

Načrtovanje modela in regulatorja za dinamični sistem treh povezanih shranjevalnikov z uporabo metod evolucijskega računanja

Marko CORN, Maja ATANASIJEVIĆ-KUNC

Izvleček: Delo predstavlja primerjavo rezultatov testiranj različnih evolucijskih algoritmov pri problemih modeliranja in vodenja sistema treh povezanih shranjevalnikov. Izpostavili smo tri različne probleme. Prvi je t. i. identifikacija po metodi »sive škatle«, pri čemer iščemo karakteristiko določenega elementa znotraj celotnega sistema, v našem primeru je to karakteristika izhodnega ventila. Drugi problem je identifikacija po metodi »črne škatle«, pri čemer iščemo opis celotnega sistema na podlagi odzivov sistema. Tretji problem pa je načrtovanje regulatorja za vodenje sistema. Vse probleme smo reševali z uporabo naslednjih evolucijskih metod: genetski algoritmi, diferenčna evolucija, evolucijske strategije, genetsko programiranje in novejši pristop –algoritem AMEBA. Vse metode so se izkazale pri reševanju problematike identifikacije po metodi sive škatle in pri problematiki načrtovanja vodenja sistema, posebej pa se je izkazala metoda AMEBA, saj je generirala tudi uporaben model po metodi identifikacije s črno škatlo, ki je v tem primeru med obravnavanimi najzahtevnejši problem.

Ključne besede: evolucijski algoritmi, AMEBA, modeliranje, identifikacija, regulacija, dinamični sistemi

■ 1 Uvod

Evolucijski algoritmi so optimizacijske metode, ki posnemajo proces naravne evolucije. Njihova stohastična narava ponuja velikansko prednost v primerjavi s t. i. klasičnimi algoritmi, predvsem pri reševanju kompleksnejših optimizacijskih problemov.

V splošnem lahko evolucijske algoritme razdelimo v dve večji skupini: na parametrične in strukturne algoritme. Parametrični algoritmi optimizirajo parametrično definira-

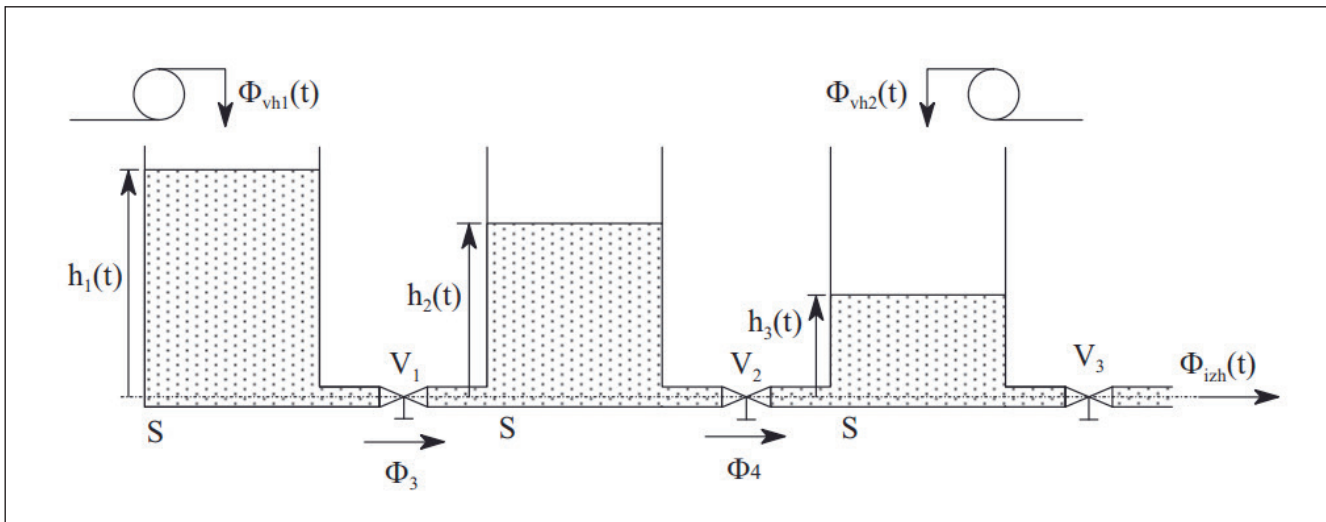
ne probleme, medtem ko strukturni algoritmi optimizirajo probleme, katerih rešitve so podane v obliki funkcij. Če prikažemo razliko na primeru načrtovanja regulacijskega sistema za poljuben dinamični proces, lahko rečemo, da parametrični algoritmi iščejo parametre regulatorja, strukturni algoritmi pa oblikujejo rešitev v celovit regulacijski zakon. Posledično strukturni algoritmi ne potrebujejo vnaprej predpostavljene strukture oz. funkcije, saj v evolucijskem procesu razvijejo lastno.

Najbolj uveljavljeni parametrični algoritmi so genetski algoritmi (GA) [1], evolucijske strategije (ES) [2], diferenčna evolucija (DE) [3] in še nekateri drugi [4]. Najbolj uveljavljeni strukturni algoritmi pa so genetsko programiranje (GP), ki pozna več različnih implementacij, med

drugimi drevesno [5] in gramatično [6], ter evolucijsko programiranje, ki je usmerjeno v razvijanje rešitev v obliki računskih avtomatov [7].

Kot smo že omenili, so evolucijski algoritmi zelo uporabni predvsem pri reševanju kompleksnejših problemov, med katere lahko uvrstimo tudi načrtovanje regulacijskih sistemov za multivariabilne dinamične sisteme. Tako so v tem delu predstavljeni in primerjani različni pristopi k načrtovanju regulacijskih sistemov s pomočjo metod evolucijskega računanja, s katerim smo skušali podrobneje analizirati relativne prednosti posameznih pristopov. Iz skupine parametričnih metod smo izbrali GA, ES in DE, iz skupine strukturnih metod pa GP na osnovi dreves in algoritem AMEBA [8–10]. Opravili smo primerjavo tako znotraj posamezne skupine

Dr. Marko Corn, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; prof. dr. Maja Atanasijević-Kunc, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko



Slika 1. Sistem treh povezanih shranjevalnikov

kot tudi med skupinama parametričnih in strukturnih metod.

Delo je organizirano na naslednji način: V razdelku 2 je kratek opis dinamičnega sistema treh povezanih shranjevalnikov, v katerem smo prikazali delovanje algoritmov. V razdelku 3 sta predstavljena matematični model in koncept regulacijskega zakona, ki smo ga predvideli za načrtovanje vodenja. V četrtem razdelku so ilustrirani rezultati identifikacije po principu sive škatle, identifikacije po principu črne škatle in rezultati načrtovanja regulacijskih sistemov, ki smo jih generirali z uporabo prej omenjenih metod evolucijskega računanja. V sklepnem razdelku pa smo podali zaključke in izhodišča za nadaljnje delo.

■ 2 Sistem treh povezanih shranjevalnikov

Sistem treh povezanih shranjevalnikov je prikazan na *sliki 1*. Sestavljajo ga trije identični cilindrično oblikovani vodni shranjevalniki s prečno površino S , ki so medsebojno povezani z dvema ventiloma V_1 in V_2 . Ventil V_3 je izhodni ventil iz zadnjega shranjevalnika. Aktuatorja sistema sta dve vodni črpalčki, ki dovajata vodo v prvi in tretji shranjevalnik s pretokoma Φ_{vh1} in Φ_{vh2} . Vodni nivoji v posameznem shranjevalniku so merjeni z ustreznimi senzorji. Razlika v nivoju vode prvega in drugega shranjevalnika vpliva na vodni pre-

tok Φ_3 skozi ventil V_1 , razlika v nivoju vode med drugim in zadnjim shranjevalnikom pa povzroča vodni tok Φ_4 skozi ventil V_2 . Pretok vode Φ_{izh} skozi ventil V_3 je odvisen samo od nivoja vode h_3 v zadnjem shranjevalniku.

■ 2.1 Koncept modela sistema

Pri načrtovanju modela sistema je smiselno vključiti čim več znanja o obravnavanem sistemu, saj si s tem povečamo možnosti ustrezne interpretacije. Teoretični pristop k modeliranju, ki temelji na ravnotežnih zakonih, opisuje osnovne mehanizme delovanja sistema. Realni sistemi pa vsebujejo tudi druge, praviloma nelinearne pojave, ki lahko bolj ali manj izrazito vplivajo na njegovo obnašanje. Gradnjo modela obravnavanega sistema treh povezanih shranjevalnikov smo pričeli z zapisom ravnotežnih enačb za vsakega od shranjevalnikov, kot kažejo enačbe (1).

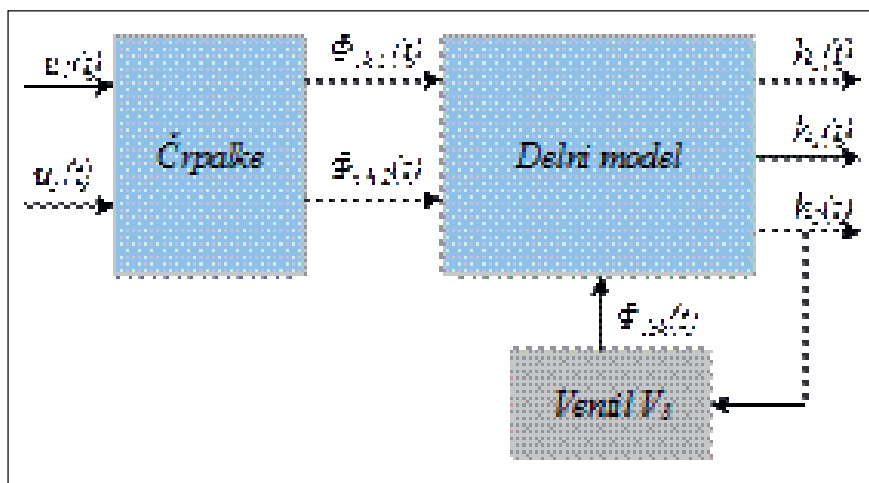
$$\begin{aligned}\Phi_{vh1}(t) - \Phi_3(t) &= S \cdot \dot{h}_1(t) \\ \Phi_3(t) - \Phi_4(t) &= S \cdot \dot{h}_2(t) \\ \Phi_4(t) + \Phi_{vh2}(t) - \Phi_{izh}(t) &= S \cdot \dot{h}_3(t)\end{aligned}\quad (1)$$

Gradnjo modela smo nadaljevali z vključevanjem nelinearnih elementov, kot sta črpalčki in ventili. Dotok vode v sistem Φ_{vh1} in Φ_{vh2} določata vgrajeni vodni črpalčki. Dotoka sta sorazmerna napetostima signalov vzbujanja črpalčk u_1 in u_2 . Povezava

med napetostjo na črpalčki ter pretokom je nelinearna, kar smo potrdili z meritvami. V model smo omejeno povezavo vključili v obliki statičnih karakteristik. Z ustreznimi eksperimenti smo potrdili še povezavi, kot ju opisuje enačba (2).

$$\begin{aligned}\Phi_3(t) &= k_1 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} \\ \Phi_4(t) &= k_2 \sqrt{h_2(t) - h_3(t)}\end{aligned}\quad (2)$$

Pretok vode skozi ventila V_1 in V_2 je korenska funkcija tlačne razlike na obeh ventilih. Eksperimenti pa so nadalje razkrili, da izhodni ventil V_3 ne sledi korenski karakteristiki preostalih dveh ventilov. Čeprav bi lahko karakteristiko ventila izmerili, podobno kot za prva dva ventila, smo se odločili, da bomo poiskali njegovo karakteristiko s pomočjo metode sive škatle [11, 12]. Za ta postopek smo se odločili, ker želimo prikazati uporabnost te metode identifikacije tudi za sisteme, za katere direktnih meritev podsystemov sistema ni mogoče izvesti. Identifikacija po metodi sive škatle je postopek, pri katerem najprej izvedemo meritve sistema, s katerimi zaobjamemo obnašanje sistema. Nato zgradimo matematični model in vanj vključimo čim več podatkov, ki so na voljo, manjkajočo informacijo pa določimo tako, da je obnašanje modela čim bolj podobno obnašanju opazovanega sistema. Primer identifikacije po metodi sive škatle je za sistem treh shranjevalnikov ilustriran na *sliki 2*.



Slika 2. Model sistema treh povezanih shranjevalnikov

Model, pripravljen za identifikacijski postopek po metodi sive škatle za sistem treh shranjevalnikov, je sestavljen iz modela črpalk, ki smo ga pridobili z meritvami, delnega modela sistema, ki ga sestavljajo ravnotežne enačbe in karakteristiki dveh ventilov, ter neznanega modela izhodnega ventila V_3 . Iskanje modela izhodnega ventila predstavlja naš optimizacijski problem. Naloga optimizacije je iskanje modela izhodnega ventila tako, da je napaka med meritvami sistema in odzivom modela na enake vhodne signale celotnega sistema minimalna. Če se meritve sistema in odziv modela dobro ujemajo, smo

merjenega signala in signala, generiranega z modelom (h_1 , h_2 in h_3 so meritve, h_1' , h_2' in h_3' so signali, generirani z modelom).

Meritve, ki smo jih pridobili za namene identifikacije, sestavljajo osem parov vhodno-izhodnih podatkovnih nizov. Šest od teh smo uporabili pri gradnji modela, dva pa smo uporabili za kasnejše vrednotenje. Slika 3 prikazuje primer vzbujevalnih signalov črpalk in odziv sistema na vzbujevalne signale.

Iz odziva sistema so jasno razvidne križne povezave vplivov med nivoji

tekočine v shranjevalnikih. Sprememba nivoja v prvem shranjevalniku vpliva na spremembo nivoja tako v drugem kot tretjem in, obratno, sprememba nivoja v tretjem shranjevalniku vpliva na nivo vode v prvih dveh shranjevalnikih.

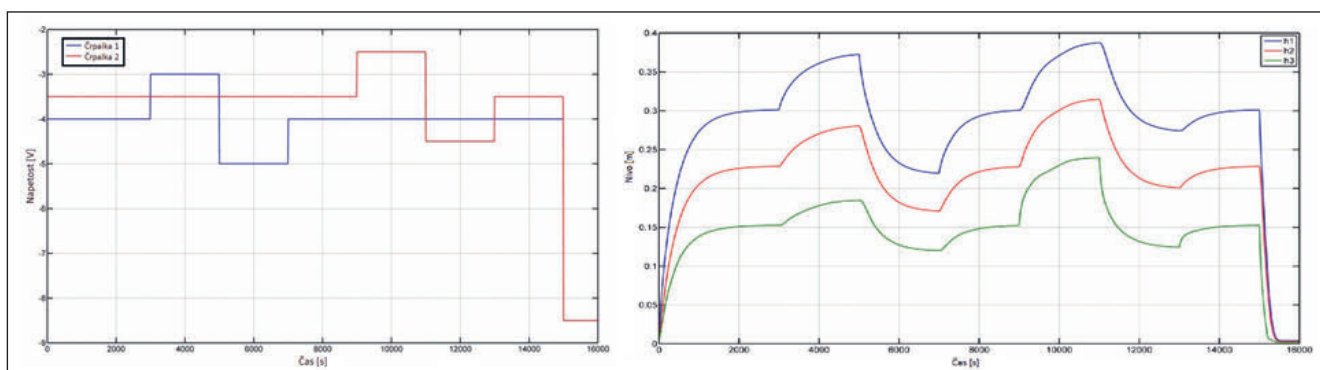
2.2 Načrtovanje regulacijskega sistema

Regulator za sistem treh povezanih shranjevalnikov mora uspešno regulirati nivoja v prvem in tretjem rezervoarju z uporabo črpalk, kot je prikazano na sliki 4.

Naloga algoritma vodenja je generiranje ustreznih signalov vzbujanja obeh črpalk tako, da nivoja h_1 in h_3 čim bolj sledita referenčnim signaloma h_{1ref} in h_{3ref} . Kriterijsko funkcijo, s pomočjo katere smo ocenjevali kvaliteto regulatorja, določa enačba (4).

$$f_{fit} = w_{opt} \int (|e_1(t)| + |e_2(t)|) dt + (1 - w_{opt}) \int (|u_1(t)| + |u_2(t)|) dt \quad (4)$$

Kriterijska funkcija je enaka integralu vsote absolutnih vrednosti signalov pogreška e_1 in e_2 ter ustrezno uteženih reguliranih signalov u_1 in u_2 .

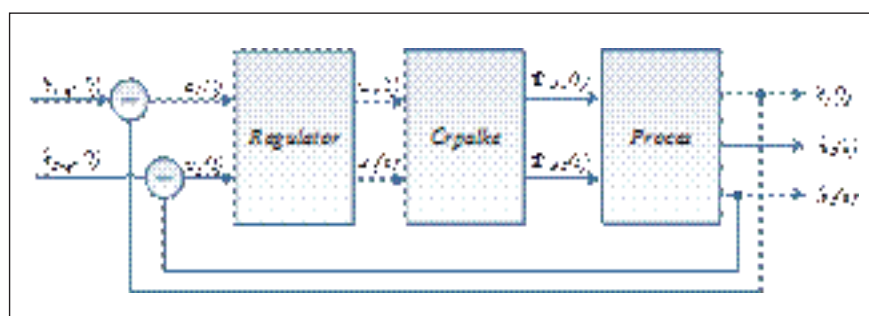


Slika 3. Vzbujevalni signali črpalk (levo) in odzivi sistema (desno)

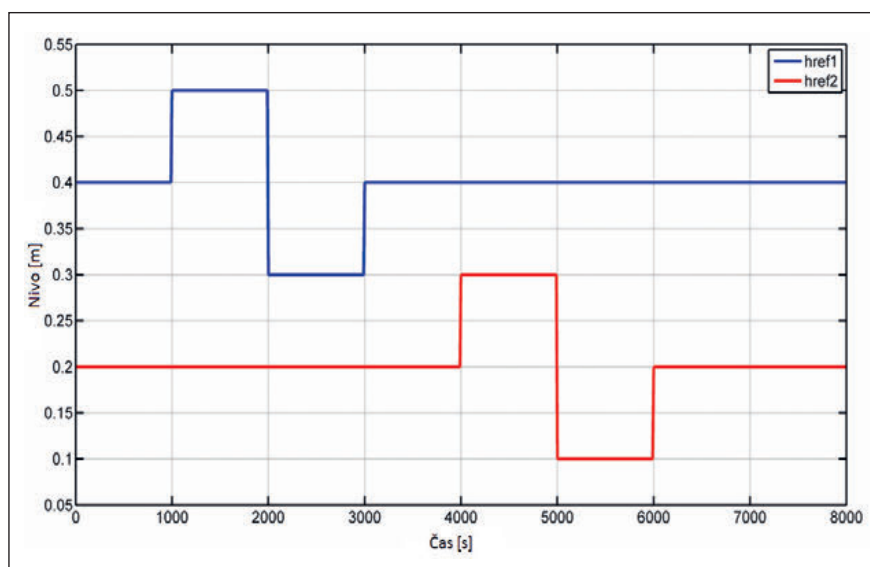
naši primeren model izhodnega ventila. Uporabljeno kriterijsko funkcijo, ki določa razliko med modelom in meritvami, definira enačba (3).

$$J = \int |h_1(t) - h_1'(t)| dt + \int |h_2(t) - h_2'(t)| dt + \int |h_3(t) - h_3'(t)| dt \quad (3)$$

Kriterijska funkcija je enaka seštevu absolutnih razlik nivojev tekočin



Slika 4. Vodenje sistema treh povezanih shranjevalnikov



Slika 5. Referenčna signala pri testiranju uspešnosti načrtanega vodenja

Prvi del kriterijske funkcije vrednoti kvaliteto regulacije, medtem ko drugi del vrednoti aktivnost obeh črpalk, ki jo regulator potrebuje za vodenje. Regulacijski sistem smo preskusili na referenčnih signalih, ki jo prikazuje *slika 5*.

Glede na to, da obravnavamo multivariabilni sistem, mora regulator zagotoviti ustrezno sledenje obema referenčnima signaloma, kar implicitno zahteva tudi hkratno zmanjševanje vpliva križnih interakcij (razstavljanje) zaprtozančnega sistema.

■ 3 Rezultati modeliranja

Rezultate modeliranja smo razdelili v dve skupini glede na uporabljene metode evolucijskih algoritmov. V prvi skupini smo predstavili uspešnost parametričnih metod, v drugi pa izbranih strukturnih metod evolucijskih algoritmov.

■ 3.1 Parametrične metode evolucijskih algoritmov

Parametrične metode lahko uporabimo samo, kadar optimizacijski problem definiramo kot spreminjanje parametrov iskane rešitve. Glede na dosedanje rezultate raziskav smo predpostavili, da bi bilo lastnosti ventila V_3 mogoče predstaviti s polinomsko matematično funkcijo tretjega reda, kot jo opisuje enačba (5).

$$f_{V3}(t) = a_0 + a_1 h_3(t) + a_2 h_3^2(t) + a_3 h_3^3(t) \quad (5)$$

Z uporabo parametričnih optimizacijskih metod torej iščemo parametre a_0 , a_1 , a_2 in a_3 tako, da bo odziv modela čim bolj podoben meritvam sistema. Uporabili smo algoritem GA, implementiran v okolju Matlab oz. Matlabovem orodju Optimization Toolbox [8], algoritem DE, ki ga je v Matlabu implementiral Markus Buehren, [9] in algoritem ES, ki ga je v Matlabu implementiral Gilberto A. Ortiz [10]. Pri vseh testiranih evolucijskih algoritmi smo uporabili enake izhodiščne nastavitve, da bi bili rezultati primerjave čim bolj objektivni. Rešitve s posameznimi metodami smo generirali po 1000 generacijah in z uporabo 30 osebkov na eno generacijo. Razmerje

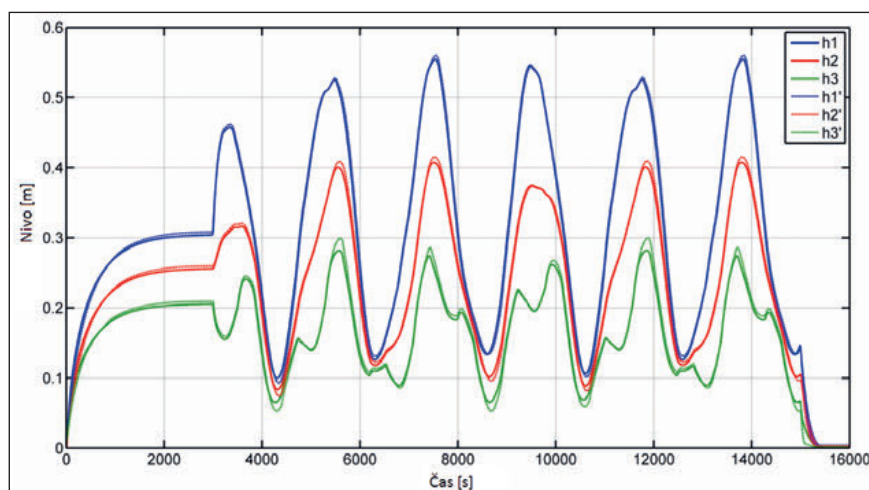
med mutacijami in križanji je bilo pri vseh metodah enako in je bilo na nastavljeno na ena proti ena. Rezultate, dobljene s parametričnimi metodami, smo predstavili dvo-delno. Prvi del predstavlja kvaliteto modela, drugi del pa tudi uspešnost posamezne metode, ki jo merimo z njeno konvergenco. Kvaliteta rešitev je predstavljena v *tabeli 1*.

Tabela 1. Rezultati modeliranja z uporabo parametričnih algoritmov

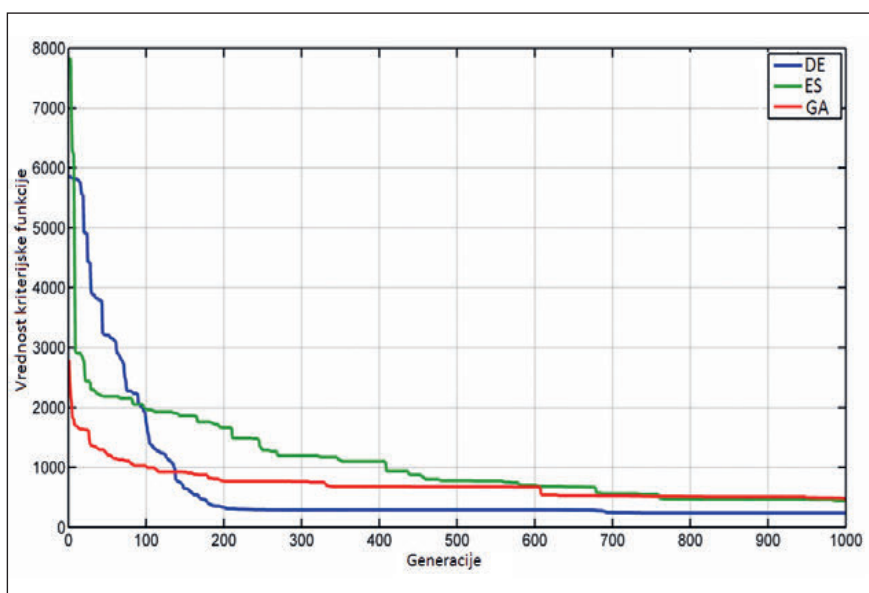
Metoda	Napaka [%]	Vrednotenje [%]
DE	0,77	2,27
ES	0,79	2,58
GA	0,88	3,57

Drugi stolpec predstavlja relativno vrednost kriterijske funkcije pri uporabi identifikacijskih signalov, tretji pa relativno napako na signale v fazi vrednotenja. Rezultati so si precej podobni, kar povečuje verjetnost, da smo našli rešitev, ki predstavlja globalni minimum za izhodni ventil glede na predpostavljeno funkcijo. Za najboljša algoritma sta se izkazala DE in ES. *Slika 6* prikazuje primer najboljše rešitve, ki smo jo generirali z algoritmom DE (h_1 , h_2 in h_3 so meritve, h_1' , h_2' in h_3' so signali, generirani z modelom).

V drugem delu smo primerjali konvergenco posameznih algoritmov, torej hitrost približevanja končni rešitvi.



Slika 6. Primerjava meritev z odzivi modela, ki ga je generiral algoritem DE



Slika 7. Povprečna konvergenca rezultatov pri uporabi izbranih parametričnih algoritmov

Slika 7 prikazuje povprečno vrednost desetih potekov za vsakega od opazovanih algoritmov.

Statistična analiza konvergence posameznih algoritmov kaže na učinkovitost algoritma za reševanje obravnavanega problema. DE ima za naš primer najhitrejšo konvergenco, poleg tega pa v povprečju generira tudi najkvalitetnejšo rešitev.

3.2 Strukturni evolijski algoritmi

Določanje karakteristike izhodnega ventila smo testirali tudi z dvema strukturnima evolijskima algoritma, in sicer z GP na osnovi dreves in z algoritmom AMEBA. Algoritem AMEBA pa smo še vrednotili na procesu modeliranja s postopkom identifikacije po metodi črne škatle, pri kateri je algoritem na podlagi meritev sistema general celoten model, in ne samo model izhodnega ventila. Za ta korak smo se odločili, ker algoritem AMEBA omogoča modeliranje multivariabilnih sistemov, ki jih algoritem GP na osnovi dreves v svoji osnovni obliki ne omogoča. S tem smo prikazali dodatno funkcionalnost algoritma AMEBA.

Pri procesu identifikacije z metodo sive škatle je za parametrične algoritme potrebno predpostaviti strukturo oz. funkcijo, katere parametre nato

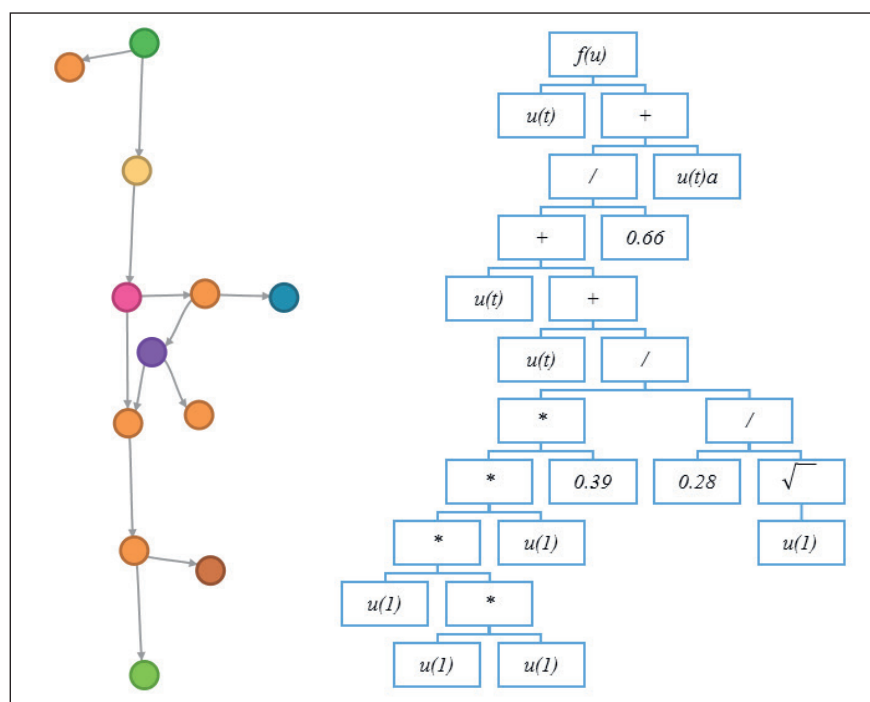
podvržemo optimizaciji. Pri uporabi strukturnih algoritmov se ognemo temu delu, saj algoritmi sami generirajo tako strukturo kot parametre

iskane transformacije oz. funkcije. Nastavitve obeh algoritmov so bile enake s stališča evolucije. To pomeni, da smo v obeh primerih definirali enako število generacij, enako število osebkov v populaciji in razmerja med mutacijami in križanji. Strukturne metode gradijo strukturo z uporabo vozlišč in povezav med njimi. Pri testiranju algoritma GP smo uporabili implementacijo v Matlabu avtorja [11]. Pri uporabi GP-metode smo izbrali naslednja vozlišča: ojačevalno, seštevalno, odštevalno, množilno, delilno, konstantno in potenčno. Enaka vozlišča smo uporabili tudi pri algoritmu AMEBA. Ker pa ta algoritem omogoča gradnjo dinamičnih funkcij, smo dodali tudi naslednja vozlišča: zakašnjev, integral, odvod in visokoter nizkoprepustni filter. Rezultati optimiranja so prikazani v tabeli 2.

Kot vidimo, se je v tem primeru dobro odrezal algoritem AMEBA. Tako

Tabela 2. Rezultati optimiranja s strukturnima metodama

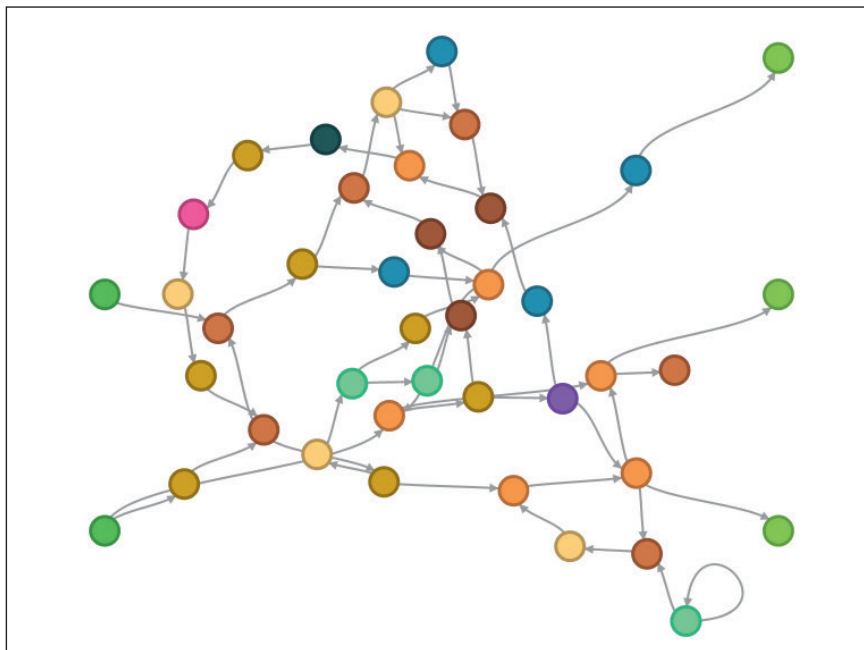
Algoritem	Napaka [%]	Vrednotenje [%]
GP	0,62	2,12
ventil AMEBA	0,51	1,91
celoten model AMEBA	2,67	3,76



Slika 8. Primer rešitve, generirane z algoritmom AMEBA (levo) in z algoritmom GP (desno)

Tabela 3. Legenda vozlišč za algoritem AMEBA

Barva	Vozlišče	Barva	Vozlišče
	vhodno		ojačevalno
	izhodno		potenčno
	nizkoprepustni filter		zakasnilno
	visokoprepustni filter		odvajalno
	množilno		integralno
	delilno		seštevalno

**Slika 9.** Grafični prikaz dinamičnega modela celotnega sistema treh povezanih shranjevalnikov, kot ga je določil algoritem AMEBA

AMEBA kot GP sta poleg tega generirala boljše rešitve kot parametrični algoritmi, kar je bilo mogoče pričakovati, saj nista omejena s strukturo predpostavljene funkcije, ki je lahko tudi omejujoča. Slika 8 prikazuje primer najboljše rešitve, generirane z algoritmoma AMEBA in GP.

Tabela 3 predstavlja legendo za interpretacijo rešitve AMEBA.

Kot lahko vidimo iz primera rešitve, je algoritem AMEBA generiral dinamični model ventila, medtem ko je algoritem GP generiral statični in nelinearni model.

Algoritem AMEBA pa smo testirali še pri identifikaciji po metodi črne škatle, pri čemer smo poskušali generirati model celotnega sistema. Slika 9 prikazuje rezultirajoči generirani model.

Generirani model celotnega sistema je dokaj kompleksen, sestavljen je iz vozlišč različnih tipov in povratnih zank, ki izkazujejo dinamično obnašanje sistema. Kljub večji zahtevnosti problema je algoritem AMEBA uspel generirati rešitev, ki je primerljiva z rešitvijo, ki smo jo dobili s kombiniranim modeliranjem (kombinacija teoretičnega in eksperimentalnega pristopa).

4 Rezultati načrtovanja vodenja

Tudi načrtovanje regulatorja smo razdelili v dva dela. V prvem delu smo prikazali rezultate, generirane s parametričnimi metodami, v drugem pa rezultate, generirane s strukturnimi metodami. Pri optimizaciji regulacijskega sistema smo uporabili model sistema, ki ga je generirala DE-metoda.

4.1 Parametrični evolucijski algoritmi

Ker uporaba parametričnih evolucijskih algoritmov zahteva, da definiramo problem v obliki iskanja parametrov izbrane rešitve, smo se glede na lastnosti sistema odločili za testiranje uspešnosti multivariabilne, proporcionalno-integrirne oblike regulacijskega zakona [13, 14]. Predlagana struktura regulatorja ima torej dva vhoda, dva izhoda in obe križni povezavi. Strukturo regulatorja opisuje enačba (8).

Matriki K_p in K_i vsebujeta 8 parametrov, ki smo jih podvrgli optimizaciji. Rezultati načrtovanja regulatorja s parametričnimi metodami so predstavljeni v tabeli 4. Drugi stolpec predstavlja integral razlike

$$\bar{u}(t) = K_p \bar{e}(t) + K_i \int \bar{e}(t) dt$$

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p11} & K_{p12} \\ K_{p21} & K_{p22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{i11} & K_{i12} \\ K_{i21} & K_{i22} \end{bmatrix} \int \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} dt \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1ref}(t) - h_1(t) \\ h_{3ref}(t) - h_3(t) \end{bmatrix}$$

med referenčnim in izhodnim signalom, normiranim s časom trajanja simulacije. Tretji stolpec v tabeli pa predstavlja integral napetosti črpalk, normiran s časom trajanja simulacije in maksimalno napetostjo črpalk. Vrednost 100 % pomeni, da sta bili napetosti črpalk ves čas trajanja simulacije maksimalni, in obratno za vrednost 0 %, da sta bili črpalke, celoten čas trajanja simulacije izključeni.

Tabela 4. Rezultati načrtovanja regulatorja ob uporabi parametričnih metod

Algoritem	Pogrešek	Regulirni signal
DE	1,04 %	33,9 %
GA	1,04 %	34,5 %
ES	1,48 %	33,3 %

Rezultati so si medsebojno precej podobni, za malenkost ponovno izstopa algoritem DE, saj zahteva pri enaki kvaliteti regulacije manjšo aktivnost regulirnih signalov.

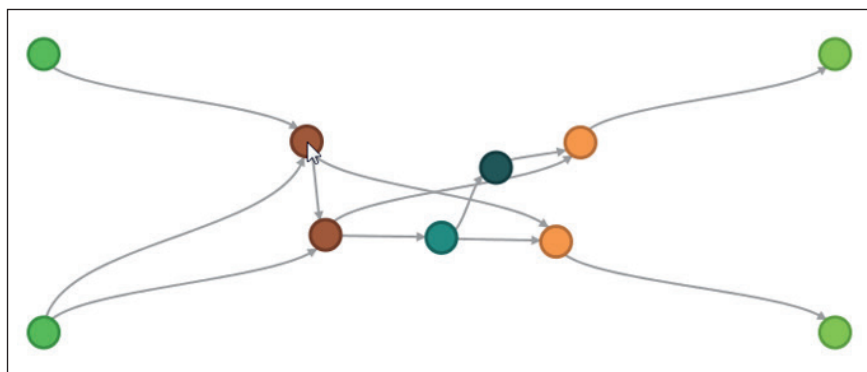
4.2 Rezultati načrtovanja regulatorja s strukturnimi metodami

Strukturni algoritmi ne potrebujejo vnaprej definirane regulacijske strukture, ker jo zgradijo sami med postopkom evolucije. Rezultati, ki smo jih dobili z uporabo strukturnih metod, so prikazani v tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati načrtovanja regulatorja ob uporabi strukturnih metod

Algoritem	Pogrešek	Regulirni signal
AMEBA	2,8 %	34 %
GP	9,3 %	35 %

Rešitev, generirana z algoritmom GP, se je izkazala za najslabšo, kar smo tudi pričakovali, saj ne omogoča generiranja dinamičnih sistemov, ker ne vsebuje dinamičnih vozlišč.



Slika 10. Grafični prikaz regulatorja, generiranega s pomočjo algoritma AMEBA

Rešitev, generirana z metodo AMEBA, je precej boljša, saj izhoda sledita referenčnima signaloma precej bolje od situacije, ko uporabljamo regulator, generiran z metodo GP. Regulator, ki ga je generiral algoritem AMEBA, je grafično prikazan na sliki 10.

Regulator smo zapisali tudi v matematični obliki in ga določa enačba (9).

Algoritem AMEBA je generiral boljši regulacijski sistem kot metoda GP, vendar ni dosegel rezultatov parametričnih algoritmov. Slabši rezultat pripisujemo temu, da algoritem AMEBA ni vključil dinamičnih vozlišč v rešitev. Kje je vzrok, bomo raziskovali v prihodnje, saj je algoritem AMEBA še v zgodnji fazi razvoja.

5 Zaključek

V delu smo prikazali primerjavo uporabnosti algoritmov evolucijskega računanja na treh različnih problemih: na identifikaciji po metodi sive škatle, identifikaciji po metodi črne škatle in pri načrtovanju regulacijskega sistema. Predstavili smo tudi ključne razlike med parametričnimi in strukturnimi optimizacijskimi metodami, ki vplivajo na obliko rešitve in s tem na možnosti, ki jih posamezna skupina metod ponuja pri reševanju problemov. Parametrični algoritmi so generirali zadovoljive rešitve pri obeh skupinah problemov, tako pri modeliranju kot načrtovanju regulatorja. Prav tako so strukturne metode generirale dokaj učinkovite rešitve pri problemih modeliranja, pri načrtovanju pa je še precej prostora za izboljšave. Največja prednost struk-

turnih metod je generiranje rešitev brez vnaprej podane strukture, kar pa seveda lahko predstavlja tudi potencialno težavo. Ta lastnost pride v poštev predvsem pri obravnavi kompleksnih sistemov ali pa sistemov, za katere so informacije pomanjkljive, težave pa skušamo premostiti z eksperimentiranjem. To potrjujejo rezultati uporabe algoritma AMEBA, ki je generiral zadovoljiv model celotnega sistema treh povezanih shranjevalnikov brez upoštevanja predhodnega znanja o sistemu. Ocenjujemo, da ima metoda potencial na področju reševanja problemov dinamičnih sistemov, velja pa poudariti, da na uspešnost optimiranja tudi pri tej metodi ključno vplivajo: definirana kriterijska funkcija (oziroma funkcije), definicija samega optimizacijskega problema, ustreznost izbire testnih signalov in preiskovalni prostor. Ker velik preiskovalni prostor praviloma zelo podaljša čas iskanja ustrezne rešitve, bomo v prihodnje posvetili posebno pozornost možnosti vključevanja teoretičnih znanj v obravnavane metode – z drugimi besedami: pametni optimizaciji.

Reference

- [1] David Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Massachusetts: Addison Wesley, 1989.
- [2] H. G. Beyer, *The Theory of Evolution Strategies (Natural Computing Series)*. Springer, 2010.
- [3] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces," *J. Glob. Optim.*, vol. 11, pp. 341–359, 1997.

- [4] J. Brownlee, "Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes," Swinburne University in Melbourne, Australia, 2011.
- [5] J. R. Koza, D. Andre, F. H. Bennett, and M. A. Keane, *Genetic Programming III: Darwinian Invention & Problem Solving*, 1st ed. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999.
- [6] A. Nohejl, "Grammatical Evolution," Charles University in Prague, 2010.
- [7] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. John Wiley, 1966.
- [8] "Global Optimization Toolbox User's Guide R2014b," vol. 49, no. D. MathWorks, p. 6221, 2000.
- [9] M. Buehren, "Differential Evolution," 2008. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18593-differential-evolution>.
- [10] G. A. O. Garcia, "Evolutionary Strategies," 2012. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35801-evolution-strategies--es->.
- [11] S. Silva, "GPLAB," 2014. [Online]. Available: <http://gplab.sourceforge.net/index.html>.

Model and Control Design for Dynamic Three-Coupled Tank System Using Evolutionary Computation Methods

Abstract: This paper presents the comparison of testing results when using various evolutionary algorithms for solving modelling and control design problems connected with a dynamic three-coupled tank system. Three different problems were addressed. The first problem is the so-called »gray box« identification method, where the characteristic of a certain element within the entire system is under observation. In our case, this was a characteristic of the output valve. The second problem is the »black box« identification method with which the description of the whole system is under investigation. The third problem is the controller design. All problems have been addressed by the following evolutionary computation methods: genetic algorithms, differential evolution, evolution strategies, genetic programming, and a newer approach – the AMEBA algorithm. All mentioned methods have proved to be successful in solving the problem of identification by the gray box method and the control design, while the AMEBA method has been specifically efficient since it has also generated a useful model using the black box identification method, which in this case is the most demanding problem among the discussed.

Keywords: evolution algorithms, AMEBA, modelling, identification, control design, dynamic systems

JAKŠA
MAGNETNI VENTILI

od 1965

- vrhunska kakovost izdelkov in storitev
- zelo kratki dobavni roki
- strokovno svetovanje pri izbiri
- izdelava po posebnih zahtevah
- širok proizvodni program
- celoten program na internetu



www.jaksa.si



Jakša d.o.o., Šlandrova 8, 1231 Ljubljana
T (0)1 53 73 066, F (0)1 53 73 067, E info@jaksa.si