

Načrtovanje modela in sistema vodenja z uporabo evolucijskih algoritmov za sistem treh povezanih shranjevalnikov

Marko Corn¹, Gregor Černe¹, Maja Atanasijević-Kunc²

¹INEA d.o.o., Stegne 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 1000 Ljubljana, Tržaška 25, Slovenija
E-pošta: marko.corn@inea.si

Designing model and control system for dynamic system of three connected tanks with the usage of evolutionary algorithms

In this paper evolutionary computation methods are tested on the problem of designing of the model and the control system for the dynamic system. Evolutionary algorithms are known as algorithms that can solve complex problems, their main problem or disadvantage is their convergence time that varies from one method to another. In this paper we have tested several evolutionary computational algorithms and compare their results. Testing was done on the system of three connected water tanks that is dynamic and multivariable. Two test had been done one with the problem of building a mathematical model of the system and other with the building of the control system that enables efficient operating of three tank system. Results shows that these methods all generate good results with their main difference in time of convergence.

1 Uvod

Evolucijski algoritmi so optimizacijski postopki, ki pri svojem delovanju posnemajo naravni proces evolucije. Metode evolucijskega računanja so uporabne za reševanje kompleksnih problemov na področjih kjer druge metode niso uspešne. V tem članku bomo testirali različne metode evolucijskega računanja na problematiki modeliranja in vodenja sistema treh povezanih shranjevalnikov, ki predstavlja multivariabilen, nelinearen dinamičen sistem. Sledi pregled metod evolucijskega računanja in opis sistema treh povezanih shranjevalnikov. V nadaljevanju bomo predstavili potek modeliranja in načrtovanje vodenja sistema treh povezanih shranjevalnikov, kjer bomo primerjali rezultate pridobljene z različnimi metodami evolucijskega računanja.

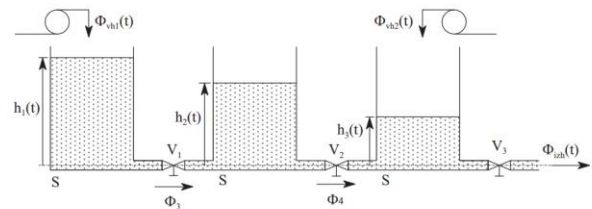
1.1 Metode evolucijskega računanja

Poznamo več metod evolucijskega računanja v splošnem pa jih lahko razdelimo v dve skupini parametrične in strukturne. Parametrične metode se uporabljajo za reševanje problemov, kjer rešitev predstavljajo vrednosti parametrov. Med te metode spadajo genetski algoritmi [1], ki so tudi splošno najbolj razširjeni, evolucijske strategije [2], diferenčna evolucija [3] in druge [4]. Pri strukturnih metodah pa so rešitve predstavljene v obliki matematične funkcije oz.

preslikave. Med te metode štejemo metodo evolucijskega [5], metodo genetskega programiranja [6] in druge [4]. Te metode so tudi trenutno v največjem razvoju, sej dajejo obetavne rezultate imajo pa še ogromen razvojni potencial.

1.2 Sistem treh povezanih shranjevalnikov

Sistem treh povezanih shranjevalnikov je dinamičen nelinearni multivariabilen sistem prikazan na sliki 1.1.



Slika 1.1: Sistem treh povezanih shranjevalnikov

Sistem sestoji iz treh enakih cilindričnih shranjevalnikov s prečnim presekom S , ki so medsebojno povezani z ventiloma V_1 in V_2 . Sistem ima dve vodni črpalčki, ki dovajata vodo v prvi in tretji shranjevalnik s pretokoma $\Phi_{vh1}(t)$ in $\Phi_{vh2}(t)$ in predstavljata aktuatorja sistema. Tretji shranjevalnik ima vgrajen ventil V_3 , preko katerega se voda odvaja iz sistema. Vsakemu od shranjevalnikov merimo nivo vode $h_1(t)$, $h_2(t)$ in $h_3(t)$, ki povzročajo pretoke $\Phi_3(t)$ preko ventila V_1 , $\Phi_4(t)$ preko ventila V_2 in $\Phi_{izh}(t)$ preko ventila V_3 . Prvi test, ki bo pokazal učinkovitost metod evolucijskega računanja je načrtovanje matematičnega modela predstavljenega dinamičnega sistema.

2 Modeliranje sistema treh povezanih shranjevalnikov

Pri načrtovanju modelov različnih dinamičnih sistemov želimo vključiti čim več, predhodno pridobljenega, znanja o sistemu ter s tem znanjem zgraditi, tako dober model kot tudi spoznati samo delovanje sistema. Vsak dinamičen sistem lahko v grobem opišemo že z osnovnimi ravnotežnimi fizikalnimi enačbami, ki določajo bistvene lastnosti sistema in nam nudijo osnovni vpogled v dogajanje znotraj sistema. V kolikor pa želimo nadalje izboljšati kvaliteto modela pa je potrebno v model vključiti tudi razne nelinearne preslikave, ki nastopajo v sistemu ter vplivajo na njegovo obnašanje. Tako smo se odločili, da bomo model treh shranjevalnikov v prvi fazi modelirali z

ravnotežnimi fizikalnimi enačbami v drugi fazi pa bomo dodali še nelinearne člene. Sistem enačb, ki opisuje obnašanje sistema treh povezanih shranjevalnikov je zapisan v enačbi (2.1).

$$\begin{aligned}\Phi_{vh1}(t) - \Phi_3(t) &= S \cdot \dot{h}_1(t) \\ \Phi_3(t) - \Phi_4(t) &= S \cdot \dot{h}_2(t) \\ \Phi_4(t) - \Phi_{vh2}(t) - \Phi_{izh}(t) &= S \cdot \dot{h}_3(t)\end{aligned}\quad (2.1)$$

Razlika med vhodnim pretokom (Φ_{vh1}) in pretokom (Φ_3) vpliva na spremembo nivoja tekočine v prvem shranjevalniku (h_1). Razlika med pretokom (Φ_3) in pretokom (Φ_4) vpliva na spremembo nivoja tekočine v drugem shranjevalniku (h_2) in razlika med pretokom (Φ_4), vhodnim pretokom (Φ_{vh2}) in izhodnim pretokom (Φ_{izh}) vpliva na spremembo nivoja tekočine v tretjem shranjevalniku (h_3). Vsi shranjevalniki imajo prečni prerez površine S .

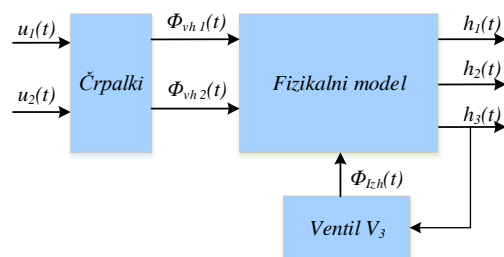
Vhodna pretoka Φ_{vh1} in Φ_{vh2} določata črpalki s svojima napetostnima signaloma u_1 in u_2 . Karakteristiki vodnih črpalk predstavljata nelinearno povezavo med vzbujevalno napetostjo in pretokom, kar v model vključimo direktno. Pretoka Φ_3 in Φ_4 določata enačbi (2.2).

$$\begin{aligned}\Phi_3(t) &= k_1 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} \\ \Phi_4(t) &= k_2 \sqrt{h_2(t) - h_3(t)}\end{aligned}\quad (2.2)$$

Pretok med prvim in drugim shranjevalnikom (Φ_3) določa razlika višin gladine v obeh shranjevalnikih in ventil V_1 , ki izkazuje korensko karakteristiko. Enako je določen tudi pretok med drugim in tretjim shranjevalnikom (Φ_4) z razliko, da nanj vpliva ventil V_2 . Izhodni pretok določa razlika med višino vode v tretjem rezervoarju ter karakteristika izhodnega ventila V_3 .

S fizikalnim ravnotežnimi enačbami smo določili osnovne lastnosti modela. Njim smo nato dodali še dva nelinearna člena karakteristik ventilov V_1 in V_2 in dva nelinearna člena ki predstavljata karakteristike črpalk oz. preslikavo med napetostjo črpalk in pretokom.

Karakteristika ventila V_3 je v našem primeru neznan in je predmet optimizacije oz. identifikacije. Iskanje karakteristike določenih elementov znotraj modela je v praksi pogost pojav saj so te karakteristike lahko izrazito nelinearne, kar lahko bistveno vpliva na obnašanje sistema. Pogosto pa zaradi same narave sistema ni mogoče karakteristik takih členov določiti z meritvijo saj se nahajajo na nedostopnih mestih oz. je izvajanje njihovih meritev zaradi kakršnihkoli razlogov nemogoče. V tem primeru lahko uporabimo postopek posredne identifikacije modela, kar pomeni, da opravimo meritve na sistemu, zgradimo zgoraj predpostavljeni fizikalni model, ki mu dodamo iskano karakteristiko izhodnega ventila. Model treh shranjevalnikov prikazuje slika 2.1.



Slika 2.1: Predpostavljen model sistema treh shranjevalnikov

Model treh shranjevalnikov zahteva iskanje karakteristike ventila V_3 , kar pomeni, da bo optimizacijski postopek minimiziral razliko med odzivom modela in meritvijo odziva sistema na enake signale vzbujanja. Meritve odziva sistema sestavlja osem meritev, kjer smo z različnimi vzbujevalnimi signali (dve stopničasti, tri sinusne in tri naključne) merili pripadajoče odzive sistema. Za identifikacijo smo uporabili šest meritev po dve iz vsake skupine. Preostali dve meritvi eno s sinusnim vzbujanje in drugo z naključnim vzbujanjem smo uporabili za validacijo modela. Iskanje karakteristike bomo izvajali z uporabo evolucijskih algoritmov, kar pomeni, da bomo uporabili dva pristopa: prvega, ki omogoča uporabo parametričnih evolucijskih algoritmov in drugega, ki omogoča uporabo strukturnih oz. funkcijskih evolucijskih algoritmov.

2.1 Parametrični evolucijski algoritmi

Parametrični evolucijski algoritmi zahtevajo strukturo preslikave, kateri nato, z optimizacijo, določamo vrednosti parametrov. Uporabljeno strukturo, ki ponazarja karakteristiko ventila opisuje enačba (2.3)

$$f_{V_3}(t) = a_1 h_3^3(t) + a_2 h_3^2(t) + a_3 h_3(t) + a_4 \quad (2.3)$$

Predpostavili smo polinomsko strukturo tretjega reda, kjer je potrebno določiti štiri parametre a_1 , a_2 , a_3 in a_4 . Uporabili smo tri parametrične metode evolucijskega računanja: genetske algoritme, diferencno evolucijo in evolucijske strategije. Pri vseh treh metodah smo uporabili enake osnovne nastavitve tako, da smo dobili primerljive rezultate. Rezultati temeljijo na dveh ocenah. Prva je ocena parametrov, ki smo jih identificirali s posamezno metodo in predstavljajo karakteristiko ventila. Druga pa je ocena konvergentnosti posameznega evolucijskega algoritma, kjer smo lahko primerjali učinkovitost algoritmov. Ocena parametrov je podana v tabeli 2.1. Napaka predstavlja povprečno relativno odstopanje od posamezne meritve sistema, ki je bila uporabljena pri identifikaciji.

Validacija pa predstavlja povprečno relativno odstopanje od posamezne meritve sistema, ki ni bila

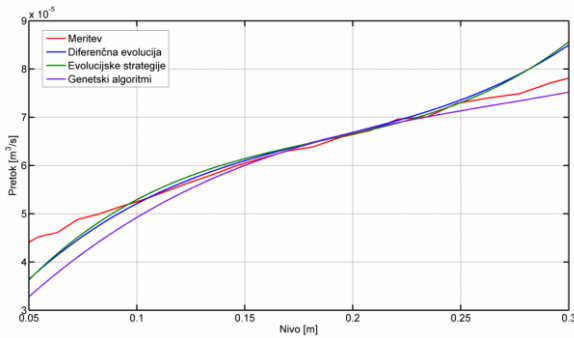
uporabljena pri identifikaciji in predstavlja validacijsko meritev.

Tabela 2.1: Rezultati optimizacije parametričnih evolucijskih algoritmov

	Vrednost parametrov [a_1 a_2 a_3 a_4]	Nap [%]	Val [%]
DE	[5,11 -2,90 0,66 0,01] /1000	0,77	2,27
ES	[6,32 -3,52 0,75 0,007] /1000	0,79	2,58
GA	[2,23 -1,80 0,56 0,009] /1000	0,88	3,57

Vsi rezultati parametričnih evolucijskih algoritmov so medsebojno dokaj podobni, kar pomeni, da obstaja velika verjetnost, da smo izračunali globalni minimum karakteristike ventila pri dani strukturi. Kljub temu, da so vsi algoritmi uspeli izračunati model, ki ima napako validacijskih signalov manjšo od 5% sta najboljša med vsemi algoritma diferencialne evolucije in evolucijskih strategij, ki jima je uspelo izračunati za 1 % boljši rezultat od genetskih algoritmov.

Najboljšo rešitev vsakega algoritma smo tudi primerjali s karakteristiko ventila, ki smo jo v tem primeru lahko pomerili. Primerjava je prikazana na sliki 2.2.

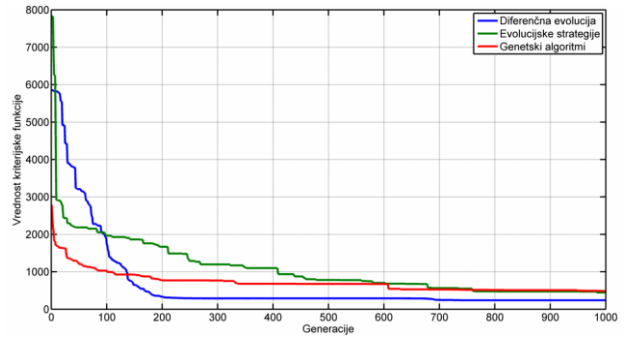


Slika 2.2: Primerjava rešitev posameznih evolucijskih algoritmov z izmerjeno karakteristiko ventila

Primerjava dobljenih rešitev s karakteristiko ventila na prvi pogled kaže velika odstopanja vendar moramo upoštevati, da sistem večino časa deluje v predvidenem delovnem območju. V tem primeru je delovno območje tretjega shranjevalnika med 0.1 in 0.3 metri višine tekočine, kar smo upoštevali tudi pri zajemanju meritev. V tem območju lahko opazimo boljše ujemanje s karakteristiko ventila in rešitve nudijo ustrezen končni model.

Ocenjevanje konvergentnosti algoritmov pa zahteva statistično analizo, kjer smo vsak algoritem večkrat pognali in opazovali spreminjanje kriterijske vrednosti skozi generacije. Izračunali smo povprečen potek vrednosti kriterijskih funkcij, ki je prikazan na sliki 2.3. Statistična analiza konvergentnosti nam pokaže učinkovitost algoritmov, kjer lahko vidimo, da algoritem diferencialne evolucije v povprečju hitreje konvergira in tudi najde boljše rešitve.

Algoritem evolucijskih strategij konvergira najpočasneje vendar je njegov napredek s časom večji kot napredek genetskih algoritmov, tako da na koncu po učinkovitosti prehiti genetske algoritme vendar razlika v povprečni kvaliteti končne rešitve ni očitna.



Slika 2.3: Povprečna konvergenca optimizacije posameznih parametričnih evolucijskih algoritmov

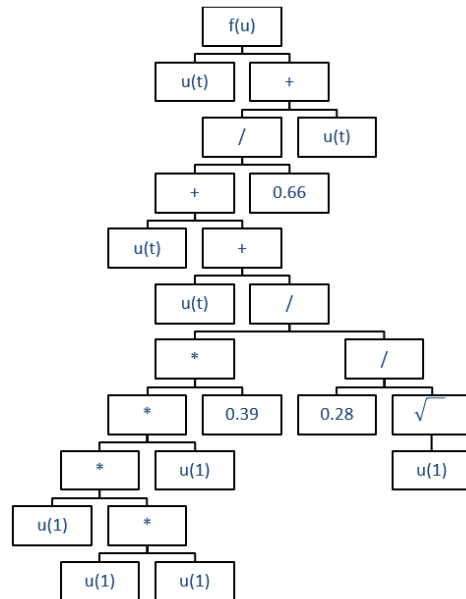
2.2 Strukturni evolucijski algoritem

Strukturni evolucijski algoritmi ne potrebujejo vnaprej definirane strukture, kot parametrični evolucijski algoritmi, saj gradijo strukturo in optimizirajo parametre hkrati. Testi algoritma genetskega programiranje so predstavljeni v tabeli 2.2.

Tabela 2.2: Rezultati strukturnih evolucijskih algoritmov

Algoritem	Napaka [%]	Validacija [%]
GP	0,62	2,12

Algoritem je general preslikavo na sliki 2.4.



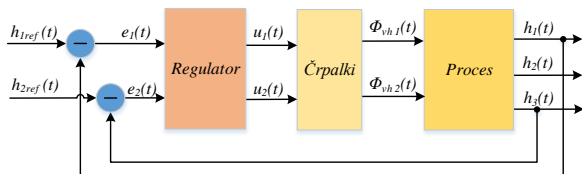
Slika 2.4: Rešitev generirana z genetskim algoritmom

Konvergenca strukturnih evolucijskih algoritmov je v tem primeru bila za faktor 10 počasnejša od parametričnih evolucijskih algoritmov. To je posledica večjega prostora preiskovanja, ki ga morajo preiskovati strukturni algoritmi pri iskanju rešitev.

3 Vodenje sistema treh povezanih shranjevalnikov

Vodenje sistema treh povezanih tankov zahteva načrtanje regulatorja za uravnavanje nivojev vode v prvem in zadnjem shranjevalniku z upravljanjem črpalk.

Vodenje sistema treh shranjevalnikov je prikazano na sliki 3.1.



Slika 3.1: Vodenje sistema treh shranjevalnikov

Vodenje zahteva uravnavanje nivoja tekočine v prvem in tretjem shranjevalniku glede na željeno referenčno vrednost h_{1ref} in h_{2ref} . Regulator se odziva na pogreška e_1 in e_2 z upravljanjem črpalk preko napetostnih signalov u_1 in u_2 .

Kriterijska funkcija uporabljena pri optimizaciji je enaka vsoti absolutnih pogreškov obeh reguliranih signalov in obeh regulirnih signalov. Optimizirali bomo odziv sistema na stopničasto spremembo obeh referenčnih signalov.

3.1 Parametrični evolucijski algoritmi

Za uporabo evolucijskih algoritmov parametričnega tipa, kjer je potrebno podati strukturo regulatorja smo zasnovali regulacijsko strukturo ki zapisana v enačbi (3.1).

$$\bar{u}(t) = \mathbf{K}_p \bar{e}(t) + \mathbf{K}_i \int \bar{e}(t) dt$$

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p11} & K_{p12} \\ K_{p21} & K_{p22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{i11} & K_{i12} \\ K_{i21} & K_{i22} \end{bmatrix} \int \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} dt \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1ref}(t) - h_1(t) \\ h_{2ref}(t) - h_2(t) \end{bmatrix}$$

Zapis je v matrični obliki, kjer matriki \mathbf{K}_p in \mathbf{K}_i združujeta vseh osem parametrov regulatorja, ki so predmet optimizacije. Regulacijska struktura tako omogoča regulacijo črpalk na pogreške v shranjevalnikih na katere črpalke direktno vplivajo, kakor tudi regulacijo črpalk na pogreške na katere črpalke posredno vplivajo, kar pomeni, da regulator upošteva vplive tako direktnih kot križnih povezav procesa.

Rezultati simulacij so prikazani v tabeli

Algoritmi	Parametri $[\mathbf{K}_p \ \mathbf{K}_i]$	Kriterij [%]
GA	$\begin{bmatrix} 76,18 & 18,72 \\ 15,62 & 62,62 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,49 & -0,09 \\ -0,24 & 0,90 \end{bmatrix}$	8,46
ES	$\begin{bmatrix} 76,18 & 18,72 \\ 15,62 & 62,62 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,49 & -0,09 \\ -0,24 & 0,90 \end{bmatrix}$	6,34
DE	$\begin{bmatrix} 76,18 & 18,72 \\ 15,62 & 62,62 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,49 & -0,09 \\ -0,24 & 0,90 \end{bmatrix}$	5,12

3.2 Strukturni evolucijski algoritmi

Algoritem genetskega programiranja ne potrebuje vnaprej predvidne strukture, saj jo generira sam. Vendar je klasičen genetski algoritem omejen saj kot vozlišča uporablja samo statične funkcije. Ta omejitev mu

onemogoča gradnjo integriranih členov kot smo jih predpostavili v regulatorju pri parametričnih algoritmi. Rezultati so predstavljeni v tabeli 3.1.

Tabela 3.1: Rezultat algoritma genetskega programiranja

Algoritem	Kriterij [%]
GP	9,45

4 Zaključek

Evolucijski algoritmi so obetavni optimizacijski postopki, kar se je velikokrat že izkazalo pri reševanju različnih kompleksnejših problemov. Predvsem parametrične metode so že uveljavljeni optimizacijski postopki na področju obravnave dinamičnih sistemov medtem ko strukturni algoritmi na tem področju niso v široki uporabi kot pa kažejo rezultati lahko vidimo, da imajo še veliko potenciala.

5 Zahvala

Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada.

6 Literatura

- [1] M. Melanie, *An Introduction to Genetic Algorithms*, 5th ed. London: A Bradford Book The MIT Press, 1999.
- [2] H. Beyer and H. Schwefel, "Evolution strategies: A comprehensive introduction," *Nat. Comput.*, vol. 1, pp. 3–52, 2002.
- [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] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. John Wiley, 1966.
- [6] W. Banzhaf, "Genetic Programming," *IEEE Intell. Syst.*, vol. 1802, no. Genetic programming, 2000.
- [7] M. Corn, G. Černe, and M. Atanasijević-Kunc, "A Graph-Based Evolutionary Algorithm: Cell Based Genetic Programming," in *Poslano na 5th International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications*, 2012.
- [8] M. Corn and M. Atanasijević-Kunc, "Orodje za genetsko programiranje na osnovi celic (Cell based Genetic Programming Toolbox)," in *Zbornik 20 ERK 2011 Konferenca*, 2011, pp. 295–298.