

Optimizacija parametara PID regulatora pod ograničenjima na performansu i robusnost primjenom algoritma roja čestica

Marko Č. Bošković^{1,2}, Milan R. Rapaić², Zoran D. Jeličić²

¹Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

²Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

marko.boskovic@etf.unssa.rs.ba, marko.boskovic@uns.ac.rs, rapaja@uns.ac.rs, jelicic@uns.ac.rs

Sažetak—U ovom radu je predstavljena jedna nova procedura projektovanja PID regulatora primjenom optimizacije parametara algoritmom roja čestica (*Particle Swarm Optimization*—PSO). Optimalni parametri PID regulatora (k_p^* , k_i^* , k_d^* , T_f^*) dobijeni su PSO minimizacijom integrala apsolutne greške pod ograničenjima na maksimume funkcija osjetljivosti i komplementarne osjetljivosti i maksimuma funkcije osjetljivosti na mjerni šum pri visokim frekvencijama. Posljedično, postiže se efikasno potiskivanje poremećaja uz adekvatno praćenje referentnog signala. Predložena metoda je primjenljiva na široku klasu stabilnih, integralnih i nestabilnih procesa, procesa sa oscilatornom dinamikom, sa i bez vremenskog kašnjenja. Efikasnost predložene optimizacione procedure je verifikovana numeričkim simulacijama na širokoj klasi tipičnih industrijskih procesa.

Ključne riječi— *Algoritam roja čestica, Optimizacija, Performansa, Poremećaj, PID regulator, Robusnost*

I. UVOD

PID regulatori se koriste više od sedamdeset godina kao neizostavni dio upravljačkih struktura u procesnoj industriji. Istraživanje u [1] klasifikuje PID regulator kao drugi najveći doprinos dvadesetog vijeka u oblasti regulacije, odlučivanja i komunikacija, neposredno iza mikroprocesora. PI/PID regulatori se koriste u više od 95% upravljačkih sprega u procesnoj industriji [2], dok je procenat primjene PID regulatora u naftnoj industriji 97% [3]. Velika zastupljenost ovih regulatora je posljedica malog broja podesivih parametara, jednostavne implementacije i preprogramiranja u svakom upravljačkom sistemu [3]. Osim toga, PID regulatori pokazuju adekvatnu robusnu performansu u širokom opsegu radnih uslova u industrijskom okruženju. I pored toga, čak 25% upravljačkih petlji sa PID regulatorima koriste fabričko podešavanje, što je motivisalo da O'Dwyer u [4] predstavi veliki broj analitičkih formula za podešavanje parametara PI/PID regulatora u cilju pristupačnosti pravila kako bi se u što većoj mjeri primjenjivali za regulaciju procesa u industrijskoj praksi.

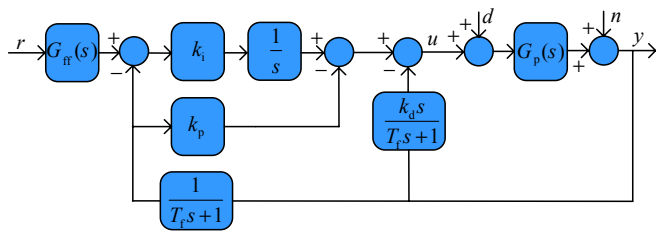
Savremene metode projektovanja regulatora uključuju rješavanje optimizacionih problema pod različitim

ograničenjima [5] s ciljem postizanja kompromisa između robusnosti i performanse [5,6]. U literaturi se mogu naći efikasne optimizacione tehnike za podešavanje parametara PID regulatora sa iskustveno usvojenom vremenskom konstantom filtra [7-22], dok u složenijim metodama vremenska konstanta filtra je integralni dio optimizacione procedure [23-27]. Pored navedenih konvencionalnih, razvijene su metode podešavanja regulatora zasnovane na optimizaciji parametara primjenom evolutivnih algoritama [28], od kojih se najčešće koriste genetski algoritmi [29-31], tehnike roja (kolonija mrava [31-33], roj čestica [27, 34-37], roj pčela [38,39]) itd.

U ovom radu optimalni parametri PID regulatora (k_p^* , k_i^* , k_d^* , T_f^*) dobijeni su optimizacijom algoritmom roja čestica (PSO). Za ciljnu funkciju optimizacionog problema minimizacije je korišten indeks performanse dat integralom apsolutne greške IAE. Zahtjevi u projektovanju regulatora su dati u vidu ograničenja na maksimalnu vrijednost M_s funkcije osjetljivosti, maksimalnu vrijednost M_p komplementarne funkcije osjetljivosti, te maksimalnu vrijednost M_n funkcije osjetljivosti na mjerni šum pri visokim frekvencijama. Modifikacija funkcije cilja je izvršena metodom kaznenih funkcija (*penalty function*) [40], kako bi se optimizacioni problem sveo na optimizaciju bez ograničenja s ciljem primjene PSO algoritma iz [41]. Predložena optimizaciona procedura je primjenljiva na široku klasu stabilnih i nestabilnih procesa, racionalnih i neracionalnih funkcija prenosa, sa i bez vremenskog kašnjenja uključujući i one sa distribuiranim parametrima.

II. PROCEDURA PROJEKTOVANJA PID REGULATORA

Blok dijagram strukture sistema automatskog upravljanja prikazan je na Sl. 1, gdje su korištene sljedeće oznake: $G_p(s)$ - funkcija prenosa procesa, r - referentni signal, y - izlazni signal, u - upravljački signal, d - poremećaj, n - mjerni šum. Proporcionalno, integralno, diferencijalno pojačanje PID regulatora i vremenska konstanta filtra su podesivi parametri regulatora i označeni su sa k_p , k_i , k_d i T_f , respektivno.



Slika 1. Strukturni blok dijagram sistema upravljanja sa izmještenim diferencijalnim i proporcionalnim pojačanjem PID regulatora

Implementacija PID regulatora funkcije prenosa $C(s) = (k_p + k_i/s + k_d s) / (T_f s + 1)$ sa Sl. 1 odgovara upravljačkom signalu $U(s) = -k_p Y_f(s) + \frac{k_i}{s} (G_{ff}(s)R(s) - Y_f(s)) - k_d s Y_f(s)$, gdje

$$Y_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1} Y(s) \text{ signal na izlazu niskofrekventnog filtra.}$$

A. Zahtjevi pri projektovanju PID regulatora

Funkcija povratnog prenosa upravljačke strukture sa Sl. 1 je

$$L(s) = \gamma \frac{k_d s^2 + k_s + k_i}{s(T_f s + 1)} G_p(s) \quad (1)$$

pri čemu za pozitivno statičko pojačanje procesa $G_p(s)$ parametar $\gamma=1$, a za negativno statičko pojačanje $\gamma=-1$. Bez umanjenja opštosti u predloženoj proceduri projektovanja je razmatran slučaj $\gamma=1$.

Osnovni cilj projektovanja regulatora u procesnoj industriji je efikasno potiskivanje poremećaja. U radu je poremećaj modelovan tako da se nalazi na ulazu procesa [42]. Zahtjev za efikasnim potiskivanjem poremećaja može se izraziti u vidu minimizacije integrala apsolutne greške (*Integral of Absolute Error – IAE*)

$$IAE = \int_0^{\infty} |y_d(t)| dt, \quad (2)$$

gdje je $y_d(t) = \Lambda^{-1} \left\{ \frac{G_p(s)}{1+L(s)} \frac{1}{s} \right\}$ odziv sistema na jedinični

poremećaj $d(t)$ pri $r(t)=0$. Sa $\Lambda^{-1}(\bullet)$ označena je inverzna Laplasova transformacija izraza (\bullet) . U slučaju da je $e(t)=r(t)-y(t)$ pozitivno, onda je $IAE = IE = \int_0^{\infty} y_d(t) dt$, dok za dobro prigušene sisteme važi $IAE \approx IE$.

Ograničenja na robusnost su izražena maksimalnom vrijednošću M_s funkcije osjetljivosti sistema u zatvorenoj sprezi, definisanoj sa

$$M_s = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1+L(j\omega)} \right|, \quad (3)$$

dok se osjetljivost na greške modelovanja može izraziti maksimalnom vrijednošću M_p funkcije komplementarne osjetljivosti, definisanoj sa

$$M_p = \max_{\omega} \left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right|. \quad (4)$$

Pored pomenutih zahtjeva na osnovu analize iz [23] može se kao ograničenje koristiti parametar Q

$$Q = \max_{\omega} \left| \frac{k_i G_p(j\omega)}{j\omega (1+L(j\omega))} \right|, \quad (5)$$

uveden sa ciljem minimizacije kriterijuma performanse $\min J_v = 1.01/k_i$, gdje $J_v = \max_{\omega} |G_p(j\omega)/(1+L(j\omega))/j\omega|$ što je objašnjeno u [14].

Povratna spregra neminovno unosi mjerni šum u sistem koji je naročito izražen pri visokim frekvencijama. U radu je ograničenje na mjerni šum okarakterisano najvećim pojačanjem M_n funkcije prenosa od mjernog šuma n do upravljačkog signala u pri visokim frekvencijama, definisanim sa

$$M_n = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left| \frac{C(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| = \frac{k_d}{T_f} \quad (6)$$

B. Algoritam roja čestica

Optimizacija algoritmom roja čestica (*Particle Swarm Optimization - PSO*) je globalna optimizaciona metoda koju su prvobitno 1995. godine predložili Kennedy i Eberhart [43]. Koncept je proistekao proučavanjem ponašanja jedinki ptica s ciljem da se simulira njihovo socijalno ponašanje u jatu. Algoritam se odlikuje relativno malim brojem parametara, mogućnošću jednostavne implementacije, i proračunski nije zahtjevan [44]. PSO algoritam je efikasan u rješavanju složenih višedimenzionalnih problema sa nekonveksnošću, nediferencijabilnošću, višestrukim optimumima, odnosno problema multimodalnog karaktera, što je razlog njegove uspješne primjene u mnogim oblastima nauke i inženjerstva [34-37,44,45]. Svaka čestica populacije (jata) je u svakom trenutku opisana pozicijom $x[k]$ i brzinom $v[k]$. Trenutna pozicija čestice je potencijalno rješenje problema razmatranog n -dimenzionalnog problema. Ako je nova pozicija bolja od prethodne vrši se ažuriranje prethodne pozicije u svakoj iteraciji. Najbolja pozicija svake čestice je data vektorom $p[k]$, dok najbolja pozicija svih jedinki u populaciji memorisana je u vektoru $g[k]$. Brzina svake čestice u k -toj iteraciji je određena vrijednošću brzine u $(k-1)$ -oj iteraciji,

$$v[k] = w[k] \cdot v[k-1] + cp[k] \cdot rp[k] \cdot (p[k] - x[k]) + cg[k] \cdot rg[k] \cdot (g[k] - x[k]), \quad (7)$$

a pozicija je definisana sa

$$x[k+1] = x[k] + v[k], \quad (8)$$

gdje su w -inercijalni, cp -kognitivni i cg -socijalni faktor, dok su rp i rg slučajni brojevi iz uniformne distribucije u opsegu $[0,1]$. Faktorom w se reguliše uticaj prethodnih brzina čestice na trenutnu, pri čemu se položaj čestice za manje vrijednosti w ograničava na užu prostor istraživanja (lokalna pretraga), a za veće vrijednosti w , prostor pretraživanja se širi (globalna

pretraga). Faktor cp simulira uticaj sopstvenog iskustva iz prethodnih pozicija dok cg simulira uticaj iskustva roja/okoline na kretanje pojedine čestica.

C. Problem optimizacije PID regulatora

U ovom radu parametri PID regulatora $q = (k_p^*, k_i^*, k_d^*, T_f^*)$ se dobijaju rješavanjem optimizacionog problema primjenom PSO algoritma. Ciljna funkcija koja se minimizuje predstavljena je integralom apsolutne greške, a ograničenja su tipa nejednakosti iskazana u vidu maksimalnih željenih vrijednosti M_s^z i M_p^z odnosno u kompaktnom obliku

$$\begin{aligned} \min_q \quad & IAE \\ M_s & \leq M_s^z \\ M_p & \leq M_p^z \\ Q & \leq Q^z \end{aligned} \quad (9)$$

Modifikacija funkcije cilja izvršena je metodom kaznenih funkcija čime se rješava problem slobodne optimizacije PSO algoritmom iz [41]

$$\min_q \quad IAE + \lambda_{kf} [(M_s > M_s^z) + (M_p > M_p^z) + (Q > Q^z)]$$

gdje $\lambda_{kf} = 10^4$ izabrani faktor kazne. Izrazi oblika $(X > X^z)$ u (9) predstavljaju kraći zapis za funkciju definisanu sa

$$(X > X^z) = \begin{cases} 1, & X > X^z \\ 0, & X < X^z \end{cases}$$

za $X \in \{M_s, M_p, Q\}$.

U proračunu parametara uzeto je $T_f = k_d / M_n$, što slijedi neposredno iz (6) za adekvatno projektovani PID regulator. Prema tome, polazni zahtjevi projektovanja dati u vidu M_s^z, M_p^z, M_n^z i Q^z , pri čemu M_s^z, M_p^z, M_n^z su zadavane za svaki primjer pojedinačno, dok je $Q^z = 1.01$ isto za sve primjere, po ugledu na [14], s obzirom da ova vrijednost garantuje odziv sa zanemarljivim preskokom odskočnog signala.

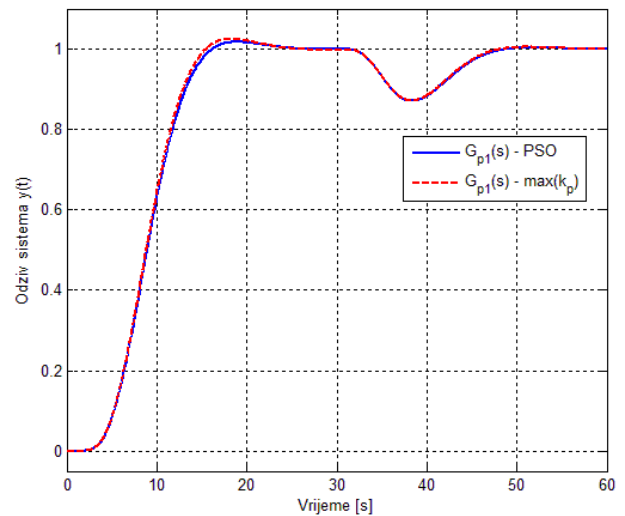
III. SIMULACIONA ANALIZA

Efikasnost predložene metode projektovanja PID regulatora verifikovana numeričkim simulacijama na sljedećim predstavnicima procesa analiziranim u [9,15-19,22] koji uključuju stabilne, integralne, oscilatorne i nestabilne procese.

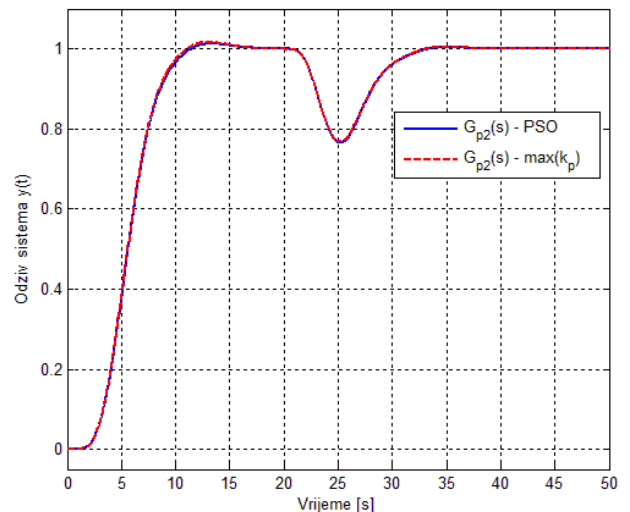
$$\begin{aligned} G_{p1}(s) &= \frac{2e^{-s}}{(10s+1)(5s+1)}, \quad G_{p2}(s) = \frac{1}{(s+1)^4}, \quad G_{p3}(s) = \frac{e^{-5s}}{(s+1)^3}, \\ G_{p4}(s) &= \frac{1-s}{(s+1)^3}, \quad G_{p5}(s) = \frac{1}{(s+1)(0.2s+1)(0.04s+1)(0.008s+1)}, \\ G_{p6}(s) &= \frac{(2s+1)e^{-4s}}{(10s+1)(7s+1)(3s+1)}, \quad G_{p7}(s) = \frac{e^{-s}}{s^2+0.1s+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{p8}(s) &= \frac{e^{-0.5s}}{s}, \quad G_{p9}(s) = \frac{4e^{-2s}}{4s-1}, \\ G_{p10}(s) &= \frac{e^{-0.5s}}{(5s-1)(2s+1)(0.5s+1)} \end{aligned}$$

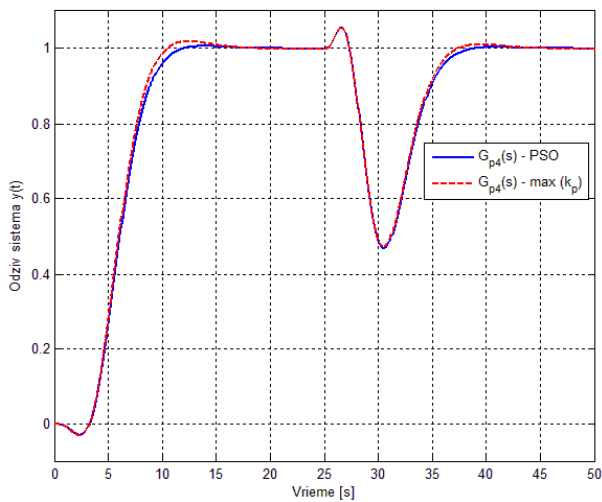
Na Sl. 2-9 prikazani su odzivi sistema sa Sl. 1 na jedinični odskočni referentni signal $R(s)=1/s$ i poremećaj $D(s)=d_0/s$ u trenutku t , gdje d_0 amplituda odskočnog signala. Na slikama 2-8 poređeni su odzivi sistema sa PID regulatorom projektovanim PSO metodom sa PID regulatorom dobijenim $\max(k_p)$ metodom iz [15]. Na slici 9 pored pomenutih PSO i $\max(k_p)$ metoda poređeni su i odzivi sistema sa PID regulatorom optimizovanim genetskim algoritmom (GA) i *fminunc-Trust Region* algoritmom (TR) iz Matlab-a. Za filter reference korišten je filter prvog reda $G_{ff}(s)=1/(T_{ff}s+1)$ gdje $T_{ff} \in [1.5-2.5]/\omega_u$, gdje ω_u kritična učestanost razmatranog procesa.



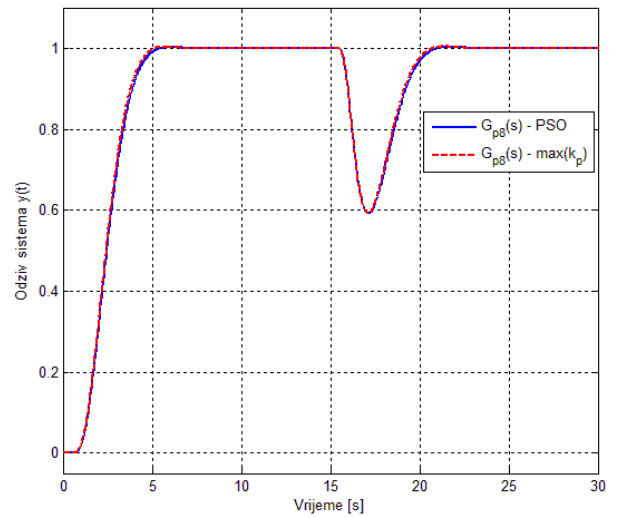
Slika 2. Odziv sistema $y(t)$ sa procesom $G_{p1}(s)$ na jedinični referentni signal i poremećaj $D(s)=1/s$ u trenutku $t=30$ sec



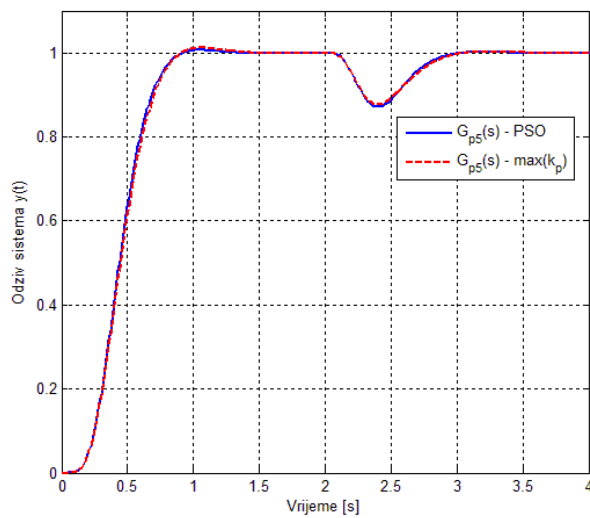
Slika 3. Odziv sistema sa procesom $G_{p2}(s)$ na jedinični referentni signal i peremećaj $D(s)=1/s$ u trenutku $t=20$ sec



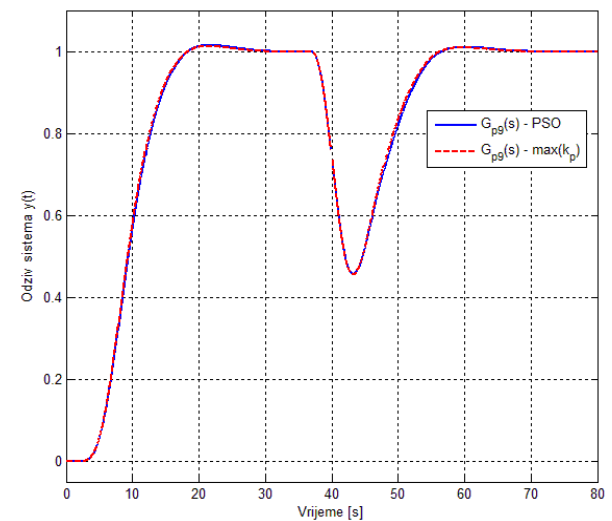
Slika 4. Odziv sistema sa procesom $G_{p4}(s)$ na jedinični referentni signal i poremećaj $D(s)=1/s$ u trenutku $t=25$ sec



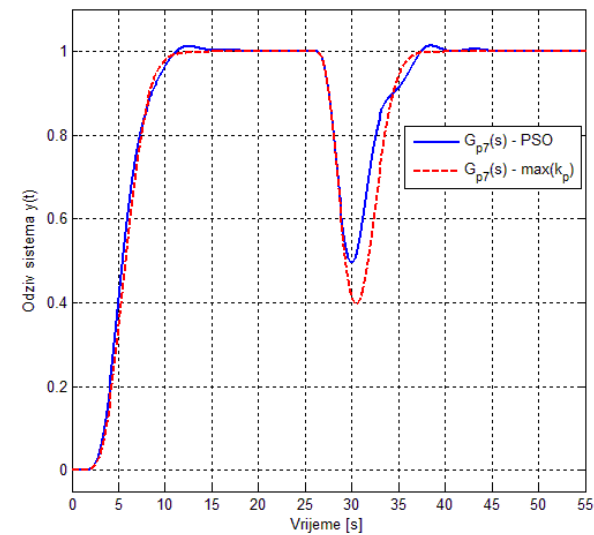
Slika 7. Odziv sistema sa procesom $G_{p8}(s)$ na jedinični referentni signal i poremećaj $D(s)=1/s$ u trenutku $t=15$ sec



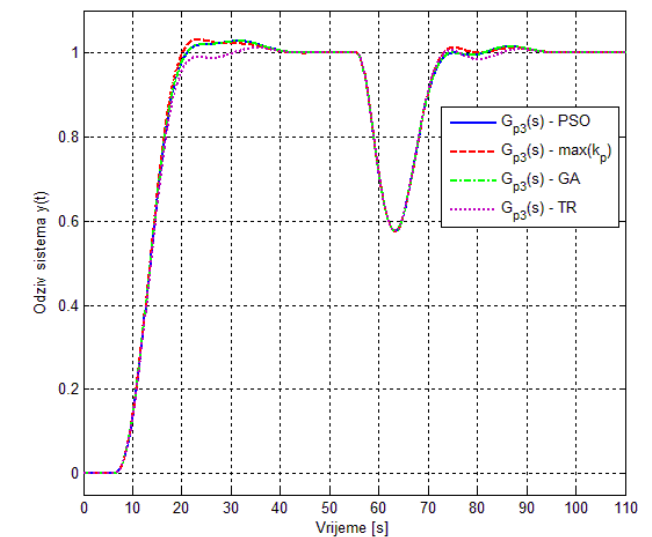
Slika 5. Odziv sistema sa procesom $G_{p5}(s)$ na jedinični referentni signal i poremećaj $D(s)=5/s$ u trenutku $t=2$ sec



Slika 8. Odziv sistema sa procesom $G_{p9}(s)$ na jedinični referentni signal i poremećaj $D(s)=0.8/s$ u trenutku $t=35$ sec



Slika 6. Odziv sistema sa procesom $G_{p7}(s)$ na jedinični referentni signal i poremećaj $D(s)=0.5/s$ u trenutku $t=25$ sec



Slika 9. Odziv sistema sa procesom $G_{p3}(s)$ na jedinični referentni signal i poremećaj $D(s)=0.5/s$ u trenutku $t=50$ sec

TABELA I.

COMPARISON OF THE PRESENTED PID CONTROLLER OBTAINED BY PSO OPTIMIZATION, WITH THOSE WITH MAX(k_p) METHOD FROM [15]

| Proces | ω_i | k_p | k_i | k_d | T_f | IAE | M_n | M_s | M_p |
|----------------------------------|------------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|-------|-------|
| $G_{p1}(s)$ – PSO | 0.5389 | 5.6586 | 0.9627 | 11.9741 | 0.1859 | 1.1622 | 64.42 | 2.00 | 1.70 |
| $G_{p1}(s)$ – max(k_p) [15] | | 5.6539 | 0.9894 | 12.0512 | 0.1871 | 1.1633 | 64.41 | 2.00 | 1.71 |
| $G_{p2}(s)$ – PSO | 1.000 | 2.3052 | 0.8585 | 2.5697 | 0.0982 | 1.2489 | 26.16 | 2.00 | 1.34 |
| $G_{p2}(s)$ – max(k_p) [15] | | 2.3057 | 0.8682 | 2.6478 | 0.1012 | 1.2499 | 26.16 | 2.00 | 1.34 |
| $G_{p3}(s)$ – PSO | 0.4000 | 0.6260 | 0.1341 | 1.3397 | 0.8373 | 8.0894 | 1.60 | 1.97 | 1.01 |
| $G_{p3}(s)$ – max(k_p) [15] | | 0.6302 | 0.1363 | 1.2675 | 0.8178 | 8.1519 | 1.55 | 2.00 | 1.02 |
| $G_{p3}(s)$ – GA | | 0.6264 | 0.1342 | 1.3421 | 0.8388 | 8.0992 | 1.60 | 2.00 | 1.01 |
| $G_{p3}(s)$ – TR | | 0.6519 | 0.1314 | 1.2015 | 0.7509 | 8.1145 | 1.60 | 2.00 | 1.01 |
| $G_{p4}(s)$ – PSO | 1.0000 | 1.0141 | 0.4088 | 0.8056 | 0.1007 | 2.7533 | 8.00 | 2.00 | 1.15 |
| $G_{p4}(s)$ – max(k_p) [15] | | 1.0145 | 0.4268 | 0.8446 | 0.1021 | 2.7964 | 8.27 | 2.00 | 1.15 |
| $G_{p5}(s)$ – PSO | 11.1803 | 25.1076 | 91.9705 | 2.7106 | 0.0108 | 0.0124 | 250.00 | 1.99 | 1.67 |
| $G_{p5}(s)$ – max(k_p) [15] | | 25.6860 | 92.2890 | 2.9116 | 0.0105 | 0.0121 | 265.60 | 2.00 | 1.68 |
| $G_{p6}(s)$ – PSO | 0.2144 | 2.5879 | 0.1894 | 11.9613 | 0.4430 | 5.7030 | 27.00 | 2.00 | 1.35 |
| $G_{p6}(s)$ – max(k_p) [15] | | 2.5929 | 0.1969 | 12.1891 | 0.4367 | 5.6914 | 27.91 | 2.00 | 1.35 |
| $G_{p7}(s)$ – PSO | 1.0304 | -0.1490 | 0.2258 | 0.4605 | 0.1439 | 5.1116 | 3.20 | 1.75 | 1.09 |
| $G_{p7}(s)$ – max(k_p) [15] | | -0.2986 | 0.1795 | 0.2536 | 0.0798 | 6.5257 | 3.18 | 2.00 | 1.01 |
| $G_{p8}(s)$ – PSO | 3.1416 | 1.6237 | 1.0188 | 0.3393 | 0.0283 | 1.0787 | 12.00 | 2.00 | 1.60 |
| $G_{p8}(s)$ – max(k_p) [15] | | 1.6232 | 1.0499 | 0.3391 | 0.0284 | 1.0696 | 11.91 | 2.00 | 1.62 |
| $G_{p9}(s)$ – PSO | 0.5828 | 0.5319 | 0.0437 | 0.5281 | 0.2200 | 25.3966 | 2.40 | 3.97 | 3.20 |
| $G_{p9}(s)$ – max(k_p) [15] | | 0.5340 | 0.0446 | 0.5179 | 0.2149 | 24.75 | 2.41 | 4.00 | 3.27 |
| $G_{p10}(s)$ – PSO | 0.4287 | 3.4891 | 0.3836 | 7.0282 | 0.3514 | 2.8860 | 20.00 | 3.00 | 2.61 |
| $G_{p10}(s)$ – max(k_p) [15] | | 3.5178 | 0.3921 | 7.0284 | 0.3417 | 2.8203 | 20.57 | 3.00 | 2.61 |

Slike 2-9 potvrđuju efikasnost primjene predložene PSO procedure projektovanja PID regulatora. Za sve procese dobijeni su željene maksimalne vrijednosti funkcije osjetljivosti M_s , osim za oscilatorni proces G_{p7} gdje je za ograničenje $M_s^z = 2$ dobijen još robusniji sistem sa $M_s=1.7$. Pored toga, odzivi na slici 9 ukazuju da su GA i TR metode takođe ravnopravne sa PSO u određivanju optimalnih parametara tj. postizanja adekvatnih indeksa performanse i robusnosti. U Tabeli 1 poređeni su indeksi performanse i robusnosti sistema za slučaj PSO optimizovanog PID regulatora sa PID regulatorom projektovanim mak(k_p) metodom iz [15], te za proces $G_{p3}(s)$ Uočava se da se primjenom oba metoda podjednako uspješno potiskuje poremećaj što se vidi na osnovu približno istih vrijednosti IAE. Treba napomenuti da je za konvergenciju PSO algoritma ka optimalnim parametrima PID regulatora važno imati uvid u adekvatan opseg nepoznatih parametara PID regulatora na osnovu čega se inicijalizuje roj čestica.

IV. ZAKLJUČAK

Predložena metoda projektovanja PID regulatora primjenom algoritma roja čestica pokazala se efikasnom u rješavanju problema optimizacije PID regulatora pod ograničenjima na performansu i robusnost. Time se dobijaju optimalni parametri PID regulatora kojima se postiže minimum IAE čime se efikasno potiskuje poremećaj, kao i adekvatni indeksi robusnosti sistema. Efikasnost predložene metode je verifikovana numeričkim simulacijama na širokoj klasi industrijskih stabilnih, integralnih te nestabilnih procesa sa i bez vremenskog kašnjenja.

ZAHVALNICA

Autori Milan R. Rapačić i Zoran D. Jeličić se zahvaljuju za podršku Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za projekte TR32018 (M.R.R i Z.D.J) i TR33013 (M.R.R). Autori se posebno zahvaljuju prof. dr Tomislavu B. Šekari na podršci, savjetima i stručnim sugestijama pri izradi ovog rada.

LITERATURA

- [1] R.R. Rhinehart, „The century’s greatest contributions to control practice”, *ISA Transactions*, vol. 39, pp. 3-13, 2000.
- [2] K.J. Åström, T. Hägglund, „PID Controllers: Theory, Design and Tuning”, Instrument Society of America, N. Carolina, USA, 1995.
- [3] Desborough, R. Miller, „Increasing customer value of industrial control performance monitoring—Honeywell’s experience”, in: *Sixth International Conference Chemical Process Control, AIChE Symposium Series Number 326*, vol. 98, 2002.
- [4] A. O’Dwyer, „Handbook of PI and PID controller tuning rules”, Imperial College Press 3rd edition, 2009.
- [5] T.B. Šekara, „Modern methods of design, analysis, optimization and implementation of conventional control algorithms for processes with finite and infinite degrees of freedom”, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [6] O. Garpinger, T. Hägglund, K. J. Åström, „Criteria and trade-offs in PID design”, *IFAC Proc. Volumes*, vol. 45, issue 3, pp. 47-52, 2012.
- [7] A.J. Isaksson and S.F. Graebe, „Derivative filter is an integral part of PID design”, *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, vol. 149, pp. 41-45, January 2002.
- [8] T. Hägglund, „A unified discussion on signal filtering in PID control”, *Control Engineering Practice*, vol. 21, pp. 994-1006, Aug. 2013
- [9] H. Panagopoulos, K.J. Åström, T. Hägglund, „Design of PID controllers based on constrained optimization”, *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, ol. 149, pp. 32-40 January 2002.
- [10] A. Wallen, K. J. Åström, and T. Hägglund, „Loop-shaping design of PID controllers with constant T_i/T_d ratio”, *Asian Journal of Control*, vol. 4, pp. 403-409, December 2002.
- [11] C. Hwang and C-Y. Hsiao, „Solution of non-convex optimization arising in PI/PID control design”, *Automatica*, vol. 38, pp. 1895-1904, November 2002.

- [12] K.J. Åström, T. Hägglund, „Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control”, *J Process Control*, vol. 14, pp. 635-650, 2004.
- [13] . Shamsuzzoha, S. Skogestad, „The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning”, *Journal of Process Control*, vol. 20, Issue 10, pp. 1220-1234, December 2010.
- [14] T.B. Šekara and M.R. Mataušek, „Revisiting the Ziegler-Nichols process dynamics characterization”, *J Process Control*, vol. 20, pp. 360-363, 2010.
- [15] M.R. Mataušek, T.B. Šekara, „PID controller frequency-domain tuning for stable, integrating and unstable processes, including deadtime”, *J Process Control*, vol. 21, pp. 17-27, 2011.
- [16] T.B. Šekara, M.R. Mataušek, „Classification of dynamic processes and PID controller tuning in a parameter plane”, *J Process Control*, vol. 21, issue 4, pp. 620-626, 2011.
- [17] V.R. Segovia, T. Hägglund, K.J. Åström, „Measurement noise filtering for PID controllers”, *J Process Control*, Vol. 24, pp. 299-313, 2014.
- [18] O. Garpinger, T. Hägglund, „Software-based optimal PID design with robustness and noise sensitivity constraints”, *J Process Control*, vol 33, pp. 90-101, 2015.
- [19] T.B. Šekara, M.R. Rapačić, „A revision of root locus method with applications”, *J Process Control*, vol. 34, pp. 26-34, 2015.
- [20] K. Soltesz, C. Grimholt, S. Skogestad, „Simultaneous design of proportional-integral-derivative controller and measurement filter by optimisation”, *IET Control Theory & Applications*, pp. 1-16, Nov. 2016.
- [21] B.B. Jakovljević, T.B. Šekara, M.R. Rapačić, Z.D. Jeličić, „On the distributed order PID controller”, *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 79, pp. 94-101, September 2017.
- [22] P.D. Mandić, T.B. Šekara, M.P. Lazarević, M. Bošković, „Dominant pole placement with fractional order PID controller: D-decomposition approach”, *ISA Transactions*, vol. 67, pp. 76-86, 2017.
- [23] B. Kristiansson and B. Lennartson, „Evaluation and simple tuning of PID controllers with high-frequency robustness”, *J Process Control*, vol.16, pp. 91-102, February 2006.
- [24] B. Kristiansson and B. Lennartson, „Robust tuning of PI and PID controllers: using derivative action despite sensor noise” *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 55-69, February 2006.
- [25] T.B. Šekara and M.R. Mataušek, „Optimization of PID controller based on maximization of the proportional gain under constraints on robustness and sensitivity to measurement noise”, *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 54, no.1, pp.184-189, Jan. 2009.
- [26] P.O. Larsson, T. Hägglund, „Control signal constraints and filter order selection for PI and PID controllers”, in: *American Control Conference*, San Francisco, CA, USA, pp. 4994-4999, 2011.
- [27] A.D. Micić, M.R. Mataušek, „Optimization of PID controller with high-order noise filter”, *J of Process Control*, vol. 24, pp. 694-700, 2014.
- [28] M.W. Iruthayarajan, S. Baskar, „Evolutionary algorithms based design of multivariable PID controller”, *Expert Systems with Applications*, vol. 36, Issue 5, pp. 9159-9167, July 2009.
- [29] R.A. Krohling, J.P. Rey, „Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms”, *IEEE Trans. Evol. Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 78-82, Feb. 2001.
- [30] J-Y Cao, J. Liang, B-G Cao, „Optimization of fractional order PID controllers based on genetic algorithms”, in *Proc. Of International Conf. on machine learning and cybernetics*, vol. 9, pp. 5686-5689, Guangzhou, China, 2005.
- [31] M. Ünal, A. Ak, V. Topuz, H. Erdal, „Optimization of PID controllers using ant colony and genetic algorithms”, vol. 49, Springer 2012.
- [32] I. Chiha, N. Liouane, P. Borne, „Tuning PID controller using multiobjective ant colony optimization”, *Appl Comput Intel Soft Computing*, vol. 2012, pp. 1-7, 2012.
- [33] M.J. Blondin, J. Sanchis, P. Sicard, J.M. Herrero, „New optimal controller tuning method for an AVR system using a simplified Ant Colony Optimization with a new constrained Nelder-Mead algorithm”, *Applied Soft Computing*, vol. 62, pp. 216-229, Jan 2018.
- [34] Z.L. Gaing, „A particle swarm optimization approach for optimization design of PID controller in AVR system”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, Issue 2, pp. 384-391, 2004.
- [35] V. Mukherjee, S.P. Ghoshal, „Intelligent particle swarm optimized fuzzy PID controller for AVR system”, *Electric Power Systems Research*, vol. 77, Issue 12, pp. 1689-1698, Oct. 2007.
- [36] T-H Kim, I. Maruta, T. Sugie, „Robust PID controller tuning based on the constrained particle swarm optimization”, *Automatica*, vol. 44, Issue 4, pp. 1104-1110, April 2008.
- [37] W-D Chang, S-P Shih, „PID controller design of nonlinear systems using an improved particle swarm optimization approach”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 15, Issue 11, pp. 3632-3639, Nov 2010.
- [38] D. Karaboga, B. Akay, „A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm”, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 214, pp.108-132, 2009.
- [39] M. Abachizadeh, M.R.H Yazdi, A. Yousefi-Koma „Optimal tuning of PID controllers usign Artificial Bee Colony algorithm”, in: *Proc. of 2010 IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics*, 6-9 July 2010.
- [40] D.P. Bertsekas, *Nonlinear programming*, Belmont: Athena scientific, 1999.
- [41] M.R. Rapačić, Matlab implementation of the Particle Swarm Optimization algorithm, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22228-particle-swarm-optimization-psy-algorithm>
- [42] F.G. Shinskey, „How good are our controllers in absolute performance and robustness?”, *Meas. and Control*, vol. 23, pp. 114-121, May 1990.
- [43] J. Kennedy, R.C. Eberhart, „Particle swarm optimization”, in: *Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, pp. 1942-1948, Perth, Australia 1995.
- [44] M.R. Rapačić, Ž. Kanović, „Time-Varying PSO-Convergence Analysis, Convergence Related Parameterization and New Parameter Adjustment Schemes”, *Information Processing Letters*, vol. 109, pp. 548-552, 2009.
- [45] Ž. Kanović, M.R. Rapačić, Z.D. Jeličić, „Generalized Particle Swarm Optimization Algorithm – Theoretical and empirical analysis with application in fault detection”, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, Issue 24, pp. 10175-10186, August 2011.

ABSTRACT

This paper presents a novel Particle Swarm Optimization (PSO) based design procedure of parameters of PID controller. Optimal parameters of PID controller ($k_p^*, k_i^*, k_d^*, T_f^*$) are determined within PSO minimization of Integral of Absolute error (IAE) under constraints on the maximum of the sensitivity and complementary sensitivity function as well as the maximum of the sensitivity to the measurement noise under high frequencies. As a consequence, it provides an efficient suppression of load disturbance with adequate tracking of reference signal. The suggested design method is applicable to the large class of stable and unstable processes with and without dead time, including processes with rational and non rational transfer functions, and those described with distributed parameters. The effectiveness of the presented design procedure is verified with numerical simulations of representatives of processes typically encountered in the process industry.

THE PARTICLE SWARM BASED OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF PID CONTROLLERS UNDER CONSTRAINTS ON PERFORMANCE AND ROBUSTNESS

Marko Bošković, Milan R. Rapačić, Zoran D. Jeličić