

Evolucijski algoritmi (II)

Primjena

UDK 681.515.8
 IFAC IA 5.5.1

Pregledni članak

U tekstu je prikazan primjer praktične primjene evolucijskih algoritama (kratica EA). Prikazano je evolucijskom strategijom potpomognuto ugadanje parametara PID regulatora primijenjenog na procesu izmjene topline. U nastavku teksta navedena su glavna područja uspješne primjene evolucijskih algoritama. Za one koji žele saznati više o području evolucijskih algoritama na kraju su navedeni korisni izvori informacija, kao i udruge koje okupljaju EA istraživače.

Ključne riječi: evolucijski algoritmi, evolucijske strategije, primjena evolucijskih algoritama, izvori informacija evolucijskih strategija

1. UVOD

Rasprostranjenost računala i opće povećanje njihove računalne snage pogoduje praktičnoj primjeni EA. Popularizacija EA, jednostavnost njihove primjene i uspješna rješenja različitih praktičnih zadataka pomoću EA daljnji su razlog povećanog zanimanja za njihovu industrijsku primjenu. Iako postoji više besplatnih i nekoliko komercijalnih programa koji omogućuju primjenu EA i onima koji ne znaju ili ne žele pisati vlastite programe, u mnogim se praktičnim primjenama pokazala potreba modifikacije barem nekog dijela postojećih programa EA kako bi se algoritam prilagodio zadatku. Za pomoć onima koji žele primijeniti EA u tekstu je naveden primjer iz koga se može vidjeti kako se praktično primjenjuju temeljne zamisli EA. Većina od raspoloživih gotovih programa za primjenu EA može se u određenoj mjeri modificirati, ali je za to potrebno znati temeljna načela praktične primjene i način njihova ostvarenja u algoritmu. Uz analizu u tekstu opisanog primjera, te uz pomoć navedenih izvora različitih informacija iz područja EA, čitalac može prosuditi o svrhovitosti primjene EA na njegov problem. Treba posebno istaći da evolucijski algoritmi nisu čarobni štapić pomoću kojeg treba rješavati sve zadatke, već su oni jedan od postupaka koji ponajprije mogu pomoći pri rješavanju složenih zadataka s mnogo parametara za koje ne postoje zadovoljavajuća rješenja tradicionalnim postupcima.

2. JEDNOSTAVAN PRIMJER PRIMJENE EA

U primjeru je riječ o procesu izmjene topline, čije se ponašanje želi što je moguće više uskladiti s postavljenim kriterijem. To se postiže podešavanjem

parametara PID regulatora, čija je zadaća automatsko vođenje procesa.

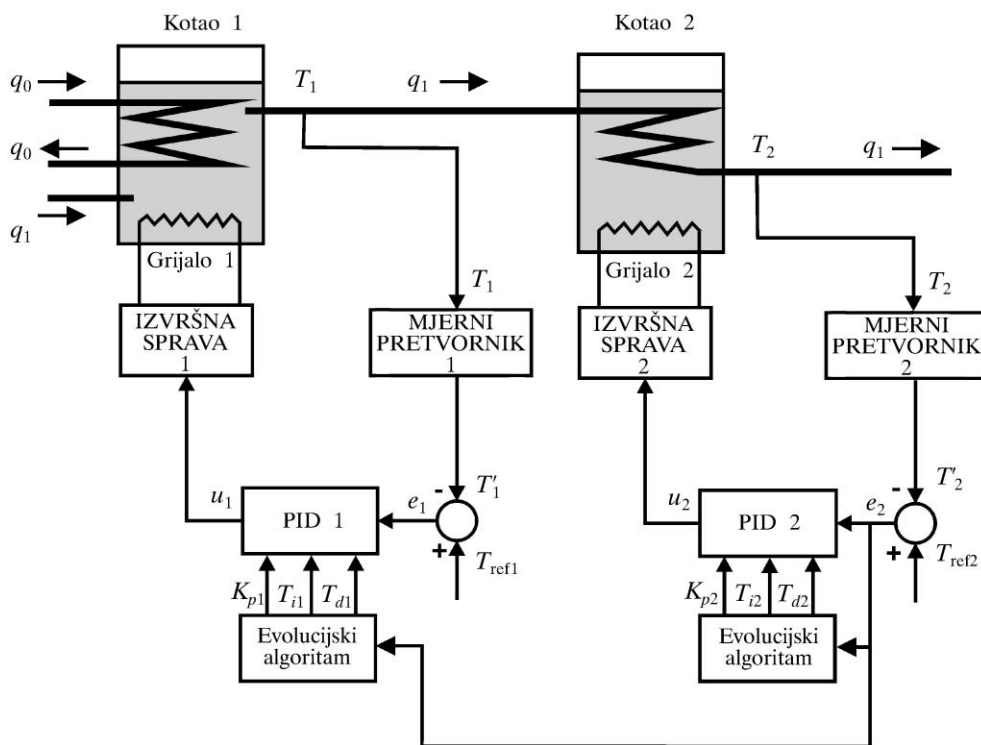
2.1. Fizikalni opis procesa

Proces se u ovom primjeru sastoji od dva kaskadno povezana izmjenjivača topline. Stalne temperature kapljevine na izlazu iz prvog izmjenjivača (T_1) i na izlazu iz zavojnice drugog izmjenjivača (T_2) održavaju se promjenom snage prvog i drugog električnog grijala pomoću dva PID regulatora kako je to prikazano na slici 1. Prvi regulator održava unaprijed zadanu temperaturu kapljevine (T_{ref1}) u prvom izmjenjivaču, dok drugi regulator održava unaprijed zadanu temperaturu kapljevine (T_{ref2}) na izlazu uz zavojnice drugog izmjenjivača. Osnovni zadatak vođenja je održavanje unaprijed zadane temperature kapljevine na izlazu iz zavojnice drugog izmjenjivača (T_2). Poremećajna veličina je nepredvidivi protok kapljevine (q_1). Kapljevina prolazi kroz prvi kotao, spojnu cijev i kroz zavojnicu drugog kotla. Pomoćna zavojnica s protokom (q_0) je stalnog i poznatog protoka, tako da nije poremećajna veličina. Podroban opis procesa može se naći u [1, 2, 3, 4].

Kriterij optimiranja na temelju kojeg se podešavaju parametri PID regulatora jest integral kvadrata (engl. *Integral Squared Error, ISE*) razlike željene i stvarne temperature na izlazu drugog izmjenjivača topline.

$$\int_0^{t_1} [T_{ref2} - T_2(t)]^2 dt = \int_0^{t_1} \varepsilon_2^2(t) dt. \quad (1)$$

To je učinjeno zato jer je za svrhovitost procesa bitna stalna temperatura na izlazu iz procesa (T_2).



Sl. 1. Načelni prikaz procesa

Primjerenost je to bolja što je rezultat integrala kvadrata pogreške manji.

Zbog jednostavnosti nisu u crtežu naznačeni regulatori stalne razine kapljevine u kotlu i ostale značajke važne za pravilnu sliku procesa. Izrađen je matematički model procesa koji se sastoji od 5 diferencijalnih jednačbi i jedne dopunske algebarske jednačbe (prilog A). Na temelju matematičkog modela procesa i PID regulatora napravljena je simulacija procesa na računalu. Za simulaciju procesa na računalu koristio se programski alat Matlab i Simulink. Pomoću EA na tako pripremljenom modelu ugađali su se parametri PID regulatora kako bi se postiglo što povoljnije ponašanje procesa s gledišta zadanog kriterija.

2.2. PID regulator

PID regulator je dobro poznat i opisan u literaturi, a matematički se može prikazati na sljedeći način [5]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

gdje je: K_p proporcionalno pojačanje; T_i integracijsko vrijeme; T_d derivacijsko vrijeme; $e(t) = y_{\text{ref}}(t) - y_{\text{mjer}}(t)$ razlika željene i stvarne vrijednosti (pogreška); $y_{\text{ref}}(t)$ željena ili postavljena vrijednost; $y_{\text{mjer}}(t)$ stvarna (izmjerena) vrijednost.

Ponašanje PID regulatora određeno je parametrima: K_p , T_i i T_d . Postoji opsežna literatura o PID regulatorima i prijedlozi za ugađanje parametra PID regulatora [5]. Kako cjelokupno ponašanje sustava proces-regulator ovisi o značajkama procesa, ne postoji jednoznačni način ugađanja parametra, tako da se parametri uglavnom ugađaju nekim od empirijskih postupaka. U ovom primjeru pokazana je mogućnost ugađanja parametara PID regulatora pomoću evolucijskih strategija.

2.3. Podešavanje parametara PID regulatora pomoću evolucijske strategije

Parametri PID regulatora koji se ugađaju su: K_{p1} , T_{i1} , T_{d1} , K_{p2} , T_{i2} i T_{d2} . Zbog ograničenja koja postoje pri praktičnom ostvarenju regulatora, područje parametara je ograničeno na sljedeće vrijednosti: $1 \leq K_{p1} \leq 100$; $0,001 \leq T_{i1} \leq 100$; $0,001 \leq T_{d1} \leq 1000$; $1 \leq K_{p2} \leq 100$; $0,001 \leq T_{i2} \leq 100$; $0,001 \leq T_{d2} \leq 1000$. Postupak ugađanja parametara PID regulatora pomoću evolucijskih strategija proveden je na sljedeći način:

Evolucijski algoritam primijenjen u ovom primjeru je evolucijska strategija (kratica ES). To je postupak kod koga se populacija sastoji od $\mu + \lambda$ jedinki, gdje je μ broj roditelja, a λ broj potomaka. Početna populacija se sastoji od μ roditelja (praroditelji). Novi potomak nastaje tako da se slučajno izabere neki od roditelja te da mu se doda vektor slučajnih bro-

jeva iz Gaussove razdiobe. Postupak se ponavlja λ puta, te tako nastaje populacija veličine $\mu + \lambda$. To je u ovom primjeru provedeno na sljedeći način (u našem primjeru $\mu = 4$, $\lambda = 2$):

$$K'_{p11} = K_{p1m} + \sigma \cdot N(0,1),$$

$$K'_{p21} = K_{p2m} + \sigma \cdot N(0,1),$$

$$K'_{p12} = K_{p1n} + \sigma \cdot N(0,1),$$

$$K'_{p22} = K_{p2n} + \sigma \cdot N(0,1),$$

$$T'_{i11} = T_{i1m} + \sigma \cdot N(0,1), \quad T'_{d11} = T_{d1m} + \sigma \cdot N(0,1),$$

$$T'_{i21} = T_{i2m} + \sigma \cdot N(0,1), \quad T'_{d21} = T_{d2m} + \sigma \cdot N(0,1),$$

$$T'_{i12} = T_{i1n} + \sigma \cdot N(0,1), \quad T'_{d12} = T_{d1n} + \sigma \cdot N(0,1),$$

$$T'_{i22} = T_{i2n} + \sigma \cdot N(0,1), \quad T'_{d22} = T_{d2n} + \sigma \cdot N(0,1),$$

gdje su: σ veličina koraka; $N(0,1)$ slučajni broj iz Gaussove razdiobe s srednjom vrijednosti 0 i standardnom devijacijom 1; $m, n \in [1, \mu]$ slučajni brojevi iz jednolike razdiobe uz uvjet $m \neq n$.

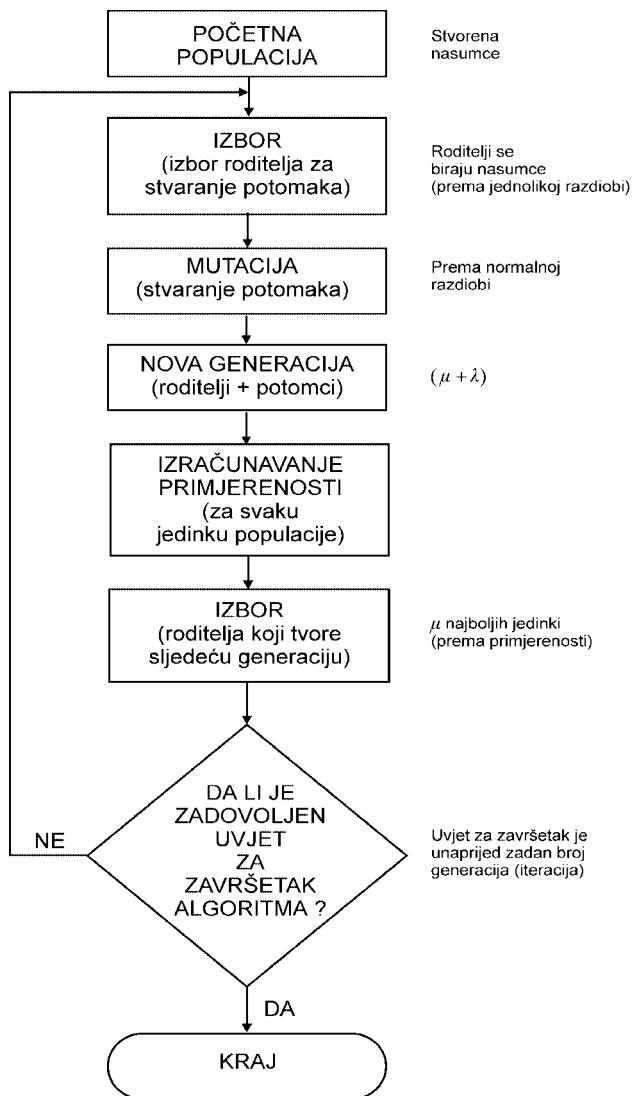
Opisanim postupkom završena je jedna generacija. Nova generacija (nova populacija) nastaje izborom μ najboljih jedinki iz postojeće populacije. Pod najboljim jedinkama se podrazumijevaju one koje imaju najpovoljniju primjerenost. Tako je nastala sljedeća generacija (populacija) s μ jedinki. Sada se ponovno ponavlja korak reprodukcije kako bi nastala populacija veličine $\mu + \lambda$. Time je završen postupak stvaranja nove generacije. Postupak se iterativno ponavlja sve do završetka algoritma.

Opisanu inačicu evolucijske strategije uobičajeno je zapisati kao $(\mu + \lambda)$ -ES. U ovom primjeru izabrana je elitna ES, tj. takva evolucijska strategija kod koje u svaku sljedeću generaciju ulazi μ najboljih jedinki iz prethodne generacije. Postoje i različite druge inačice postupka reprodukcije i izbora. Slika 2 prikazuje dijagram tijeka iteracijskog postupka algoritma.

U ovom su primjeru PID regulatori ugođeni evolucijskom strategijom $(4 + 2)$ -ES i stalnom veličinom koraka $\sigma = 10$ (za sve parametre PID regulatora, tijekom cijelog algoritma i jednaka za sve veličine generacija). Algoritam je proveden po pet puta veličinom generacije $G = 300$, $G = 1000$ i $G = 2000$.

Jedinka evolucijske strategije sastojala se od šest parametara (tri parametara za prvi PID regulator i tri parametara za drugi PID regulator). Svaki od parametara je realni broj. U Matlabu je jedinka prikazana kao vektor sa šest komponenta (vektor P) $P = [K_{p1} \ T_{i1} \ T_{d1} \ K_{p2} \ T_{i2} \ T_{d2}]$.

Populacija je prikazana kao matrica 6×6 (šest jedinki populacije: četiri roditelja ($\mu = 4$) i dva potomka ($\lambda = 2$); svaka je jedinka vektor od šest komponenta):



Sl. 2. Dijagram tijeka opisane evolucijske strategije

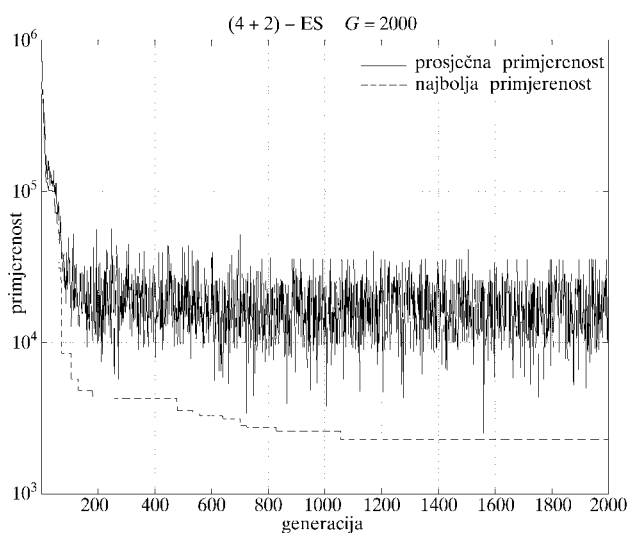
$$PID_j = \begin{bmatrix} K_{p1j} & T_{i1j} & T_{d1j} & K_{p2j} & T_{i2j} & T_{d2j} \\ K_{p12j} & T_{i12j} & T_{d12j} & K_{p22j} & T_{i22j} & T_{d22j} \\ K_{p13j} & T_{i13j} & T_{d13j} & K_{p23j} & T_{i23j} & T_{d23j} \\ K_{p14j} & T_{i14j} & T_{d14j} & K_{p24j} & T_{i24j} & T_{d24j} \\ K'_{p1j} & T'_{i1j} & T'_{d1j} & K'_{p2j} & T'_{i2j} & T'_{d2j} \\ K'_{p12j} & T'_{i12j} & T'_{d12j} & K'_{p22j} & T'_{i22j} & T'_{d22j} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

gdje je indeks j redni broj populacije (generacije); $j = 1, 2, \dots, G$; a G je broj generacija.

Početna populacija evolucijske strategije birala se slučajno, što znači da su roditelji početne matrice PID_0 birani nasumce (četiri roditelja – prva četiri retka matrice). Preostala dva retka matrice su po-

tomci nastali mutacijom četiri roditelja iz prva dva retka. U ovom primjeru je kriterij završetka evolucijske strategije bio unaprijed zadan broj generacija G . Taj je broj dobiven na temelju iskustvenih istraživanja kao broj generacija nakon koga više nema bitnog napretka glede rezultata. Po završetku iteracijskog postupka evolucijske strategije najbolja jedinka s gledišta izabranog kriterija optimiranja (ISE) jest rješenje zadatka.

Na slici 3 je prikazan tipičan tijek evolucijske strategije (iznosi primjerenosti ovisno o generaciji). Treba uočiti da je primjerenost najbolje jedinice svake generacije jednaka ili bolja od primjerenosti najbolje jedinice prethodne generacije, što je posljedica elitnog izbora.



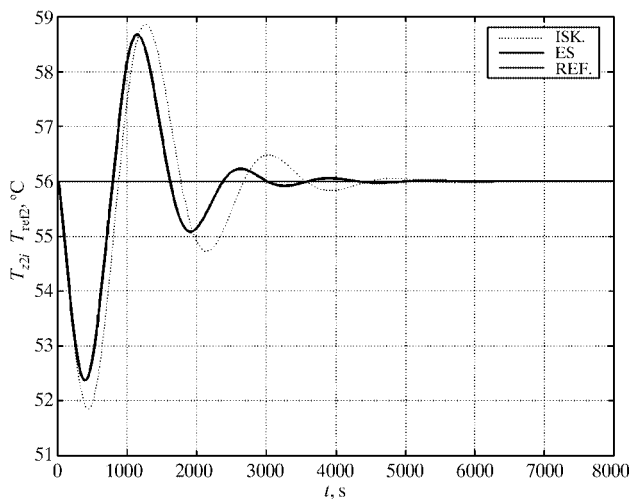
Sl. 3. Prikaz primjerenosti najbolje jedinice i srednje vrijednosti primjerenosti svih jedinica tipične provedbe evolucijske strategije

U gornjem prikazu P_m^k je vektor koji predoduje jednu jedinku populacije ($P = [K_{p1} \ T_{i1} \ T_{d1} \ K_{p2} \ T_{i2} \ T_{d2}]$). Indeks m je redni broj jedinice, a indeks k je redni broj populacije. U početnoj populaciji nasumce su izabrane četiri jedinice: $P_1^0 - P_4^0$. Prethodno opisanim postupkom mutacije stvorena su dva potomka P_5^0 i P_6^0 te je tako popunjena populacija sa šest jedinica. Postupkom izbora od tih šest jedinica izabrano je najboljih četiri s gledišta primjerenosti, te je tako nastala nova populacija (generacija) PID_1 . Postupkom mutacije stvorena su dva potomka P_5^1 i P_6^1 , te je tako popunjena populacija PID_1 . Taj se postupak ponavlja sve do završetka algoritma (u gornjem primjeru do generacije r). Iz zadnje populacije izabere se najbolja jedinka s gledišta primjerenosti P_x^r i ta je jedinka rješenje zadatka.

Nakon provedenog algoritma dobivena je najbolja jedinka: $P_{opt} = [100,000 \ 2,156 \ 476,818 \ 99,061 \ 0,828 \ 513,055]$. Primjerice, za tu je jedinku i za skokovitu promjenu protoka na 1 L/min postignut ISE = 7928, što je približno 31 % bolje od iskustveno ugođenih PID regulatora ($P_{isk} = [100,000 \ 1,500 \ 800,000 \ 100,000 \ 1,250 \ 1000,000]$, ISE = 11455). Za različite pobude i radne uvjete procesa dobiju se i različiti omjeri ISE za odziv s iskustveno i evolucijskim algoritmom ugođenim parametrima PID regulatora, što je detaljnije opisano u navedenoj literaturi [4]. Na slici 4 usporedno je prikazan odziv procesa vođenog s PID regulatorima koji su iskustveno ugođeni (označeno na slici s ISK) i s PID regulatorima koji su ugođeni pomoću evolucijske strategije (označeno na slici s ES). Na slici je s REF označena referentna vrijednost temperature T_2 . Na slici, na ordinati je temperatura T_2 označena kao T_{z2r} , a referentna temperatura s T_{ref2} prema matematičkom modelu u prilogu A.

U matricnom prikazu pojednostavljeni prikaz iteracijske petlje je:

$$\begin{aligned}
 PID_0 = \begin{bmatrix} P_1^0 \\ P_2^0 \\ P_3^0 \\ P_4^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &\rightarrow \text{mutacija} \rightarrow PID'_0 = \begin{bmatrix} P_1^0 \\ P_2^0 \\ P_3^0 \\ P_4^0 \\ P_5^0 \\ P_6^0 \end{bmatrix} \rightarrow \text{izbor} \rightarrow PID_1 = \begin{bmatrix} P_1^1 \\ P_2^1 \\ P_3^1 \\ P_4^1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \text{mutacija} \rightarrow \\
 \rightarrow PID'_1 = \begin{bmatrix} P_1^1 \\ P_2^1 \\ P_3^1 \\ P_4^1 \\ P_5^1 \\ P_6^1 \end{bmatrix} &\rightarrow \text{ponavljati postupak} \rightarrow PID'_r = \begin{bmatrix} P_1^r \\ P_2^r \\ P_3^r \\ P_4^r \\ P_5^r \\ P_6^r \end{bmatrix} \rightarrow \text{izbor najbolje jedinice} \rightarrow P_x^r
 \end{aligned}$$



Sl. 4. Usporedni prikaz odziva procesa vodenog PID regulatorima s iskustveno i evolucijski ugodnim parametrima

Vrijeme izračunavanja primjerenosti po generaciji iznosi 12,868 s, odnosno u ovom slučaju za 6 jedinki (4 roditelja i 2 potomka). Ukupno utrošeno vrijeme za cijeli algoritam po generaciji je 12,89 s. Iz ovoga je uočljivo da se 99,9 % ukupno utrošenog vremena koristi za izračunavanje primjerenosti jedinki. To je važna činjenica jer upućuje da se bitna skraćivanja vremena provedbe postupka mogu postići tek ako se skрати vrijeme izračunavanja funkcije primjerenosti. Gornja vremena se odnose na računalnu opremu sljedećih značajki: simulaciju u programu MATLAB inačica 5.2.0.3084 pod operacijskim sustavom Microsoft Windows XP na osobnom računaru s mikroprocesorom Intel Celeron 850 MHz (FCPGA, $8,5 \times 100$ MHz) i memorijom SDRAM DIMM (100 MHz) 384 MB.

3. PODRUČJA USPJEŠNE PRIMJENE EVOLUCIJSKIH ALGORITAMA

Teško je pronaći područje ljudske djelatnosti u kome nisu primijenjeni evolucijski algoritmi. Mogućnost široke primjene evolucijskih algoritama ukazuje na robusnost, relativnu jednostavnost i opću primjenjivost postupka. Tako se, primjerice, može pronaći da evolucijske algoritme u svom radu primjenjuju znanstvenici i stručnjaci iz područja: računalstva, robotike, praktično svih inženjerskih područja, fizike, biologije, kemije i dr. Osim toga evolucijskim se algoritmima služe i u društvenim znanostima npr.: ekonomiji, filozofiji, znanosti o spoznaji i mnogim drugim. Evolucijski algoritmi se relativno lako mogu udružiti s drugim postupcima tvoreći hibridne sustave, primjerice s umjetnim neuronskim mrežama (engl. *artificial neural network*) ili neizrazitom logi-

kom (engl. *fuzzy logic*). Posebna je vrijednost evolucijskih algoritama mogućnost neposredne praktične primjene na probleme stvarnog svijeta, pa to postaje sve uobičajeniji alat inženjera svih struka. Većina zadaća pronalaženja optimuma može se uspješno riješiti primjenom evolucijskim algoritmima, pa i to ukazuje na široku mogućnost primjene evolucijskih algoritama. U nastavku su navedena neka od mnogih područja primjene evolucijskih algoritama u kojima su postignuti značajniji rezultati.

Bioinformatika (engl. *bioinformatics, biocomputing*) je područje biologije koje se bavi automatskom analizom eksperimentalno prikupljenih podataka [6, 7] s tri glavna područja primjene evolucijskih algoritama: pronalaženje trodimenzionalne građe proteina (engl. *protein folding*), pronalaženje trodimenzionalne građe RNA (engl. *RNA folding*) i poravnanje sekvenci (engl. *sequence alignments*) [8, 9, 10].

Programiranje celularnih automata (engl. *cellular programming*) je područje u kome istraživači nastoje umjetno stvoriti tvorevine koje imaju složeno i svrhovito ponašanje koje se temelji na međusobnom djelovanju vrlo jednostavnih sastavnih komponenti. Uz ostalo rabe se i evolucijski algoritmi kako bi se stvorili umjetni sustavi koji oponašaju vladanje prirodno stvorenih bića (umjetni život, engl. *artificial life*) [11, 12].

Evolutivno sklopovlje (engl. *evolvable hardware*) je područje proučavanja mogućnosti stvaranja elektroničkih sklopova na temelju prirodne evolucije. Primjenom evolucijskih algoritama nastaju sklopovi koji se ponašaju na željeni način, a čija struktura nije rezultat ljudske logičke sinteze sklopa, već posljedica simuliranog evolucijskog procesa [13, 14, 15].

Teorija igara (engl. *game playing*) je područje proučavanja optimalnog ponašanja igrača u nekoj od postojećih ili posebno izmišljenih igara. Kako se takve igre često mogu preslikati na zbivanja u stvarnom svijetu, otkrivanje njihovih zakonitosti može pomoći pri rješavanju složenih problema u tehnici i društvu. Primjenom evolucijskih algoritama moguće je otkriti pravila koja nije moguće pronaći tradicionalnim postupcima [16, 17, 18].

Automatsko raspoređivanje (engl. *job-shop scheduling, JSSP, timetabling*) je područje proučavanja automatskog raspoređivanja vremena u nekom vremenski ovisnom i ograničenom sustavu (npr. školski raspored sati, podjela poslova na ograničenom broju međusobno ovisnih strojeva, raspored vozila pri transportu i dr.). Za složene sustave s mnogo sudionika i mnogo ograničenja raspoređivanje je vrlo težak problem, pa se primjenom evolucijskih algoritama nastoji pronaći optimalno rješenje [19, 20, 21, 22, 23].

Menadžment (engl. *management sciences*) je područje proučavanja mogućnosti primjene evolucijskih algoritama pri optimiranju odluka menadžmenta pri vođenju različitih organizacija. Ponajprije se to odnosi na vođenje sustava koje je uvjetovano ekonomskim ograničenjima ili ciljevima, ali se može primijeniti i na, primjerice, odlučivanje uvjetovano ekološkim zahtjevima [24, 25].

4. IZVORI EA INFORMACIJA

Upoznavanje s područjem EA trebalo bi početi čitanjem tekstova koji obrađuju načela teorije evolucije [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] i pregledom povijesnog razvoja EA [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42]. Ovisno o vrsti EA, daljnje upoznavanje je moguće posredovanjem nekog od tekstova koji opisuju temeljna načela EA [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50]. Vjerojatno najopsežnija i najpotpunija EA bibliografija može se naći u [51].

Razvoj i trenutačno stanje EA može se saznati iz časopisa koji objavljuju radove iz tog područja, primjerice: *Evolutionary Computation*, *Adaptive Behavior* i *Artificial Life*, koje izdaje MIT Press Journals, 55 Hayward Street, Cambridge, MA 02142-1399, USA; *BioSystems*, Journal of Biological and Information Processing Sciences, Elsevier Science Publishers, P.O. Box 1527, 1000 BM Amsterdam, The Netherlands; *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, A Publication of The IEEE Neural Networks Council; *Complex Systems*, Complex Systems Publications, Inc., P.O. Box 6149, Champaign, IL 61821-8149, USA; *Machine Learning*, Kluwer Academic Publishers, P.O. Box 358, Accord Station, Hingham, MA 02018-0358, USA.

Drugi važan izvor informacija trenutačnog stanja u području EA su konferencije. Postoji više od trideset skupova od kojih su važniji: *GECCO: Genetic and Evolutionary Computation Conference*, koju organizira *ISGEC (International Society for Genetic and Evolutionary Computation)*; *EUROGEN (EvoNet)*; *FOGA: Foundations of Genetic Algorithms*; *PPSN: Parallel Problem Solving from Nature* i *CEC: Congress on Evolutionary Computation*. Podatke o navedenim skupovima može se lako pronaći pretraživanjem na Internetu, a potpuni popis publikacija i skupova na adresi <http://surf.de.uu.net/research/softcomp/EC/etc/html/joco.html>.

Objavljaju se i redovita elektronička izdanja na Internetu, npr.:

- *Genetic Algorithm Digest*
(mail-list: ga-list-REQUEST@aic.nrl.navy.mil,
newsgroup: comp.ai.genetic),
a na raspolaganju su mnoge WWW i ftp lokacije koje prikupljaju i objavljuju informacije vezane za EA, npr.:

- *ENCORE* (<http://surf.de.uu.net/encore/>);
 - *The Hitch-Hiker's Guide to Evolutionary Computation*
(PostScript format: <http://surf.de.uu.net/research/softcomp/EC/FAQ/hhgtec.ps.gz>,
ASCII txt format: <http://surf.de.uu.net/research/softcomp/EC/FAQ/part1>,
HTML format: <http://surf.de.uu.net/encore/www/top.htm>);
 - *The Santa Fe Institute* (anonymous FTP archive: [ftp.santafe.edu/pub/](ftp:santafe.edu/pub/));
 - *CMU Artificial Intelligence Repository*
(<ftp://ftp.cs.cmu.edu/user/ai/>, <http://www.cs.cmu.edu/Groups/AI/html/repository.html>);
 - *IlligAL*
(<ftp://gal4.ge.uiuc.edu/pub/papers/IlligALs/>).
- Posebno treba istaći *ENCORE* kao nezaobilazni izvor informacija za nekog tko se prvi put sreće s područjem EA.

Postoji i nekoliko mrežnih novina (engl. *news-groups*) koje objavljuju EA informacije:

- *comp.ai*,
- *comp.ai.genetic*,
- *comp.ai.digest*,
- *comp.ai.fuzzy*,
- *comp.ai.jair.announce*,
- *comp.ai.jair.papers*,
- *comp.ai.neural-nets*,
- *comp.robotics*,
- *comp.theory.cell-automata*,
- *comp.theory.self-org-sys* i dr.

Na Internetu se može naći više od pedeset programa za primjenu EA (podroban popis na adresi <http://surf.de.uu.net/encore/>). Mnogi od tih programa su besplatni i s izvornim kodom.

Stručnjaci koji se bave EA mogu se učlaniti u neku od udruga koje ih okupljaju. Najvažnije su:

- *ISGEC: International Society for Genetic and Evolutionary Computation* (<http://www.isgcec.org>);
- *EvoNet (EvoNet, School of Computing, Napier University, 219 Colinton Rd, Edinburgh, EH6 8RR, UK,
<http://www.dcs.napier.ac.uk/evonet/>,
E-mail: evonet@dcs.napier.ac.uk) i*
- *EPS: Evolutionary Programming Society (Evolutionary Programming Society, 9363 Towne Centre Dr., San Diego, CA 92121, Attn: Bill Porto, Treasurer).*

Postoji više od dvadeset formalno registriranih istraživačkih skupina i studentskih projekata čija je primarna djelatnost istraživanje u području evolucijskih algoritama (popis na adresi <http://surf.de.uu.net/encore/#SEC30>). Popis značajnijih osoba iz pod-

ručja evolucijskih algoritama može se naći na adresi <http://surf.de.uu.net/encore/#SEC05>.

Istraživači koji žele provjeriti djelotvornost svoje inačice algoritma ili je usporediti s drugim postupcima mogu se poslužiti test zadacima koji se mogu naći na više lokacija na Internetu (popis servera s test zadacima je na adresi <http://surf.de.uu.net/encore/#SEC32>).

5. ZAKLJUČAK

Iako je područje istraživanja mogućnosti primjene načela prirodne evolucije za rješavanje različitih problema relativno novo, stjecajem različitih okolnosti u vrlo kratkom roku su rezultati istraživanja primijenjeni u mnogim područjima. Tome je pogodilo više čimbenika. Povećanje računalne snage osobnih računala dostupnih praktično svakom omogućilo je simuliranje evolucije i opsežno istraživanje njezinih različitih značajki. Naglo širenje Interneta omogućilo je brzu i jeftinu objavu rezultata istraživanja i međusobno povezivanje istraživača diljem svijeta. Relativna jednostavnost postupka učinila je evolucijske algoritme privlačnim širokom krugu stručnjaka vrlo različitih djelatnosti. Postignuti rezultati u područjima u kojima su zadaci bili nerješivi primjenom tradicionalnih postupaka, te dobivanje boljih ili podjednakih rezultata u područjima u kojima su zadaci riješeni tradicionalnim postupcima daljnji su razlog popularizacije evolucijskih algoritama. Broj stručnih skupova kojima su glavna tema evolucijski algoritmi, broj publiciranih radova, uvođenje evolucijskih algoritama na mnoge fakultete diljem svijeta kao redovni nastavni predmet i drugo govore o prihvaćenosti evolucijskih algoritama kao vrijedne i korisne metode za rješavanje različitih zadataka. Raznolikost područja u kojima su evolucijski algoritmi primijenjeni govori o općenitoj primjenjivosti postupka. Kako je područje evolucijskih algoritama još uvijek predmet intenzivnog istraživanja, treba očekivati daljnji napredak, nova otkrića i nova područja primjene. Treba, na kraju, skrenuti pozornost da evolucijski algoritmi nisu općenito najbolji postupak za sve vrste zadataka. Primjerice, nepogodni su za zadatke s malo parametara koji su zadovoljavajuće rješivi determinističkim postupcima ili za zadatke koji su rješivi posebno razvijenim postupcima i daju dobre rezultate (takav namjenski postupak je redovito djelotvorniji od rješavanja pomoću evolucijskog algoritma). Uz to treba imati na umu da evolucijski algoritmi ne jamče najbolji mogući rezultat, pa čak ni informaciju o tome koliko je dobiveni rezultat različit od najbolje mogućeg. Zbog toga evolucijske algoritme treba primjenjivati s istim oprezom, pozornošću i dobrim poznavanjem algoritma i zadatka koji se rješava, kao i bilo koji drugi postupak.

LITERATURA

- [1] T. Ferber, **Lingvističko modeliranje i vođenje stupnjevitog procesa izmjene topline**. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Tehnološki fakultet, 1990.
- [2] D. Grundler, **Genetičkim algoritmom optimirano neizravno višerazinsko vođenje procesa**. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 1996.
- [3] G. Galinec, **Primjena živčevne mreže pri vođenju procesa izmjene topline**. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 1999.
- [4] T. Rolich, **Vrednovanje primjene evolucijskih algoritama pri ostvarenju optimalnog vođenja**. Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2001.
- [5] ..., **Process Management and Control**, Chapter5, <http://eng-web.murdoch.edu.au/m288/resources/textbook/title.htm>, (svibanj 2001)
- [6] ..., **European Bioinformatics Institute (EBI)**, <http://www.ebi.ac.uk/>, (siječanj 2002)
- [7] ..., **BioComputing Hypertext Coursebook**, <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/bcd/Curric/welcome.html>, (siječanj 2002)
- [8] H. Ogata, Y. Akiyama, M. Kanehisa, **A Genetic Algorithm Based Molecular Modelling Technique For RNA Stemloop Structures**. *Nucleic Acid Research*, Vol 23, Nr. 3, pp. 419–426, 1995.
- [9] M. Schmitz, G. Steger, **Description of RNA Folding by SA**. *Journal of Molecular Biology*, Nr. 255, pp. 245–266, 1995.
- [10] C. Notredame, D. G. Higgins, **SAGA: Sequence Alignment by Genetic Algorithm**. *Nucleic Acid Research*, Vol 24, Nr. 8, 1515–1524, 1995.
- [11] M. Sipper, **Evolution of Parallel Cellular Machines: The Cellular Programming Approach**. Springer-Verlag, Heidelberg, 1997.
- [12] M. Sipper, **Evolving Uniform and Non-uniform Cellular Automata Networks**. in *Annual Reviews of Computational Physics*, D. Stauffer (ed), 1997.
- [13] M. Sipper et al, **A Phylogenetic, Ontogenetic, and Epigenetic View of Bio-Inspired Hardware Systems**, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 1997.
- [14] E. Sanchez, M. Tomassini (eds), **Towards Evolvable Hardware**, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, 1062, 1996.
- [15] T. Higuchi et al, **Proceedings of First International Conference on Evolvable Systems: From Biology to Hardware (ICES96)**. Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, 1997.
- [16] K. Chellapilla, D. B. Fogel, **Evolution, Neural Networks, Games, and Intelligence**. *Proc. IEEE*, Sept., pp. 1471–1496, 1999.
- [17] Marimon, Ramon, E. McGrattan, T.J. Sargent, **Money as a Medium of Exchange in an Economy with Artificially Intelligent Agents**, *Journal of Economic Dynamics and Control* 14, pp. 329–373, 1990.
- [18] Maynard-Smith, **Evolution and the Theory of Games**. CUP, 1982.
- [19] H.-L. Fang, P. Ross, D. Corne, **A Promising Genetic Algorithm Approach to Job-Shop Scheduling**. *Rescheduling & Open-Shop Scheduling Problems*, ICGA93, pp. 375–382, 1993.
- [20] T. Yamada, R. Nakano, **A Genetic Algorithm Applicable to Large-Scale Job-Shop Problems**. *PPSN92*, pp. 281–290, 1992.

- [21] A. Colorni, M. Dorigo, V. Maniezzo, **Genetic Algorithms: A New Approach to the Time-Table Problem**. NATO ASI Series, Vol. F 82, Combinatorial Optimization, (Ed. M. Akguel and others), Springer-Verlag, pp. 235–239, 1990.
- [22] D. Corne, H.-L. Fang, C. Mellish, **Solving the Modular Exam Scheduling Problem with Genetic Algorithms**. Proc. of 6th Int'l Conf. on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems, ISAI, 1993.
- [23] H.-L. Fang, **Investigating GAs for Scheduling**. MSc Dissertation, University of Edinburgh Dept. of Artificial Intelligence, Edinburgh, UK, 1992.
- [24] V. Nissen, **Evolutionary Algorithms in Management Science: An Overview and List of References**. Papers on Economics and Evolution, edited by the European Study Group for Evolutionary Economics, 1993.
- [25] K. E. Boulding, **What is Evolutionary Economics?**. Journal of Evolutionary Economics, 1, pp. 9–17, 1991.
- [26] D. C. Darwin, **The Origin of Species**. John Murray, Penguin Classics, London, 1985.
- [27] R. A. Fisher, **The Genetic Theory of Natural Selection**. New York: Dover, 1958.
- [28] G. C. Williams, **Adaptation and Natural Selection**. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1966.
- [29] R. Dawkins, **The Extended Phenotype: The Gene as a Selection**. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- [30] R. Dawkins, **The Blind Watchmaker**. New York: W.W. Norton, 1986.
- [31] R. Dawkins, **The Selfish Gene**. 2nd ed, Oxford: Oxford University Press, 1989.
- [32] K. Sigmund, **Games of Life: Explorations in Ecology, Evolution and Behaviour**. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [33] A. S. Fraser, **Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers**. Australian Journal of Biological Sciences, 10, pp. 484–491, 1957.
- [34] G. J. Friedman, **Digital Simulation of an Evolutionary Process**. General Systems Yearbook, 4, pp. 171–184, 1959.
- [35] H. J. Bremermann, **Optimization through Evolution and Recombination**. In M. C. Yovits, et al, (eds) Self-Organizing Systems. Washington, DC: Spartan Books, 1962.
- [36] J. H. Holland, **Outline for a Logical Theory of Adaptive Systems**. JACM, 3, pp. 297–314, 1962.
- [37] L. J. Fogel, A. J. Owens, M. J. Walsh, **Artificial Intelligence through Simulated Evolution**. New York: Wiley, 1966.
- [38] I. Rechenberg, **Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution**. Stuttgart: Fromman-Holzboog, 1973, 2nd edn. 1993.
- [39] J. H. Holland, **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975, 2nd edn. 1992.
- [40] K. A. De Jong, **An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive systems**. Doctoral thesis, Dept. of Computer and Communication Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, 1975.
- [41] H.-P. Schwefel, **Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie**. Basel: Birkhaeuser, 1977.
- [42] D. Fogel, **Evolutionary Computation: The Fossil Record**. IEEE Press, 1998.
- [43] D. E. Goldberg, **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley, 1989.
- [44] L. Davis, (ed) **Handbook of Genetic Algorithms**, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1991.
- [45] J. H. Holland, **Genetic Algorithms**. Scientific American, 267(1), 66–72, 1992.
- [46] Z. Michalewicz, **Genetic algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Second, extended edition, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [47] D. B. Fogel, **An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization**. IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 5:1, pp. 3–14, 1994.
- [48] J. R. Koza, **Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection**. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [49] T. Baeck, U. Hammel, H.-P. Schwefel, **Evolutionary Computation: Comments on the history and current state**. IEEE Trans. Evolutionary Computation, Vol. 1:1, pp. 3–17, 1997.
- [50] W. B. Langdon, **Genetic Programming and Data Structures**. Hingham, MA: Kluwer, 1998.
- [51] J. Alander, **EC Bibliography**. Dobavljivo u Adobe Acrobat postscript formatu pomoću ftp s adrese: garbo.uwasa.fi/pc/research/2500GArefs.ps.gz i takoder adrese refs/2500GArefs.ps.gz (ENCORE).

PRILOG A: MATEMATIČKI MODEL PROCESA

Matematički model temperature kapljevine prvog izmjenjivača topline

$$\frac{dT_{k1i}}{dt} = \frac{q_{k1u}}{V_{k1}} \cdot (T_{k1u} - T_{k1i}) + \frac{U_{g1} \cdot A_{g1}}{V_{k1} \cdot \rho \cdot c_p} \cdot (T_{g1} - T_{k1i}) - \frac{U_{k1} \cdot A_{k1}}{V_{k1} \cdot \rho \cdot c_p} \cdot (T_{k1i} - T_{ok})$$

$$k_1 = \frac{1}{V_{k1}}; \quad k_2 = \frac{U_{g1} \cdot A_{g1}}{V_{k1} \cdot \rho \cdot c_p}; \quad k_3 = \frac{U_{k1} \cdot A_{k1}}{V_{k1} \cdot \rho \cdot c_p}$$

$$\frac{dT_{k1i}}{dt} = k_1 \cdot q_{k1u} \cdot (T_{k1u} - T_{k1i}) + k_2 \cdot (T_{g1} - T_{k1i}) - k_3 \cdot (T_{k1i} - T_{ok})$$

$$T_{k1i} = \int [k_1 \cdot q_{k1u} \cdot (T_{k1u} - T_{k1i}) + k_2 \cdot (T_{g1} - T_{k1i}) - k_3 \cdot (T_{k1i} - T_{ok})] \cdot dt$$

Matematički model izmjene topline električnog grijala prvog izmjenjivača topline

$$\frac{dT_{g1}}{dt} = \frac{P_1}{m_{g1} \cdot c_{pg1}} - \frac{U_{g1} \cdot A_{g1}}{m_{g1} \cdot c_{pg1}} \cdot (T_{g1} - T_{k1i})$$

$$k_4 = \frac{1}{m_{g1} \cdot c_{pg1}}; \quad k_5 = \frac{U_{g1} \cdot A_{g1}}{m_{g1} \cdot c_{pg1}}$$

$$\frac{dT_{g1}}{dt} = k_4 \cdot P_1 - k_5 \cdot (T_{g1} - T_{k1i})$$

$$T_{g1} = \int [k_4 \cdot P_1 - k_5 \cdot (T_{g1} - T_{k1i})] \cdot dt$$

Matematički model temperature kapljevine u drugom izmjenjivaču topline

$$\frac{dT_{k2}}{dt} = \frac{U_{g2} \cdot A_{g2}}{V_{k2} \cdot \rho \cdot c_p} \cdot (T_{g2} - T_{k2}) - \frac{U_{k2} \cdot A_{k2}}{V_{k2} \cdot \rho \cdot c_p} \cdot (T_{k2} - T_{ok}) - \frac{U_{z2} \cdot A_{z2}}{V_{k2} \cdot \rho \cdot c_p} \cdot (T_{k2} - T_{z2s})$$

$$k_6 = \frac{U_{g2} \cdot A_{g2}}{V_{k2} \cdot \rho \cdot c_p}; \quad k_7 = \frac{U_{k2} \cdot A_{k2}}{V_{k2} \cdot \rho \cdot c_p}; \quad k_8 = \frac{U_{z2} \cdot A_{z2}}{V_{k2} \cdot \rho \cdot c_p}$$

$$\frac{dT_{k2}}{dt} = k_6 \cdot (T_{g2} - T_{k2}) - k_7 \cdot (T_{k2} - T_{ok}) - k_8 \cdot (T_{k2} - T_{z2s})$$

$$T_{k2} = \int [k_6 \cdot (T_{g2} - T_{k2}) - k_7 \cdot (T_{k2} - T_{ok}) - k_8 \cdot (T_{k2} - T_{z2s})] \cdot dt$$

Model dopunske jednadžbe koja opisuje raspodjelu temperature unutar zavojnice u drugom izmjenjivaču topline

$$T_{z2s} = T_{k2} - \frac{T_{z2i} - T_{z2u}}{\ln \frac{T_{k2} - T_{z2u}}{T_{k2} - T_{z2i}}}$$

$$T_{z2i} - T_{z2u} + (T_{z2s} - T_{k2}) \cdot \ln \frac{T_{k2} - T_{z2u}}{T_{k2} - T_{z2i}} = 0$$

Matematički model temperature kapljevine u zavojnici

$$\frac{dT_{z2s}}{dt} = \frac{q_{k1i}}{V_{z2}} \cdot (T_{z2u} - T_{z2i}) + \frac{U_{z2} \cdot A_{z2}}{V_{z2} \cdot \rho \cdot c_p} \cdot (T_{k2} - T_{z2s})$$

$$k_9 = \frac{1}{V_{z2}}; \quad k_{10} = \frac{U_{z2} \cdot A_{z2}}{V_{z2} \cdot \rho \cdot c_p}$$

$$\frac{dT_{z2s}}{dt} = k_9 \cdot q_{k1i} \cdot (T_{z2u} - T_{z2i}) + k_{10} \cdot (T_{k2} - T_{z2s})$$

$$T_{z2s} = \int [k_9 \cdot q_{k1i} \cdot (T_{z2u} - T_{z2i}) + k_{10} \cdot (T_{k2} - T_{z2s})] \cdot dt$$

Matematički model izmjene topline električnog grijala drugog izmjenjivača topline

$$\frac{dT_{g2}}{dt} = \frac{P_2}{m_{g2} \cdot c_{pg2}} - \frac{U_{g2} \cdot A_{g2}}{m_{g2} \cdot c_{pg2}} \cdot (T_{g2} - T_{k2})$$

$$k_{11} = \frac{1}{m_{g2} \cdot c_{pg2}}; \quad k_{12} = \frac{U_{g2} \cdot A_{g2}}{m_{g2} \cdot c_{pg2}}$$

$$\frac{dT_{g2}}{dt} = k_{11} \cdot P_2 - k_{12} \cdot (T_{g2} - T_{k2})$$

$$T_{g2} = \int [k_{11} \cdot P_2 - k_{12} \cdot (T_{g2} - T_{k2})] \cdot dt$$

gdje je:

- A_{k1} površina izmjene topline u prvom izmjenjivaču topline, m²
- A_{k2} površina izmjene topline u drugom izmjenjivaču topline, m²
- A_{z2} površina zavojnice u drugom izmjenjivaču topline, m²
- c_p specifični toplinski kapacitet kapljevine, J/kgK
- $m_{g1} \cdot c_{pg1}$ umnožak mase i specifičnog toplinskog kapaciteta prvog električnog grijala
- $m_{g2} \cdot c_{pg2}$ umnožak mase i specifičnog toplinskog kapaciteta drugog električnog grijala
- P_1 snaga prvog električnog grijala, W
- P_2 snaga drugog električnog grijala, W
- q_{k1i} izlazni protok kapljevine, m³/s
- q_{k1u} ulazni protok kapljevine, m³/s
- T_{g1} temperatura prvog električnog grijala, C
- T_{g2} temperatura drugog električnog grijala, C
- T_{k1i} temperatura kapljevine na izlazu iz prvog izmjenjivača topline, C
- T_{k1u} temperatura kapljevine na ulazu u prvi izmjenjivač topline, C
- T_{k2} temperatura u drugom izmjenjivaču topline, C
- T_{ok} temperatura okoline, C
- T_{z2i} temperatura kapljevine na izlazu iz zavojnice, C
- T_{z2s} srednja vrijednost temperature kapljevine u zavojnici, C
- T_{z2u} temperatura kapljevine na ulazu u zavojnicu, C
- $U_{g1} A_{g1}$ umnožak koeficijenta prolaza topline i površine prvog električnog grijala
- $U_{g2} A_{g2}$ umnožak koeficijenta prolaza topline i površine drugog električnog grijala
- U_{k1} ukupni koeficijent prijenosa topline u prvom izmjenjivaču topline, W/m²K
- U_{k2} ukupni koeficijent prijenosa topline u drugom izmjenjivaču topline, W/m²K
- U_{z2} ukupni koeficijent prijenosa topline za zavojnicu, W/m²K
- V_{k1} volumen kapljevine u prvom izmjenjivaču topline, m³
- V_{k2} volumen kapljevine u drugom izmjenjivaču topline, m³
- V_{z2} volumen zavojnice u drugom izmjenjivaču topline, m³
- ρ gustoća kapljevine, kg/m³

Primjedba: Zbog jednostavnosti u slici procesa drukčije su oznake nego u ovdje priloženom matematičkom modelu. Oznake u slici 1 odgovaraju oznakama u matematičkom modelu kako slijedi: $q_1 = q_{k1u}$, $T_1 = T_{k1i}$, $T_2 = T_{z2i}$ (u slici su različite oznake zbog preglednosti).

Evolutionary Algorithms (II) – Application. The paper gives an example of practical application of evolutionary algorithms (EA). There is also an example of heat exchange process controlled by PID controllers. PID controller parameters were adjusted by means of evolutionary strategies. Further, the text mentions main fields of successful application of evolutionary algorithms. For those wanting to learn more about evolutionary algorithms, sources of useful information and EA research organizations are listed at the end.

Key words: evolutionary algorithms, evolution strategies, evolutionary algorithm applications, information sources on evolutionary algorithms

NASLOVI AUTORA:

Doc. dr. sc. Darko Grundler
Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno tehnološki fakultet
Prilaz baruna Filipovića 30, 10000 Zagreb
E-mail: darko.grundler@sk.tel.hr
WWW: <http://public.srce.hr/~dgrund>

Mr. sc. Tomislav Rolich
Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno tehnološki fakultet
Prilaz baruna Filipovića 30, 10000 Zagreb
E-mail: tomislav.rolich@zg.hinet.hr
WWW: http://free-zg.hinet.hr/Tomislav_Rolich

Primljeno: 2001–07–12