srednjo vrednost minimalne in maksimalne časovne konstante izhodiščnega procesa. S tem smo pričakovano dinamiko postavili v okviru samega procesa in pri takšni izbiri se nadejamo, da bodo regulirni signali tudi znotraj predvidenih okvirov. V našem primeru sta oba diagonalna člena ciljne strukture enaka:

$$g_{zii}(s) = \frac{(s+0.2298)(s+0.0606)}{(240.2s+1)(s+0.2298)(s+0.0606)} \quad (3)$$

saj je srednja vrednost minimalne in maksimalne časovne konstante 240.2 sekund, sistem pa ima dve prenosni ničli pri  $-0.2298$  in  $-0.0606$ .

Vidimo, da takšna struktura poleg tega predvideva, da bo zaprtozančni sistem nadkritično dušen in pri stopničastem vzbujanju ne bo izkazoval pogoškov v ustaljenem stanju (implicitno upoštevanje dveh ciljev).

Sledi načrtovanje regulatorja. Pozornost je pri tem osredotočena predvsem na oceno najkompleksnejše strukture, s katero bomo skušali zagotoviti uspešno ujemanje s ciljno strukturo. Ker imamo opravka z multivariabilnim sistemom, v tej fazi predvidimo takšno tudi regulacijsko strukturo. Postopek pričnemo ob predpostavki, da bomo uporabljali regulator integrirnega značaja, ki mu bomo postopoma dvigovali red in pri tem ocenjevali ujemanje zaprtozančnega sistema s prej definirano ciljno strukturo. Parametre regulatorja v posameznem koraku ocenjujemo z Edmuds-ovo optimizacijo, ki nastavlja parametre števca prenosne funkcije regulatorja, ki jih podvržemo optimiranju. V tej fazi omogočimo optimiranje vseh elementov matrike

števec. V vsakem koraku pa je potrebno popolnoma definirati polinom v imenovalcu. Strukturo regulatorja lahko predstavimo v naslednji obliki:

$$G_R(s) = \frac{1}{s(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_x)} * N(s) \quad (4)$$

Postopek pričnemo s situacijo, ko je v imenovalcu le pol pri  $s=0$ , nato pa postopoma dodajamo člene  $(s+p_i)$ . Z vsakim dodanim členom se dviguje tudi število elementov števca, ki so podvrženi optimiranju. Optimizacija po Edmunds-u se vrši v frekvenčnem prostoru in parametre števca nastavlja v smislu minimizacije kvadrata razlike med želeno in doseženo zaprtzoančno frekvenčno karakteristiko. Pri tem določi tudi oceno odstopanja, za katero si seveda želimo, da bi bila čim manjša. V našem primeru izvajamo dodajanje polov regulatorja tako dolgo, dokler ni izpolnjen katerikoli od naslednjih pogojev: 1.) zaprtzoančni sistem je stabilen in ocena je manjša od  $10^{-12}$ ; 2.) zaprtzoančni sistem je stabilen in izboljšanje ocene je manjše od  $10^{-3}$ ; 3.) zaprtzoančni sistem je stabilen in število dodanih členov je večje od petkratne vrednosti reda sistema; 5.) zaprtzoančni sistem je stabilen in ocena se je začela slabšati; 6.) zaprtzoančni sistem je postal nestabilen. Vrednosti polov določamo tako, da jih najprej izbiramo med sistemskimi ničlami (od najmanjše do največje), nato pa kot:  $-\frac{1}{\tau_{zz}}$ . Ta postopek se je v našem primeru končal z regulatorjem naslednje oblike:

$$G_R(s) = \frac{1}{s(s+0.2298)(s+0.0606)} * \begin{bmatrix} n_{11}(s) & n_{12}(s) \\ n_{21}(s) & n_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

kjer so polinomi števca naslednje oblike:

$$\begin{aligned} n_{11}(s) &= -0.0353s^3 - 0.0142s^2 - 0.0020s - 2.8893 * 10^{-5} \\ n_{12}(s) &= 0.0294s^3 + 0.0125s^2 + 0.0016s + 3.8961 * 10^{-5} \\ n_{21}(s) &= -0.0883s^3 - 0.0364s^2 - 0.0038s - 4.4954 * 10^{-5} \\ n_{22}(s) &= 0.0380s^3 + 0.0182s^2 + 0.0024s + 5.8401 * 10^{-5} \end{aligned} \quad (6)$$

pri čemer je ocena dosegla vrednost  $1.4455 * 10^{-13}$ . Vidimo, da izbrana struktura regulatorja zagotavlja odlično ujemanje z želeno

zaprtzoančno strukturo. S tem je bil izpolnjen pogoj, ki je omogočil nadaljevanje načrtovanja pri 3. koraku.

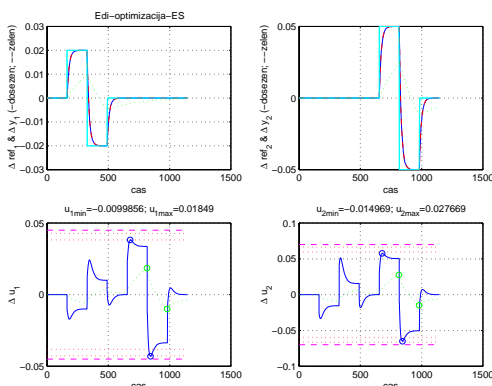
Sedaj posvetimo pozornost hitrosti prehodnih pojavov v povezavi z omejitvami regulirnega signala. Ta korak se izvaja v primeru, če je izpolnjen kateri od naslednjih pogojev: 1.) podane so omejitve hoda regulirnih signalov (kar velja v našem primeru); 2.) specificirane so zelene vrednosti časov umiritve 3.) definirani sta minimalna in maksimalna vrednost časovnih konstant. Analiza rešitve, ki jo podajajo enčbe (5) in (6) pokaže, da v našem primeru regulirni signali ne izkoriščajo celotnega dovoljenega hoda, kar pomeni, da je mogoče delovanje sistema še izboljšati. Izboljševanje poteka v zanki, pri čemer se izvajajo naslednje operacije: najprej prilagodimo  $\tau_{zz}$  v ciljni strukturi; nato izvedemo optimiranje parametrov regulatorja pri strukturi iz prejšnjega koraka; s simulacijo preverimo, ali je maksimalna vrednost katerega od regulirnih signalov manjša oz. enaka 95% dovoljene vrednosti oz. večja od 85% dovoljene vrednosti; če je ta pogoj izpolnjen, se 3. korak zaključi, sicer pride do ponovne iteracije. V našem primeru je prišlo do izpolnitve tega pogoja pri  $\tau_{zz} = 16.3517$  sekunde, pri čemer je imela matrika števec regulatorja naslednje vrednosti:

$$\begin{aligned} n_{11}(s) &= -0.5387s^3 - 0.2169s^2 - 0.0307s - 0.0004 \\ n_{12}(s) &= 0.4495s^3 + 0.1904s^2 + 0.0246s + 0.0006 \\ n_{21}(s) &= -1.3488s^3 - 0.5554s^2 - 0.0583s - 0.0007 \\ n_{22}(s) &= 0.5809s^3 + 0.2780s^2 + 0.0368s + 0.0009 \end{aligned} \quad (7)$$

ocena napake pa je znašala celo  $1.3392 * 10^{-14}$ .

Razmere v primerjavi z rešitvijo po 2. koraku, ki je prikazana s pikastimi krivuljami, so ilustrirane na sliki 4. Vidimo, da je izkoriščanje hoda regulirnih signalov bistveno izboljšalo kvaliteto sledenja. Ocenimo obe rešitvi še s primerjavo časov umiritve:

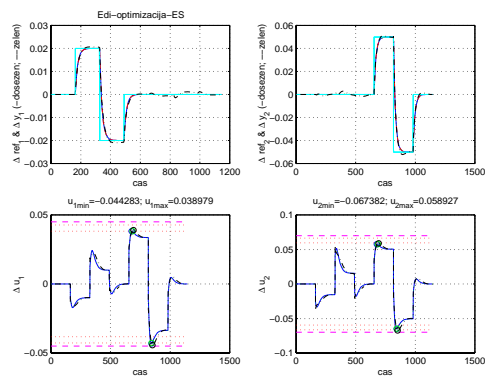
$$t_{s1} = \begin{bmatrix} 940.7335 & 0 \\ 0 & 940.7335 \end{bmatrix}; t_{s1} = \begin{bmatrix} 61.9217 & 0 \\ 0 & 61.9217 \end{bmatrix} \quad (8)$$



Slika 4: Primerjava učinkovitosti rešitve po 2. in 3. koraku načrtovanja

Vidimo, da so prehodni pojavi 2. rešitve približno 15-krat hitrejši, regulirni signali pa so še vedno znotraj dovoljenega območja. Kljub temu hitrejši sistem nima nadnihajev ustaljenega stanja.

Sedaj nadaljujemo načrtovanje s 4. korakom, kjer skušamo ugotoviti, ali je drugo rešitev mogoče poenostaviti, ne da bi pri tem veliko izgubili na kvaliteti. Poenostavljanje poteka v dveh fazah. Najprej zmanjšujemo red na popolni multivariabilni strukturi, nato pa preverjamo še možnost uporabe univariabilnih regulatorjev. V obeh primerih pričenjamo postopek poenostavljanja s postopnim odpravljanjem faktorjev v imenovalcu regulatorja. Pri tem izvajamo optimizacijo v frekvenčnem prostoru pri ciljni zaprtozančni strukturi iz prejšnjega koraka. Postopek poenostavljanja se zaključi v primeru, da sistem postane nestabilen ali če je struktura regulatorja proporcionalno-integrirna. Učinkovitost poenostavljanja multivariabilne strukture regulatorja je ilustrirana na sliki 5, kjer so razlike v odzivih vseh rešitev do proporcionalno-integrirne na prvi pogled relativno majhne. Natančnejše relativno vrednotenje vseh štirih rešitev na sliki 6 (od izhodiščne, ki predstavlja normativ, do poenostavljene) pa pokaže, da ima najvišjo oceno, kar zadeva kvaliteto, najkompleksnejša rešitev, upoštevajoč vse kriterije pa bi se odločili za malo enostavnejšo. Uporaba univariabilnih regulatorjev pa v tem primeru ni dala stabilne rešitve.



Slika 5: Primerjava učinkovitosti rešitev pri poenostavljanju MV-strukture regulatorja



Slika 6: Relativno vrednotenje rešitev

#### 4 Zaključek

Glede na podane rezultate in naše izkušnje opisano orodje lahko učinkovito uporabimo v številnih praktičnih primerih, ko je model delovanja procesa poznan. Sama zasnova omogoča razširitve in dopolnitve v vseh od opisanih korakov, kar pa bo predmet nadaljnjih raziskav.

#### 5 Literatura

- [1] S. Skogestad, and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control, Analysis and Design*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 1996.
- [2] D. Matko, B. Zupančič, R. Karba, *Simulation and Modelling of Continuous Systems, A Case Study Approach*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 1992.
- [3] M. Atanasijević-Kunc and R. Karba, *Analysis Toolbox stressing parallelism of SISO and MIMO problems*, Preprints of the 15<sup>th</sup> World Congress, IFAC, Barcelona, Spain, 2002.