

Koncept uporabe ekspertne pomoči pri nesprotnem načrtovanju vodenja

Maja ATANASIJEVIĆ-KUNC, Rihard KARBA

Izvleček: Načrtovanje vodenja sistemov, posebno multivariabilnih, je kompleksna naloga, ki zaradi tega v praksi mnogokrat rezultira v suboptimalnih rešitvah. Namen sestavka je prikazati nekatere možne poenostavitve v postopku načrtovanja, ki omogočajo definicijo pričakovane kompleksnosti regulatorja in pomagajo tudi pri iskanju ustrezne parametrizacije. Postopek je realiziran v kontekstu zaokrožene metodologije načrtovanja, zaradi modularnosti omogoča tudi upoštevanje rezultatov, izvedenih z drugačnimi algoritmi, in kombinacijo z različnimi pristopi načrtovanja. Izvedeno je svetovanje in argumentirana pomoč pri odločanju, kar so značilnosti t. i. ekspertnih sistemov. Preglednost in modularnost naj bi hkrati spodbujali tudi k razmisleku o učinkovitosti posameznih možnih rešitev, o pomembnosti možnih ciljev načrtovanja in na osnovi relativnega vrednotenja rezultatov omogočili analitično argumentirano izbiro, ki lahko predstavlja tudi osnovo ekonomskega vrednotenja.

Ključne besede: načrtovanje vodenja, multivariabilni sistemi, optimalno vodenje, ekspertni sistemi, destilacija,

■ 1 Uvod

Ugotovimo lahko, da ima težavnost načrtovanja vodenja vzroke v svoji raznolikosti in specifičnosti posameznih problemov [1]. Posledica tega je, 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 med različnimi pristopi oz. metodami načrtovanja, nikakor pa ne moremo izvzeti dejstev, kot so zatečena situacija, ekonomska upravičenost, možnosti vzdrževanja in podobno.

Takšna kompleksnost problematike je seveda lahko problematična in

glede na objavljene podatke večkrat 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 takšnega 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: v fazi definicije problema načrtovanja, v fazi načrtovanja, v fazi vrednotenja oz. ocenjevanja uspešnosti načrtovanja in bi na osnovi tega omogočila sklepanje o nadaljnjih korakih v cikličnem postopku načrtovanja vodenja. 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) [2]. Gre torej za to, da je načrtovalec ugotovitve minulih korakov načrtovanja sposoben upoštevati pri odločanju o nadaljnjih modifikacijah rešitve. Tovrstni proces je mogoče opredeliti kot učenje, vendar je v primeru pro-

gramske realizacije idej najbrž bolj upravičen izraz sklepanje, saj učenje dopušča tudi nastanek novih, izvirnih spoznanj, preiskovalni prostor programskega okolja, ki je glede na človeške sposobnosti dokaj omejen, pa je praviloma sposoben učinkovitega sklepanja le znotraj vnaprej predvidenega nabora možnosti.

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

■ 2 Struktura načrtovanja

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

- izhodiščna situacija naj bo preprosta in modularna,
- modularnost naj zagotovi enostavno dograjevanje,
- modularnost naj omogoča učinkovito povezavo želenih lastnosti obnašanja zaprtozančnega sistema s potekom načrtovanja,
- realizacija načrtovanja naj omogoča vključevanje različnih al-

Doc. dr. Maja Atanasijević-Kunc, univ. dipl. inž., prof. dr. Rihard Karba, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

goritmov pa tudi izkušenj, ki so pogosto ključnega pomena pri iskanju primernih rešitev in se kažejo po eni strani v uspešni kombinaciji metod načrtovanja, po drugi pa tudi v kombinaciji informacij, povezanih z rezultati reševanja določenega problema,

- 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 razmisleku o pomembnosti posameznih kriterijev, pri čemer je preglednost rezultatov 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 [3], 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.

Potek načrtovanja smo zasnovali na osnovi diagrama, kot je prikazan 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, ker metode načrtovanja praviloma ne zagotavljajo doseganja vseh zastavljenih ciljev, ne omogočajo direktnega upoštevanja vseh zelenih lastnosti, poleg tega pa večinoma tudi ne ponujajo možnosti eksplicitnega upoštevanja strukturnih lastnosti realizacije.

Nadalje lahko ugotovimo, 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. Vloge posameznih korakov oz. faz načrtovanja so naslednje:

V 1. fazi definiramo informacijo o sistemu in ciljih načrtovanja (v obsegu,

kot jih poznamo), o omejitvah pri delovanju ter po potrebi preverimo konsistentnost vhodnih podatkov. Sledi preverjanje numeričnih lastnosti sistema glede na vgrajene možnosti načrtovanja, seveda pa lahko načrtovalec tudi sam usmerja pregled lastnosti sistema in na takšen način pridobi zaupanje v nadaljnje odločitve.

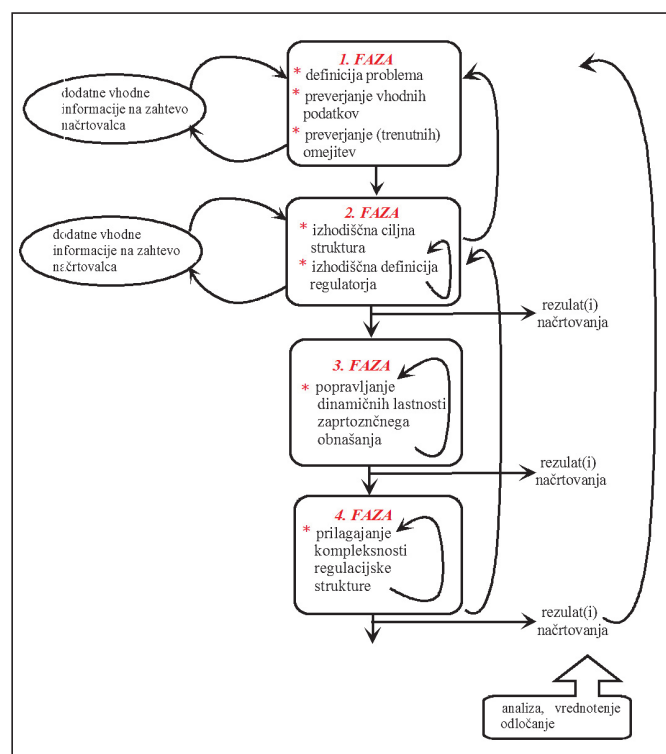
V 2. fazi izbiramo potencialno zanimivo metodo načrtovanja glede na ugotovljene lastnosti procesa in glede na cilje načrtovanja. Pri tem predstavljajo lastnosti sistema pretežno negativno selekcijo, saj je lahko uporaba določenih algoritmov zaradi specifičnih lastnosti sistema neprimerna oz. numerično neustrezna. Na pozitivno selekcijo lahko vplivajo definirani cilji načrtovanja in eventuelno predpisana struktura regulatorja, na potek izračunov pa tudi uporabnik sam.

Velja poudariti, da večinoma vse metode omogočajo določeno svobodo v načrtovanju, ki se kaže v tem, da načrtovalec ob uporabi izbranega algoritma definira določeno število vhodnih parametrov oz. dopusti, da mu pri tem svetuje sistem. Izbira slednjih je včasih preprosta, če pred-

stavljajo tudi eksplicitne vrednosti zastavljenih ciljev, pogosto pa so povezave s cilji načrtovanja zapletene in nelinearne. Med načrtovanjem si tako ustvarimo le kvalitativen vpliv teh parametrov na končni rezultat. Uporaba večine metod načrtovanja pravzaprav poteka v kontekstu nekakšnega optimizacijskega postopka, ki je seveda v situacijah, ko je načrtovalec izkušen in uporabljeno metodo dobro razume, krajši.

Če opisani način načrtovanja primerjamo s klasičnimi pristopi optimizacije, lahko ugotovimo, da so bistvene razlike v tem, da računalniška optimizacija zahteva ustrezno definirano kriterijsko funkcijo, ki mora odražati pomembnost vseh zastavljenih ciljev, upoštevati pa mora tudi možne omejitve pri delovanju zaprtozančnega sistema [4]. V primeru načrtovanja po izbranem algoritmu pa načrtovalec nastopa v vlogi ocenjevanja primernosti dobljenega rezultata. Izgradnja primerne kriterijske funkcije je običajno dokaj zahtevna naloga, saj v primeru izbire neustrezne kriterijske funkcije od optimizacijskega računalniškega postopka ni pričakovati uporabnih rezultatov. Dodatna težava, na katero moramo v takšnem primeru tudi računati, je

primerna začetna izbira optimiziranih parametrov, saj v nasprotnem primeru večina algoritmov ne najde ustreznega optima. Iskanje ustreznih agregacij vseh ciljev načrtovanja in začetnih vrednosti parametrov torej lahko povsem upravičeno enačimo z iskanjem primernih vhodnih parametrov v izbrani algoritem in z vrednotenjem rezultata po končanem načrtovanju. V obeh primerih gre za načrtovalni postopek, ki



Slika 1. Pomembnejše faze načrtovanja

bi ga želeli izboljšati oz. poenostaviti, kot je le mogoče, saj se pri tem lahko nadajamo tako uspešnejšega končnega rezultata kot tudi skrajšanja časa, potrebnega za načrtovanje.

Rezultat uporabe izbrane oz. izbranih metod načrtovanja običajno predstavlja množica bolj ali manj primernih rešitev, ki sestavljajo nekakšen okvir, znotraj katerega ob koncu načrtovanja izbiramo tisto "najboljšo" oz. najustrežnejšo. Zato ta faza načrtovanja omogoča tudi ocenjevanje "limitne" najpreprostejše dosegljive zaprtozančne strukture glede na lastnosti sistema in zastavljene cilje, omogoča izračun njenih parametrov, ki mu sledi določanje ustrezne kompleksnosti regulatorja, s pomočjo katere skušamo čim bolj zadostiti zadanim ciljem.

V 3. fazi se izvrši prilagajanje parametrov regulatorja ob hkratnem upoštevanju omejitev regulirnih signalov in želenih hitrosti prehodnih pojavov zaprtozannega sistema, saj številne metode ne omogočajo eksplcitnega upoštevanja omejitev med postopkom načrtovanja.

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

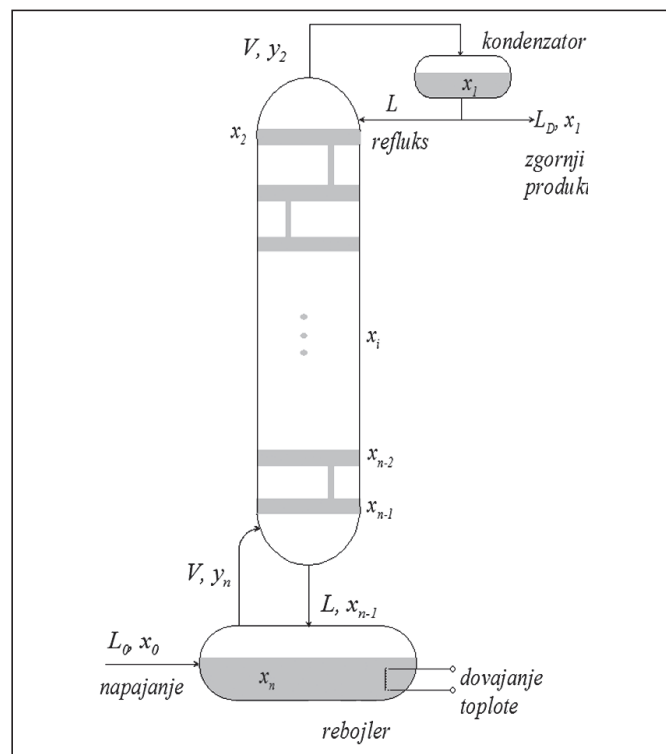
Ilustrirajmo opisane ideje nekoliko natančneje za primer načrtovanja vodenja destilacijske kolone.

■ 3 Načrtovanje vodenja binarne destilacijske kolone

Shematično je naprava ilustrirana na *sliki 2*. V obravnavanem primeru binarne kolone gre za ločevanje dveh pomešanih komponent (metanol – voda z nečistočami) na osnovi različne hlapnosti. Na delovanje procesa lahko vplivamo z refluksnim pretokom $L(t)$ in s spreminjanjem dovajanja toplotne energije v rebojler in s tem na pretok hlapov $V(t)$ po koloni navzgor, ki zato predstavljata vhodna signala. Ker želimo s tema dvema veličinama vzdrževati primerno sestavo lažje hlapne komponente na vrhu ($x_v(t)$) in na dnu kolone ($x_n(t)$)

ves čas obratovanja sistema, imamo opravka s sistemom z dvema vhodnima in dvema izhodnima signaloma, torej z multivariabilnim sistemom.

Če se odločimo za definiranje ciljev načrtovanja v časovnem prostoru (pogost primer pri problemih procesnega vodenja), je le-te mogoče bolj ali



Slika 2. Shematični prikaz obravnavane destilacijske kolone

Kot smo omenili, pričenjamo načrtovanje na osnovi informacij o procesu, poznanih omejitvah in želenih ciljih. Informacijo o samem procesu vnesemo v obliki linearnega modela v prostoru stanj, ki ima v obravnavanem primeru naslednjo obliko [5]:

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

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

Omejitve se v danem primeru nanašajo na hod obeh regulirnih signalov, ki v našem primeru znašata:

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

Nadalje lahko predvidevamo spremembe referenčnih signalov znotraj naslednjega območja:

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

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 prenihaje [6, 7]. 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

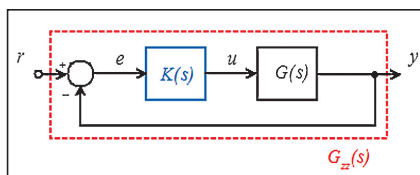
pa kar mogoče dobre ob uporabi čim preprostejše regulacijske strukture. V takšnem primeru (to privzemimo tudi mi) ciljev sploh ni potrebno definirati.

V delovnem prostoru Matlaba lahko definiramo tudi t. i. komunikacijski vektor, s pomočjo katerega lahko vplivamo na obseg izpisov in pojasnil izračunov, na 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. Omenimo tudi, 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.

Če smo tako definirali parametre komunikacijskega vektorja, se pred

pričetkom načrtovanja izvede tudi ustrezna analiza sistema, ki preveri, ali lastnosti sistema omogočajo načrtovanje glede na vgrajene možnosti. Prepričamo se lahko, da obravnavani proces zadošča vsem potrebnim lastnostim, in preidemo lahko na drugi korak načrtovanja. Pri tem predvidevamo uporabo klasične regulacijske sheme, kot je prikazana na *sliki 3*.

V tem koraku najprej generiramo ciljno matriko prenosnih funkcij $G_{zz}(s)$, torej želeni 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 [6], ki omogoča tudi ugotavljanje pomembnih strukturnih lastnosti procesa, ki so pri tem ključnega pomena.



Slika 3. Klasična regulacijska struktura

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, in sicer po eni strani zaradi enostavnosti, vendar pa se je potrebno zavedati, da izničenje oz. zmanjšanje križnih povezav praviloma tudi bistveno izboljša kvaliteto obnašanja zaprtozančnega sistema, poleg tega pa je tudi eventualno nadaljnje načrtovanje lahko precej enostavnejše in obvladljivo z ustaljenimi tehnikami. Posamezni podsistemi ciljne strukture so reda d_i+1 . Časovne konstante minimalne realizacije pa naj bodo enake.

Izbrano strukturo numerično eksaktno lahko sicer dosežemo zgolj ob uporabi razstavljanja (sistem razbijemo na med seboj neodvisne univariabilne podsisteme), mi pa se ji bomo skušali z načrtovanjem približati v takšni meri, da bomo s kvaliteto rezultatov glede na zastavljene cilje zadovoljni.

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 in enakomerne porazdelitve regulacijske moči med vse vhodne signale. Poleg tega je potrebno v ciljni strukturi izbrati le časovno konstanto τ_{zz} . To pa določamo glede na zahteve ali pa glede na minimalne in maksimalne časovne konstante obravnavanega procesa. S tem smo pričakovano dinamiko postavili v okvire procesa in pri takšni izbiri se nadejamo, da bodo regulirni signali tudi znotraj predvidenih oz. dovoljenih 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.

Analiza tudi pokaže, da bo zaprtozančni sistem nadkritično dušen in pri stopničastem vzbujanju ne bo izkazoval pogreškov 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 tudi takšno 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 generirano ciljno strukturo. Parametre regulatorja v posameznem koraku ocenjujemo z Edmudsovo 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 regu-

latorja 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 Edmundsu poteka v frekvenčnem prostoru in nastavlja parametre števca v smislu minimizacije kvadrata razlike med želeno in doseženo zaprtozančno 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. zaprtozančni sistem je stabilen in ocena je manjša od 10^{-12} ; 2. zaprtozančni sistem je stabilen in izboljšanje ocene je manjše od 10^{-3} ; 3. zaprtozančni sistem je stabilen in število dodanih členov je večje od petkratne vrednosti reda sistema; 5. zaprtozančni sistem je stabilen in ocena se je začela slabšati; 6. zaprtozančni sistem je postal nestabilen. 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:

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

Pri tem je ocena dosegla vrednost $1.4455 \cdot 10^{-13}$. Vidimo, da izbrana struktura regulatorja zagotavlja odlično ujemanje z želeno zaprtozančno strukturo. S tem je bil izpolnjen pogoj, ki je omogočil nadaljevanje načrtovanja pri 3. fazi.

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. specifičirane so želene 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 τ_{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. faza zaključi, sicer pride do ponovne iteracije. V našem primeru je prišlo do izpolnitve tega pogoja pri , pri čemer je imela matrika števecv regulatorja naslednje vrednosti:

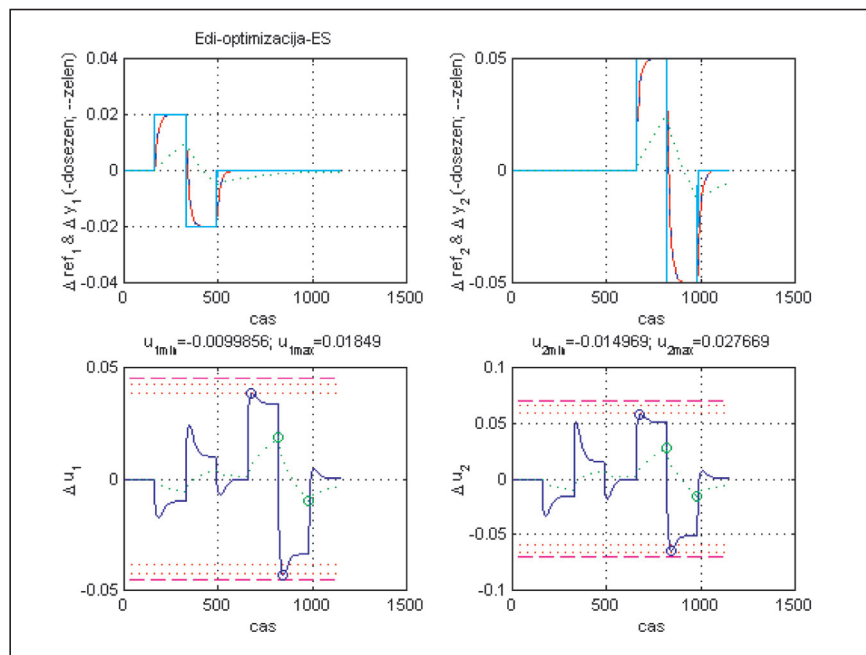
$$\begin{aligned} n_{11}(s) &= -0.5387s^3 - 0.2169s^2 - 0.0307s - 0.0004 \\ n_{12}(s) &= 0.4495s^3 + 0.1904s^2 + 0.0246s + 0.0006 \\ n_{21}(s) &= -1.3488s^3 - 0.5554s^2 - 0.0583s - 0.0007 \\ n_{22}(s) &= 0.5809s^3 + 0.2780s^2 + 0.0368s + 0.0009 \end{aligned} \quad (7)$$

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

Razmere v primerjavi z rešitvijo po 2. fazi, 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 (čas, ki je potreben, da odziv sistema doseže 2%-no tolerančno področje okoli pripadajočega referenčnega signala in ga več ne zapusti):

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

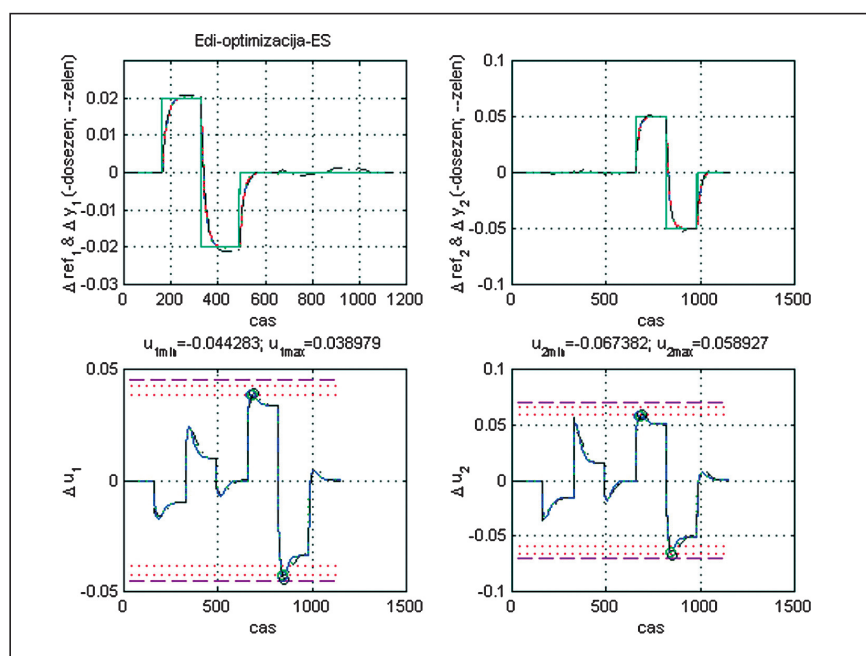
Vidimo, da so prehodni pojavi 2. rešitve približno 15-krat hitrejši, regulirni signali pa so še vedno znotraj dovoljenega območja. Kljub temu hitrejši sistem nima nadnihajev ustaljenega stanja.



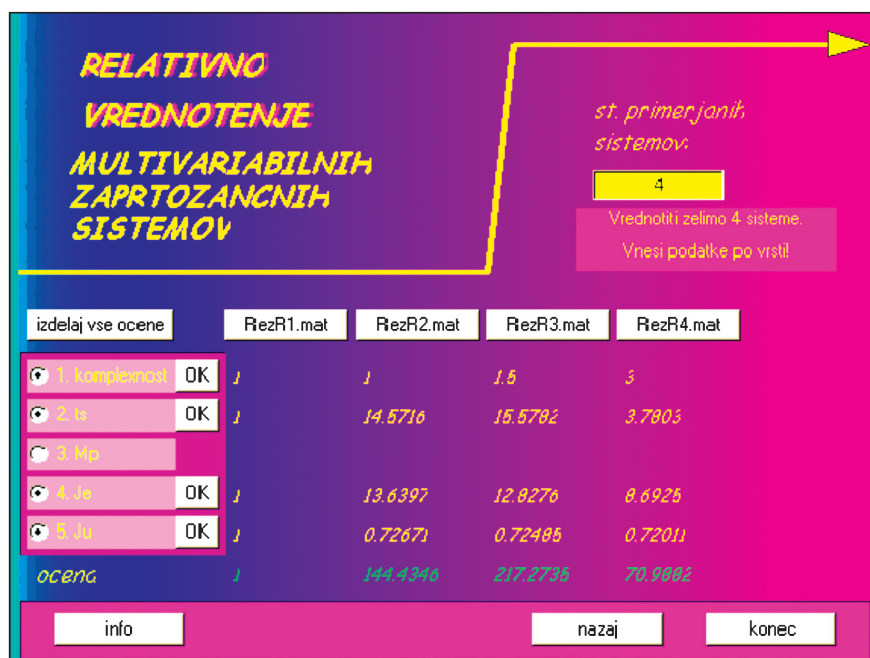
Slika 4. Primerjava učinkovitosti rešitve po 2. in 3. fazi načrtovanja

Sedaj nadaljujemo načrtovanje s 4. fazo, 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



Slika 5. Primerjava učinkovitosti rešitev pri poenostavljanju multivariabilne strukture regulatorja



Slika 6. Relativno vrednotenje rešitev

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.

4 Zaključek

V prispevku smo predstavili značilne faze načrtovanja vodenja sistemov, ki upoštevajo tudi aktivnosti načrtovalca. Na osnovi tega smo razvili metodologijo, ki je ilustrirana na primeru binarne destilacijske kolone. Vse izračune smo realizirali

v Matlabu s pomočjo razvitega orodja [7], ki podpira omenjene faze načrtovanja, njegova uporaba pa je zaradi izvedenega grafičnega vmesnika enostavna in hitra, omogoča pa tudi preprosto dodajanje in preizkušanje novih možnosti. Pri tem velja poudariti pomembnost orodja za analizo sistemov [6], ki je del opisanega okolja in katerega funkcije so ključnega pomena pri odločanju med načrtovanjem in pri vrednotenju rešitev.

Glede na podane rezultate in naše izkušnje opisani pristop in omenjeno orodje lahko učinkovito uporabimo v številnih praktičnih primerih, ko je model delovanja procesa poznan.

Sama zasnova pa omogoča razširitve in dopolnitve v vseh od opisanih faz, kar je predmet nadaljnjih raziskav.

Literatura

- [1] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control, Analysis and Design*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 1996.
- [2] M. Atanasijević-Kunc, R. Karba, *Multivariable control design with expert-aided support*. WSEAS Trans. Syst., Vol. 5, Oct. 2006.
- [3] Matlab, The MathWorks Inc. 2005.
- [4] M. Atanasijević-Kunc, A. Belič, R. Karba, *Optimal multivariable control design using genetic algorithms*, Proceedings of the 5th Vienna Symposium on Mathematical Modeling, 2006.
- [5] D. Matko, B. Zupančič, R. Karba, *Simulation and Modelling of Continuous Systems, A Case Study Approach*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 1992.
- [6] M. Atanasijević-Kunc and R. Karba, *Analysis Toolbox stressing parallelism of SISO and MIMO problems*, Preprints of the 15th World Congress, IFAC, Barcelona, Spain, 2002.
- [7] M. Atanasijević-Kunc and R. Karba, *Toolbox environment for control design with expert-aided support*, Proceedings of 10th WSEAS Int. Conf. on Systems, Vouliagmeni Beach, Athens, Greece, 2006.

The concept of expert-aided off-line control design

Abstract: Control design, especially multivariable design, is a complex task, which therefore frequently results in suboptimal solutions in process applications. The aim is to present some possible simplifications to the design approach, which enable the definition of the required complexity of the used controller and help in the parametrization procedure. The proposed approach can represent a stand-alone design method, but due to its modularity it is possible to also take into account results obtained through other approaches. At the same time the combination with other algorithms is also enabled. The realized on-line help and the analytical support to decision-making are the characteristics of expert systems. The modularity and simplicity of the proposed approach should stimulate the study of solution efficacy, of individual design-goal importance and of the relative evaluation of given solutions. Such analytical results can also represent the starting point for an economic evaluation.

Keywords: control design, multivariable systems, optimal control, expert systems, distillation,