

**Robert SAŁAT, Radosław WINICZENKO, Michał AWTONIUK**

SZKOŁA GŁÓWNA GOSPODARSTWA WIEJSKIEGO, WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI,  
ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa

## Dobór nastaw regulatora PID zaimplementowanego w sterowniku PLC przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych

**Dr inż. Robert SAŁAT**

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Krakowskiej w 1997 roku. W 2002 r. uzyskał tytuł doktora na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje jako adiunkt na Wydziale Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół sieci neuronowych, SVM, sterowników PLC oraz układów regulacji.



e-mail: robert\_salat@sggw.pl

**Dr inż. Radosław WINICZENKO**

Ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy w 1996 roku. W 2002 roku uzyskał tytuł doktora na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje jako adiunkt na Wydziale Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie. Główne obszary zainteresowań naukowych skupiają się wokół algorytmów ewolucyjnych i ich zastosowań w inżynierii produkcji.



e-mail: radoslaw\_winiczenko@sggw.pl

**Mgr inż. Michał AWTONIUK**

Ukończył studia na Wydziale Inżynierii Produkcji Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w 2010 roku. Jest doktorantem w Zakładzie Gospodarki Energetycznej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół algorytmów regulacji PID zaimplementowanych w sterownikach PLC.



e-mail: michal@awtoniuk.pl

### 1. Wprowadzenie

Algorytmy PID zaimplementowane w sterownikach PLC są wykorzystywane na szeroką skalę w instalacjach przemysłowych. Badania pokazują [1], że większość algorytmów sterowania wykorzystuje tylko strukturę typu PI. Pomimo tak olbrzymiej popularności algorytmu PID, problemem wciąż nie do końca rozwiązanym pozostaje dobór nastaw regulatora, zapewniających zadowalającą jakość regulacji, dla procesów, nieliniowych, lub których wartość zadana zmienia się w sposób ciągły, bądź też występują zakłócenia, których nie da się skompensować. W dzisiejszych czasach wysiłki naukowców skierowane są na rozwój nowych metod strojenia algorytmów PID. Spośród szerokiej gamy technik strojenia można wyróżnić następujące podgrupy:

- Metody doświadczalne, tak jak Zieglera-Nicholsa i jej odmiany [1],
- Metody analityczne, gdzie parametry obliczane są na podstawie zależności między modelem a celem, np. metoda alokacji biegunów [2],
- Metody charakterystyk częstotliwościowych, gdzie charakterystyka odpowiedzi sterowanego procesu jest użyta do strojenia parametrów algorytmu PID [3],
- Metody optymalizacyjne, gdzie parametry algorytmu PID są optymalizowane np. wg wskaźnika jakości IAE [4, 5],
- Metody adaptacyjne gdzie parametry są zmieniane w czasie rzeczywistym [3],
- Metody na podstawie tablic nastaw [6].

W większości tych metod strojenie parametrów algorytmów PID odbywa się wokół punktu pracy, gdzie modele mogą być rozważane jako liniowe. Problem zaczyna się, gdy należy nastroić parametry regulatora nie dla wartości zadanej, ale dla trajektorii np. ruch ramienia robota, trajektoria grzania w piecach, trajektoria w procesach sterowania ciśnieniem w celu zabezpieczenia fluktuacjom ciśnienia i dużego przeregulowania itp.

Alternatywą dla powyższych metod mogą być algorytmy genetyczne (AG) [7, 8], algorytmy mrówkowe, sztuczne sieci neuronowe, systemy rozmyte, optymalizacja roju. Przy ich wykorzystaniu strojenie parametrów może się odbywać zarówno dla procesów o dynamice zarówno liniowej jak i nieliniowej.

Sterowniki PLC [9] z reguły mają zaimplementowane różne struktury algorytmów PID. Począwszy od klasycznych aż do bardzo zaawansowanych posiadających różnego typu dodatkowe funkcje takie jak, formowanie sygnału wartości zadanej, kompensacja zakłóceń, modyfikowanie działania części całkującej (ang. *anitivindup*) lub ograniczenia sygnału wyjściowego. Niestety często zdarza się, że w przypadku zastosowania złożonej struktury producent nie podaje o niej dokładnej informacji w postaci schematu ani też transmitancji regulatora. Prowadzi to do problemów ze stosowaniem opisywanych w literaturze, gotowych nastaw, które są właściwe tylko dla konkretnej struktury regulatora jak i transmitancji obiektu. W niektórych przypadkach nie sprawdza

### Streszczenie

Artykuł ma na celu przedstawienie metody strojenia parametrów regulatora PID o znanej strukturze zaimplementowanego w sterowniku PLC przy użyciu algorytmów genetycznych. Strojenia regulatora rozpatrywano pod kątem obiektów o charakterystyce statycznej liniowej oraz nieliniowej. Dla każdego obiektu analizowano nastawy uzyskane przy pomocy algorytmów genetycznych oraz dwóch par innych nastaw dedykowanych do danego typu obiektu, które zostały wybrane na podstawie kryterium całkowitego. Testy zostały przeprowadzone dla skoku wartości zadanej, zmiany wartości zadanej wg trajektorii, perturbacji modelu oraz zakłóceń. Dla celów przedstawienia metody jak i testów przyjęto uniwersalną strukturę algorytmu typu PI.

**Słowa kluczowe:** sterownik PLC, algorytmy genetyczne AG, dobór nastaw regulatora PID.

### Tuning PID controller implemented in the PLC using genetic algorithms

#### Abstract

The paper presents a way of tuning parameters of PID regulator of known structure implemented in the PLC using genetic algorithms (Fig. 1). The tuning process was considered for objects with both linear and nonlinear characteristics (Section 2). For each object the parameters were analyzed using genetic algorithms as well as two pairs of other settings dedicated to a particular object type selected on the basis of integral index (Section 5). Objects were simulated on a PC in Matlab / Simulink connected to PLC S7-300 Siemens by DAQ card in a negative feedback loop (Fig. 2). The tests were conducted for the set point, a trajectory model, perturbations and disturbances. For purposes of presentation and testing the methods were adopted as a universal structure of the PI algorithm (Figs. 3 and 4). Comparing the values of the integral indexes one can conclude that in most cases the best quality of control can be achieved with use of genetic algorithms. These settings proved to be more effective than those dedicated to the test objects (Tables 1 and 2).

**Keywords:** PLC controller, genetic algorithms GA, tuning PID controller.

się również funkcja autotuning. Oferowana jest ona przez producentów dla wybranych typów obiektów, z reguły najprostszych.

Wychodząc naprzeciw tym ograniczeniom, autorzy artykułu przedstawili metodę strojenia algorytmu PID, zaimplementowanego w sterowniku PLC o uniwersalnej strukturze przy pomocy algorytmów genetycznych. Metoda ta jest zarówno prosta jak i łatwa w użyciu, a wyniki, dzięki niej osiągnięte są porównywalne z nastawami dobranymi wg metod klasycznych. Sterownik PLC dostrojony w ten sposób, radzi sobie dobrze z problemami, z którymi mają klasyczne metody np. trajektoria ruchu lub duże skoki. Metoda ta nie wymaga również tak dużej wiedzy o strojeniu algorytmów PID.

## 2. Modele procesu

Testowanie metody i ocena jej jakości regulacji przeprowadzono na dwóch różnych modelach. Do testów wybrano modele, dla których znane są nastawy szeroko opisywane w literaturze światowej i istnieje spora ich ilość. Dla procesów o charakterystyce statycznej liniowej wybrano model o transmitancji:

$$G_{MI} = \frac{K_m e^{-s\tau_m}}{(1+sT_m)}, \quad (1)$$

gdzie:  $K_m$  – wzmacnienie statyczne obiektu,  $\tau_m$  – opóźnienie transportowe,  $T_m$  – zastępcza stała czasowa obiektu.

Można go interpretować jako połączenie inercji pierwszego rzędu z opóźnieniem. Dla procesów o charakterystyce statycznej nieliniowej wybrano model opisany transmitancją:

$$G_{MII} = \frac{K_m e^{-s\tau_m}}{s(1+sT_m)}, \quad (2)$$

gdzie:  $K_m$  – wzmacnienie statyczne obiektu,  $\tau_m$  – opóźnienie transportowe,  $T_m$  – zastępcza stała czasowa obiektu.

Jest on syntezą członu inercyjnego, całkującego oraz opóźnienia transportowego.

Modele te zostały zaimplementowane w programie Matlab/Simulink i były połączone ze sterownikiem PLC Siemens S7-313C przy wykorzystaniu karty pomiarowej National Instruments 6229. Symulacja odbywała się w czasie rzeczywistym z częstotliwością próbkowania 100 Hz zarówno modelu jak i sterownika. W obu przypadkach przyjęto następujące parametry:  $K_m = 1,5$ ;  $\tau_m = 2$  s;  $T_m = 10$  s.

## 3. Algorytmy genetyczne

Algorytmy ewolucyjne (ang. Evolutionary Algorithms EA) są algorytmami przetwarzania, które rozwiązują zadania optymalizacyjne i zadania poszukiwania wykorzystując darwinowską strategię przetrwania osobników najlepiej przystosowanych. Modele algorytmów ewolucyjnych opierają się na zasadzie działania rzeczywistego mechanizmu ewolucyjnego.

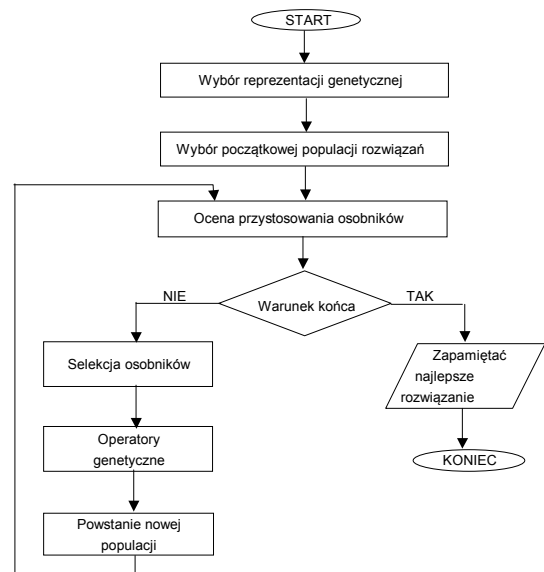
W grupie algorytmów ewolucyjnych należy wyróżnić trzy podstawowe metody optymalizacyjne: algorytmy genetyczne, programowanie ewolucyjne oraz strategię ewolucyjną. Każda z tych metod realizuje, na abstrakcyjnym poziomie algorytmu, zasady wynikające z praw jakimi otacza nas natura, mianowicie:

- poszukiwanie rozwiązań poprzez procesy ewolucji,
- dziedziczenie informacji poprzez pojedyncze rozwiązania w kolejnych pokoleniach,
- wymianie informacji w pojedynczym rozwiązaniu poprzez ich krzyżowanie bądź ich mutację,
- selekcjonowanie pojedynczych rozwiązań.

Algorytmy genetyczne są metodą poszukiwań opartą na mechanizmach doboru naturalnego i dziedziczności. Podobnie jak w naturze rozwiązują zadania znalezienia „dobrych” chromosomów, nie wiedząc nic o rodzaju problemu, który mają rozwiązać.

Korzystają one jedynie z ewolucyjnej zasady przeżycia osobników najlepiej przystosowanych na podstawie ich oceny w środowisku. Cechuje je duża uniwersalność oraz prostota procedur przeszukiwania najlepszych rozwiązań przy użyciu metody stochastycznej. Algorytmy te zdobywają coraz szersze obszary zastosowania w środowiskach naukowych, inżynierskich i w kręgach biznesu. Powodem dużego zainteresowania tą metodą poszukiwań jest jej prostota. Algorytmy te stanowią jednocześnie wszechstronne narzędzie poszukiwań lepszych rozwiązań [10].

Klasyczny algorytm genetyczny przebiega według schematu przedstawionego na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy działania klasycznego algorytmu genetycznego [11]  
Fig. 1. Block diagram of a classical genetic algorithm [11]

Algorytmy genetyczne stosują w bardzo ogólny sposób podobieństwa ciągów kodowych, w wyniku czego są w dużym stopniu wolne od ograniczeń, które są charakterystyczne dla innych metod optymalizacji, jak ciągłość, istnienie pochodnych, jednododalność, itd.

Algorytmy genetyczne stosuje się głównie w programowaniu komputerów, w zagadnieniach optymalizacyjnych [12, 13], prognozowaniu, analizie obrazu klasyfikowaniu obiektów oraz innych dziedzinach zarządzania i produkcji. Mogą one współpracować z innymi metodami sztucznej inteligencji, na przykład: sztucznymi sieciami neuronowymi (ang. neural network), systemami rozmytymi (fuzzy system) oraz coraz częściej stosowanymi metodami eksploracji danych (ang. data mining), tworząc z nimi hybrydowe metody obliczeniowe [14].

## 4. Opis metody strojenia parametrów algorytmu PID za pomocą AG

Metoda polega na szukaniu optymalnych parametrów  $K_p$  i  $T_i$  dla algorytmu PI o uniwersalnej strukturze zaimplementowanego w sterowniku PLC marki Siemens. Algorytm regulacji jest realizowany przez blok funkcyjny FB41, który według literatury [6, 15] opisuje transmitancja:

$$PI(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right), \quad (3)$$

gdzie:  $k_p$  – wzmacnienie proporcjonalne,  $T_i$  – stała całkowania.

Optymalne parametry są wyszukiwane dopiero wtedy, gdy odpowiedź układu jest jak najbliższa wartości zadanej (wg całkowych wskaźników jakości) co w algorytmach genetycznych sprowadza się do optymalizacji funkcji celu zdefiniowanej jako:

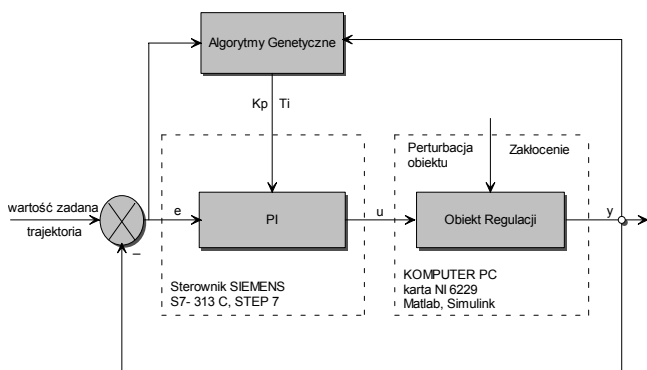
$$J(K_p, T_i) = \sum_{t=0}^{t_{sim}} |y_r(t) - y(t)|, \quad (4)$$

gdzie:  $y_r(t)$  - chwilowa wartość zadana,  $y(t)$  - chwilowa wartość wyjściowa obiektu.

Algorytm genetyczny zostały zaimplementowane w toolboxie FlexGA Evolutionary and Genetic Algorithms w środowisku Matlab. Algorytm ten działa w trybie offline co wiąże się potrzebą zadeklarowania transmitancji zarówno algorytmu PID, jak i modelu połączonego w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Wynikiem przeszukania obszaru parametrów  $K_p$  i  $T_i$  są optymalne nastawy, które zapewniają najmniejszą wartość wskaźnika jakości zdefiniowanego jako funkcja celu.

Ogólny schemat zasady działania algorytmu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Ogólny schemat działania algorytmu  
Fig. 2. General scheme of the algorithm

## 5. Wyniki

Celem przeprowadzonych badań była ocena skuteczności nastaw otrzymanych w wyniku działania algorytmu genetycznego oraz sprawdzenie, jak wypadają one na tle metod klasycznych, opartych na tablicowych zbiorach parametrów.

Testy obejmowały szereg elementów, które sprawdzały algorytm regulacji pod kątem:

- Skokowej zmiany wartości zadanej – dla obu modeli przyjęto 4V jako nowo ustalony punkt pracy, przy zachowaniu zerowych warunków początkowych
- Zmiany wartości zadanej według trajektorii –
  - Model I: wartość zadana zmieniała się zgodnie z dynamiką odpowiedzi członu inercyjnego  $(5s+1)^{-1}$  na kolejne wymuszenia skokowe
  - Model II: wartość zadana zmieniała się zgodnie z dynamiką odpowiedzi członu inercyjnego  $(25s+1)^{-1}$  na kolejne wymuszenia skokowe
- Wystąpienia nagłych zakłóceń – algorytm regulacji musiał zareagować na skokową zmianę wartości zadanej, a następnie, po ustabilizowaniu obiektu, musiał skompensować wystąpienie skokowego zakłócenia w wartości sygnału wyjściowego
- Wystąpienia perturbacji modelu – przy kolejnej skokowej zmianie punktu pracy nastąpiło zmniejszenie wartości parametrów obiektu  $\tau_m$ ,  $T_m$  o 20%

Dobór nastaw regulatora PID został przeprowadzony za pomocą następujących parametrów algorytmu genetycznego:

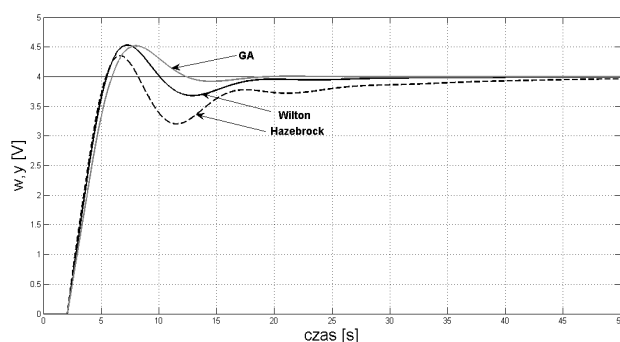
- Rozmiar populacji 30 osobników
- Liczba generacji 100
- Selekcja metodą turniejową
- Prawdopodobieństwo krzyżowania  $p_k=0,77$
- Prawdopodobieństwo mutacji  $p_m=0,077$

Nastawy jakie brano pod uwagę podczas symulacji przedstawia tabela 1. Są w niej zawarte nastawy wypracowane przez algorytm genetyczny, jak i te autorskie, publikowane w literaturze.

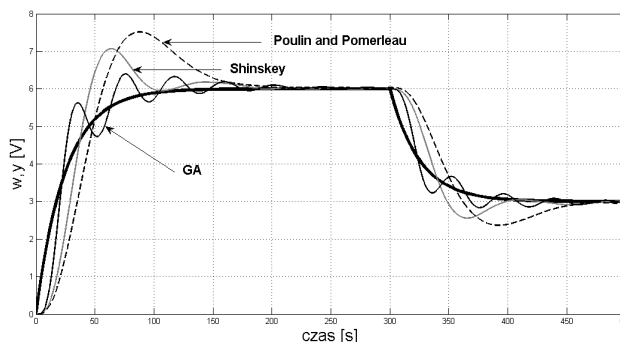
Tab. 1. Nastawy dla algorytmu regulacji PI  
Tab. 1. Parameters for the PI control algorithm

		Model I $K_p$   $T_i$ [s]	Model II $K_p$   $T_i$ [s]
AG	skok	1,97   10,33	0,086   78,63
	trajektoria	3,44   8,28	0,161   73,84
	zakłócenia	1,97   10,33	0,086   78,63
	perturbacje	1,97   10,27	0,066   71,79
Wilton		2,25   10	-
Hazebroek & Van der Waerder		2,67   14,28	-
Shinsky		-	0,053   48
Poulin & Pomerleau		-	0,031   60,87

Wybrane przebiegi regulacji z użyciem testowanych nastaw przedstawiają rysunki 3 oraz 4. Można na nich zaobserwować różnice w odpowiedzi obiektu na sygnał nastawczy regulatora działającego z badanymi nastawami.



Rys. 3. Przebieg regulacji dla różnych nastaw przy skokowym wymuszeniu dla modelu I  
Fig. 3. Output of the controlled variable for different parameters for setpoint step (model I)



Rys. 4. Przebieg regulacji dla różnych nastaw przy zmianie wartości zadanej według trajektorii dla modelu II  
Fig. 4. Output of the controlled variable for different parameters for trajectory tracking (model II)

Uzyskana dzięki nim, jakość regulacji została oceniona przy pomocy całkowitych wskaźników IAE, ISE oraz ITAE. Wartości poszczególnych wskaźników zgromadzono w tabelach 2 i 3. Wskaźniki brane pod uwagę były obliczane według wzorów:

$$ISE = \int_0^t (y_r(t) - y(t))^2 dt, \quad (5)$$

$$IAE = \int_0^t |y_r(t) - y(t)| dt, \quad (6)$$

$$ITAE = \int_0^t |y_r(t) - y(t)| dt, \quad (7)$$

gdzie:  $y_r(t)$  - chwilowa wartość zadana,  $y(t)$  - chwilowa wartość wyjściowa obiektu.

Tab. 2. Wskaźniki jakości dla modelu I  
Tab. 2. Quality indexes for model I

		AG	Wilton	Hazebroek & Van der Waerder
skok	IAE	17,6	18,5	23,7
	ISE	52,4	50,6	52,1
	ITAE	55,3	82,6	209,9
trajektoria	IAE	36,5	48,8	60,3
	ISE	43,0	85,5	81,5
	ITAE	2 172	2 456	3 155
zakłócenia	IAE	22,1	23,0	29,2
	ISE	55,8	53,7	55,4
	ITAE	293	328	532
perturbacje	IAE	27,7	29,5	36,3
	ISE	66,5	65,0	67,4
	ITAE	596	686	922

Tab. 3. Wskaźniki jakości dla modelu II  
Tab. 3. Quality indexes for model II

		AG	Shinsky	Poulin & Pomerleau
skok	IAE	128	153	193
	ISE	258	337	418
	ITAE	5 411	6 268	9 385
trajektoria	IAE	146	235	379
	ISE	80	226	422
	ITAE	42 359	65 468	110 933
zakłócenia	IAE	159	188	235
	ISE	274	353	440
	ITAE	15 601	18 628	24 272
perturbacje	IAE	193	217	275
	ISE	336	406	499
	ITAE	25 494	28 219	37 906

Na podstawie zebranych danych można stwierdzić, iż w obu badanych modelach nastawy uzyskane przy pomocy algorytmu genetycznego zapewniają konkurencyjną jakość regulacji w stosunku do metod klasycznych.

W przypadku bardziej złożonego modelu, jakim był model II, okazało się, że nastawy dedykowane dla tego typu obiektów są zdecydowanie mniej atrakcyjne pod względem jakościowym od nastaw wypracowanych przez algorytmy genetyczne.

## 6. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano możliwość zastosowania AG w strojeniu PID.

Porównując wartości wskaźników całkowitych można stwierdzić, że przy stosowaniu nastaw wypracowanych przez algorytmy genetyczne otrzymano w większości przypadków regulację najlepszą pod względem jakościowym. Nastawy te okazały się skuteczniejsze od nastaw dedykowanych dla badanych obiektów.

Pokazano również, że takiego sposobu można użyć do optymalizacji nastaw w rzeczywistych sterownikach PLC, które są powszechnie wykorzystywane w przemyśle.

Ważną zaletą prezentowanej metody jest jej uniwersalność. Można ją zastosować do dostrojenia każdej pętli regulacji z dowolnym sterownikiem, którego producent udostępnia informacje na temat struktury PID.

Natomiast do jej wad niewątpliwie należy zaliczyć pracę w trybie offline oraz konieczność poznania transmitancji algorytmu PID jak i obiektu. Należy jednak zauważyć, że model sterowanego obiektu może być dowolnego typu jak i rzędu.

Podczas strojenia z użyciem algorytmów genetycznych istnieje możliwość doboru nastaw ukierunkowanych na inne wskaźniki jakości takie jak wartość przeregulowania czy czas narastania. Należy jedynie zaadaptować odpowiednio funkcję celu.

Szerokie stosowanie AG pokazane w literaturze światowej potwierdza dobre właściwości tej metody.

## 7. Literatura

- [1] Astrom K. J., Hagglund T.: PID Controllers: Theory, Design, And Tuning. Instrument Society of America 1995.
- [2] Skoczowski S., Osypiuk R., Pietruszewicz K.: Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody w praktyce, PWN 2006.
- [3] Comino P., Munro N.: PID Controllers: Recent tuning methods and design to specification, Control Theory and Applications, IEE Proceedings 149/2002.
- [4] Feng W., Li Y.: Performance indices in evolutionary based automation with application to bath pid generation, Computer Aided Control System Design, Preceedings of the IEEE International Symposium, 1999.
- [5] Żuchowski A.: Metoda doboru nastaw regulatora PID uwzględniająca postulowany zapas stabilności modułu i fazy, PAK 1/2004.
- [6] O'Dwyer A.: Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, Imperial College Press 2006.
- [7] Unal M., Erdal H., Topuz V.: Trajectory Tracking Performance Comparison Between Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization for PID Controller Tuning on Pressure Process. Wiley Periodicals Inc 2010.
- [8] Herrero J.M., Blanco X., Martinem M., Salcedo J.V.: Optima PID Tuning with genetic algorithms for non linear process models, 15th Triennial World Congress, Barcelona 2002.
- [9] Dębowski A.: Procedury regulacyjne sterowników programowalnych, PAR 1/2001.
- [10] Goldberg D. E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie, WNT 1998.
- [11] Rutkowski L.: Computational Intelligence, Methods and Techniques, Springer 2008.
- [12] Winiczenko R.: Optymalizacja parametrów zgrzewania tarcowego za pomocą algorytmów genetycznych, Inżynieria Rolnicza 2(100), 2008.
- [13] Winiczenko R.: Zastosowanie algorytmów genetycznych w nieliniowym zagadnieniu transportowym, Gospodarka Materiałowa i Logistyka Nr 6, PWE, 2009.
- [14] Gen M., Cheng R.: Genetic Algorithm and Engineering Optimization, John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [15] Sałat R., Korpysz K., Obstawski P.: Wstęp do programowania sterowników PLC, WKiŁ 2010.

otrzymano / received: 01.06.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.04.2012

artykuł recenzowany / revised paper