

## IMPLEMENTACJA AUTOMATYCZNYCH METOD STROJENIA NASTAW REGULATORA PID W STEROWNIKU PROGRAMOWALNYM

Marek ADAMKIEWICZ<sup>1</sup>, Paweł DAMPS<sup>2</sup>, Karol GRYN<sup>3</sup>, Robert PIOTROWSKI<sup>4</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. e-mail: marek.adamkiewicz9@gmail.com

2. dampsp@gmail.com

3. kargryn@student.pg.gda.pl

4. robert.piotrowski@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Zainteresowanie środowiska przemysłowego klasycznymi algorytmami regulacji, dającymi akceptowalne wyniki pracy i stabilność w odniesieniu do zmiennych warunków otoczenia, wciąż jest bardzo duże. W artykule opisano wybrane inżynierskie metody doboru nastaw regulatora PID. Przedstawiono implementację sprzętową jednej z nich (metoda Åströma-Hägglunda) w sterowniku programowalnym PLC, umożliwiającą automatyczny dobór nastaw regulatora. Na podstawie symulacji w pętli sprzętowej liniowego układu regulacji PID dokonano analizy porównawczej pracy tego układu dla nastaw regulatora obliczonych trzema metodami inżynierskimi.

**Słowa kluczowe:** regulator PID, inżynierskie metody strojenia, automatyczny dobór nastaw PID, sterownik PLC.

### 1. WSTĘP

Wśród licznych przemysłowych metod sterowania, w układach automatycznej regulacji, najczęściej stosowanym regulatorem jest regulator PID. Głównym czynnikiem mającym wpływ na jakość regulacji (statycznej i dynamicznej) są właściwie dobrane parametry (nastawy) regulatora:  $K_p$  - współczynnik wzmocnienia,  $T_i$  - stała czasowa całkowania,  $T_d$  - stała czasowa różniczkowania.

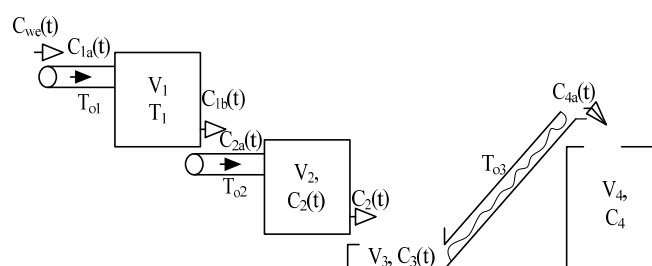
W 1942 roku J.R. Ziegler oraz N.B. Nichols jako pierwsi zaproponowali dwa sposoby doboru nastaw [1]. Od tego czasu opracowano bardzo wiele algorytmów strojenia regulatorów PID. Można je podzielić na metody optymalizacyjne i inżynierskie. W przypadku pierwszej grupy, rozwiązywane jest zadanie optymalizacji, w którym zmiennymi decyzyjnymi są  $K_p$ ,  $T_i$  i  $T_d$  oraz minimalizowana jest funkcja celu, będąca najczęściej jednym z kryteriów całkowych z uchybu regulacji [2, 3, 4]. Dobór nastaw metodami inżynierskimi opiera się na przeprowadzeniu eksperymentu identyfikacyjnego, którego zadaniem jest wyznaczenie parametrów zastępczych obiektu regulacji. W przemysłowych rozwiązaniach stosuje się trzy sposoby przeprowadzania eksperymentów identyfikacyjnych: badanie odpowiedzi skokowej obiektu [5]; badanie parametrów cyklu granicznego osiąganego przez doprowadzenie układu regulacji do granicy stabilności [6, 7]; badanie parametrów oscylacji układu regulacji o niewielkiej amplitudzie (metoda Åströma-Hägglunda, zwana przekąźnikową) [8].

Przemysłowe wykorzystanie cyfrowych urządzeń sterujących (np. sterowniki programowalne, komputery przemysłowe) wymusiło opracowanie oraz implementację sprzętową algorytmów umożliwiających automatyczne strojenie nastaw regulatorów PID. Ze względu na najmniejszą ingerencję w proces regulacji najszersze zastosowanie zyskała metoda Åströma-Hägglunda, [8, 9, 10]. Została ona zaimplementowana w wielu regulatorach przemysłowych, np. firmy Lumel, oraz sterownikach programowalnych, np. firmy Siemens. Należy podkreślić, że w większości przypadków, w dokumentacji technicznej regulatorów przemysłowych brakuje szczegółowych danych na temat zaimplementowanych metod strojenia regulatorów PID.

W artykule przedstawiono model matematyczny przykładowego procesu sterowania. Następnie opisano, zaimplementowano i przetestowano trzy metody strojenia: I i II metoda Zieglera-Nicholsa oraz metoda Åströma-Hägglunda (przekąźnikowa). Na koniec przedstawiono obliczone wartości nastaw regulatora PID i uzyskane przebiegi sterowania dla prostokątnej trajektorii zadanej.

### 2. OPIS I MODELOWANIE PROCESU STEROWANIA

Jako proces sterowania wybrano wydzieloną część linii technologicznej. Składa się ona z układu zbiorników połączonych taśmociągami (rys. 1). Produkty przejściowe są transportowane między kolejnymi etapami produkcji. Takie układy mają zastosowanie, np. w przemyśle spożywczym, chemicznym lub petrochemicznym.



Rys. 1. Schemat wydzielonej części linii technologicznej

gdzie:  $C_{we}(t)$ ,  $C_{1a}(t)$ ,  $C_{1b}(t)$ ,  $C_{2a}(t)$ ,  $C_2(t)$ ,  $C_3(t)$ ,  $C_{4a}(t)$ ,  $C_4(t)$  – stężenia molowe produktu [mol/dm<sup>3</sup>],  $T_{o1}$ ,  $T_{o2}$ ,  $T_{o3}$ ,  $T_1$  – czasy opóźnień wynikające z transportu lub łączenia substancji [s],  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  – pojemności kolejnych zbiorników [m<sup>3</sup>].

Proces sterowania zamodelowano w przestrzeni stanu jako układ inercyjny trzeciego rzędu z opóźnieniem. Wykorzystano trzy zmienne stanu odpowiadające stężeniom substancji w kolejnych zbiornikach:  $x_1(t) = C_2(t)$ ,  $x_2(t) = C_3(t)$ ,  $x_3 = C_4(t)$ . Wielkością wejściową jest stężenie substancji wprowadzanej do pierwszego ze zbiorników:  $u(t) = C_{we}(t)$ , natomiast wielkością wyjściową jest stężenie substancji w ostatnim zbiorniku:  $y(t) = C_4(t)$ . Opóźnienia związane są z czasem transportu substancji do kolejnych zbiorników. Równania stanu (1) oraz wyjścia (2) pozwalają na uzyskanie pełnej informacji o procesie sterowania.

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -\frac{f}{V_2}x_1(t) + k_1\frac{f}{V_2}u(t - T_1 - T_{o1} - T_{o2}) \\ \dot{x}_2(t) = \frac{f}{V_3}x_1(t) - \frac{f}{V_3}x_2(t) \\ \dot{x}_3(t) = \frac{f}{V_4}x_2(t - T_{o3}) - \frac{f}{V_4}x_3(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$y(t) = x_3(t) \quad (2)$$

Model zaimplementowano w środowisku Matlab. Przyjęto następujące wartości parametrów: natężenie przepływu  $f = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ , pojemności  $V_2 = V_3 = V_4 = 1 \text{ m}^3$ , czasy opóźnień  $T_1 = T_{o1} = 0,5$ ;  $T_{o2} = 1 \text{ s}$ , współczynnik proporcjonalności  $k_1 = 1 [-]$ .

### 3. IMPLEMENTACJA SPRZĘTOWA

#### 3.1. Struktura pętli sprzętowej systemu sterowania

System sterowania oparto na technice symulacyjnej HIL (ang. Hardware In the Loop), która jest wykorzystywana podczas projektowania i weryfikacji zaproponowanych metod strojenia nastaw regulatora PID. Implementację zrealizowano na platformie modułowego sterownika GE Fanuc RX3I. Składa się on z jednostki centralnej, zasilacza, modułów wejść/wyjść dyskretnych i analogowych oraz z modułu komunikacyjnego.

Oprócz sterownika innymi niezbędnymi elementami składowymi infrastruktury sprzętowo-programowej są: komputer klasy PC z zainstalowanym środowiskiem symulacyjnym Matlab z dodatkiem Real-Time Windows Target (RTWT), umożliwiającym pracę modelu komputerowego procesu w czasie rzeczywistym; karta akwizycji danych PCI firmy Advantech (model PCI-1711U/U), umożliwiająca wymianę sygnałów między sterownikiem a komputerem; aplikacja wizualizacyjna SCADA (ang. Supervisory Control and Data Acquisition) wykonana w środowisku InTouch, która umożliwia interakcje operatora z modelem procesu; serwer OPC (ang. OLE for Process Control) stanowiący pomost pomiędzy aplikacją użytkownika a sterownikiem; zrealizowany przy użyciu KEPServerEX 5 w technologii DDE (ang. Dynamic Data Exchange) do wymiany informacji z aplikacją wizualizacyjną SCADA oraz OPC do komunikacji z modelem obiektu w Matlab RTWT; transmisja sieciowa TCP/IP Ethernet, wykorzystywana do komunikacji pomiędzy sterownikiem a serwerem OPC.

Po analizie licznych inżynierskich metod strojenia regulatora PID, ostatecznie zaimplementowano trzy z nich:

I i II metodę Zieglera-Nicholsa oraz metodę Åströma-Hägglunda. W dalszej części artykułu przedstawiono ostatnią z nich. Szczegóły dwóch pozostałych metod można znaleźć np. w [6].

Metoda Åströma-Hägglunda polega na wykorzystaniu przełącznika sterowanego w celu wzbudzenia drgań harmonicznym o niewielkiej amplitudzie w układzie regulacji. Pozwala to na badanie parametrów cyklu granicznego bez konieczności doprowadzenia obiektu do granicy stabilności. Badanie parametrów obiektu składa się z dwóch następujących po sobie etapów. W związku z pracą sterownika w cyklu, w każdym z algorytmów sprawdzane jest pierwsze wywołanie danego podprogramu w celu przypisania wartości początkowych do wybranych zmiennych.

#### 3.2. Algorytm identyfikacji wstępnej parametrów modelu

Wykonanie identyfikacji wstępnej ma na celu wyznaczenie odpowiednich parametrów charakteryzujących wykorzystany w drugim etapie przełącznik sterowany.

Automatyczny algorytm identyfikacji wstępnej bazuje na badaniu odpowiedzi obiektu na skokową zmianę wymuszenia – bez wykorzystania regulatora. Wymuszenie jest w czasie tego procesu dopasowywane do wzmocnienia statycznego obiektu tak, aby wykorzystane było jak najszersze pasmo przetwornika analogowo-cyfrowego. W programie przyjęto, że odpowiednie wymuszenie jest osiągnięte dla odpowiedzi obiektu mieszczącej się między 1/3 a 2/3 zakresu przetwornika A/C.

Po spełnieniu warunku dotyczącego wykorzystania zakresu pomiarowego, otrzymana wartość wzmocnienia jest przesyłana do docelowego podprogramu identyfikacyjnego.

#### 3.3. Algorytm identyfikacji parametrów modelu metodą przełącznikową

Schemat blokowy identyfikacji metodą Åströma-Hägglunda pokazano na rysunku 2. Algorytm wykonuje się automatycznie. W pierwszym wywołaniu podprogramu przypisywane są parametry opisujące regulator dwustanowy, zgodnie z założeniami autorów metody [8], które zostają obliczane na podstawie danych z podprogramu odpowiadającego za strojenie wstępne. Przyjęto następujące wartości:

- szerokość histerezy:  $\pm \frac{\text{wymuszenie}}{32}$ ,
- amplituda sygnału sterującego:  $\pm \frac{\text{wymuszenie}}{16}$ ,
- wartość zadana, równa aktualnej wartości wielkości regulowanej.

Tak dobrane parametry miały na celu wyeliminowanie ryzyka przekroczenia dopuszczalnych wartości sygnału sterującego lub sygnału sterowanego, który ze względu na wykorzystanie wejść i wyjść analogowych, zapisywanych w formacie liczb całkowitych, wynosi 32767.

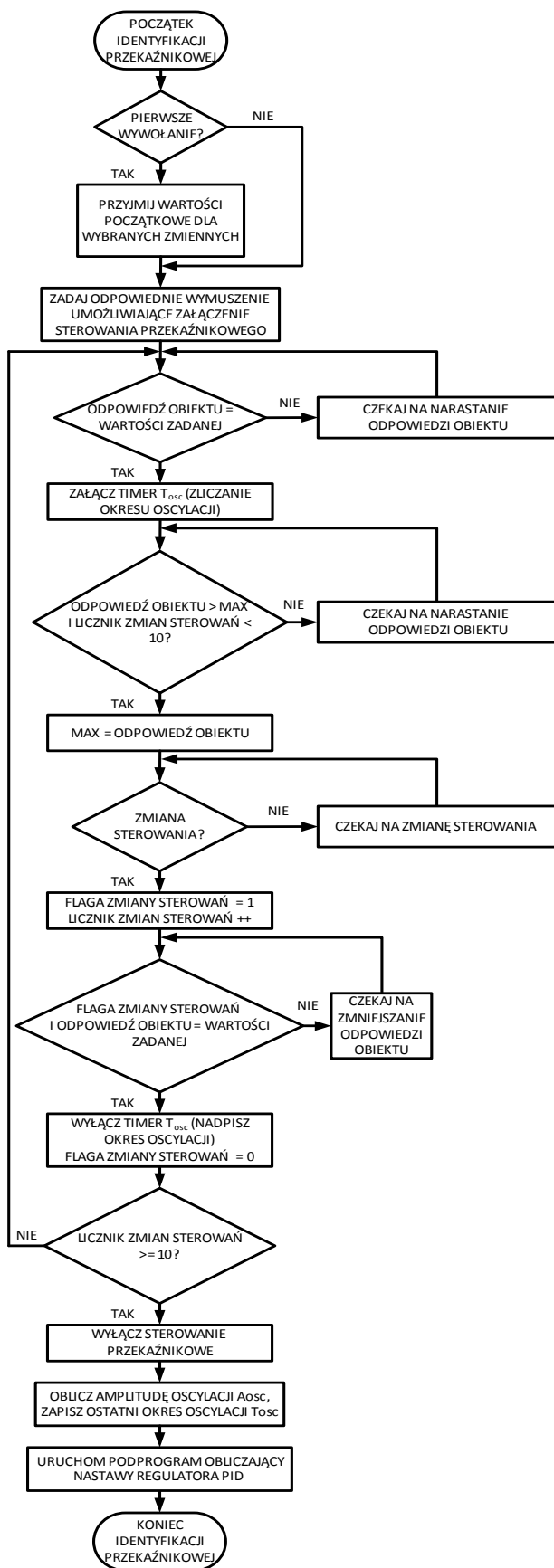
Następnie zadane zostaje wymuszenie skokowe, umożliwiające załączenie sterowania przełącznikowego.

Wyznaczanie okresu oscylacji bazuje na obliczeniu czasu, w którym sygnał sterujący jest niezmienny. Jest to realizowane z wykorzystaniem zegara, który włącza się w momencie zmiany sygnału sterującego. Po wykryciu kolejnej zmiany, wartość znajdująca się w odpowiednim rejestrze przyjmowana jest jako okres oscylacji  $T_{osc}$ .

Rejestrowanych jest pięć pełnych oscylacji wielkości sterowanej, czyli 10 zmian sygnału sterującego. Po ich wykonaniu przyjmuje się, że wyjście obiektu ma charakter oscylacji o stałej amplitudzie. W trakcie procesu

identyfikacyjnego szukana jest maksymalna wartość sygnału sterowanego.

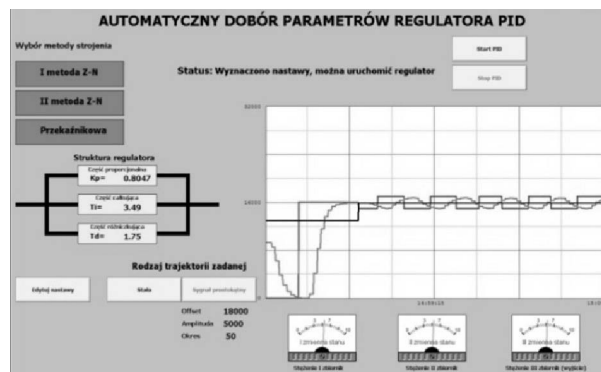
Po zakończeniu pracy algorytmu identyfikacji, załączany jest podprogram odpowiedzialny za wgranie nastaw, obliczanych z informacji o zmianie wartości sygnału sterującego, sterowanego i okresu oscylacji, do wykorzystanego typu regulatora PID.



Rys. 2. Schemat blokowy identyfikacji metodą Åströma-Hägglunda

#### 4. BADANIA TESTOWE

W tej części artykułu, przedstawiono wyniki sterowania uzyskane po obliczeniu nastaw regulatora PID trzema różnymi metodami. Do prezentacji wyników sterowania wykorzystano autorski system SCADA. Ekran główny tego systemu pokazano na rysunku 3. Umożliwia on: wybór metody strojenia nastaw, konfigurację regulatora PID, ręczną edycję nastaw, ustawienie parametrów trajektorii zadanej, podgląd aktualnych wartości zmiennych stanu oraz załączenie lub wyłączenie regulatora. Wykres przedstawia przebieg rejestrowanych wielkości: wielkość zadana  $C_{4,zad}(t)$  – kolor czarny, wielkość sterowana  $C_4(t)$  – kolor jasno-szary, wielkość sterująca  $C_{we}(t)$  – kolor ciemno-szary, w trakcie identyfikacji parametrów układu regulacji metodą przekąźnikową. W pierwszym etapie pracy zaprojektowanego systemu, badana jest odpowiedź obiektu sterowania na skokową zmianę wymuszenia. Następnie załączane jest sterowanie przekąźnikowe. Wartości na osi poziomej określają czas zgodnie z zegarem systemowym. Oś pionową przeskalowano do wielkości mierzonych w zakresie 0 – 32767 jednostek niemianowych.



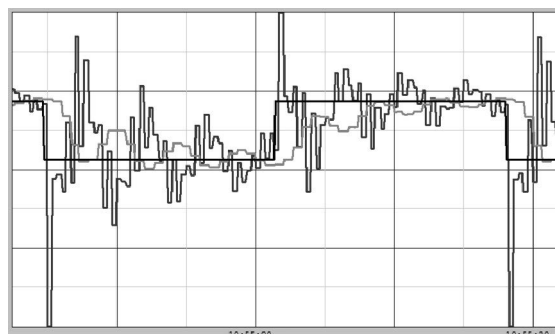
Rys. 3. Zrzut ekranu systemu SCADA

Obliczone wartości nastaw regulatora PID pokazano w tabelcy 1.

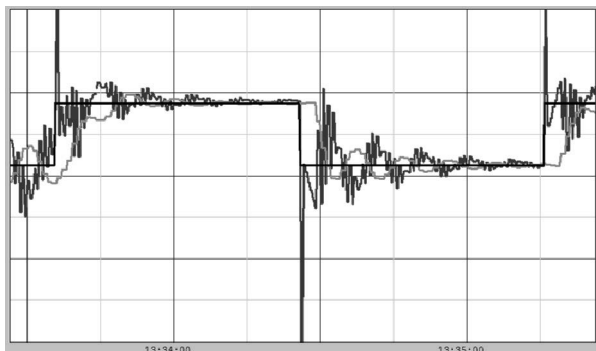
Tabelca 1. Wartości nastaw regulatora PID

Metoda strojenia Nastawy regulatora	I Zieglera-Nicholsa	II Zieglera-Nicholsa	Åströma-Hägglunda
$K_p$	1,30	0,92	0,81
$T_i$	11,49	7,01	3,50
$T_d$	2,87	1,75	1,75

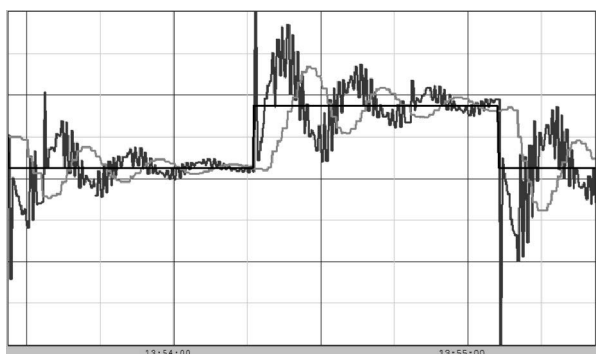
Wyniki sterowania, dla trzech metod strojenia, pokazano na rysunkach 4-6. W tabelcy 2 porównano wskaźniki jakości sterowania.



Rys. 4. Odpowiedź układu regulacji - I metoda Zieglera-Nicholsa



Rys. 5. Odpowiedź układu regulacji - II metoda Zieglera-Nicholsa



Rys. 6. Odpowiedź układu regulacji - metoda Åströma-Hägglunda

Tablica 2. Porównanie jakości regulacji

Metoda strojenia Parametr jakościowy	I Zieglera-Nicholsa	II Zieglera-Nicholsa	Åströma-Hägglunda
Czas regulacji [s]	50	40	>50
Czas narastania [s]	40	7	7
Przeregulowanie [%]	0	10	20
Uchyb ustalony [-]	0	0	0

Przeprowadzone testy pozwoliły na ocenę trafności wyboru każdego z algorytmów. Dla rozważanego modelu obiektu, najlepsze wyniki uzyskano dla II metody Zieglera-Nicholsa oraz metody Åströma-Hägglunda, przy czym pierwsza z nich zapewniła nieznacznie lepsze wskaźniki jakości dynamicznej. Zaletami drugiej metody jest szybszy proces identyfikacyjny oraz bezpieczniejszy jego przebieg. Z tego powodu jest ona obecnie najczęściej implementowana w rozwiązaniach przemysłowych. Nastawy wyznaczone metodami inżynierskimi nie gwarantują optymalnej pracy układu, stanowią jednak dobry punkt odniesienia do dalszej syntezy układu regulacji.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono implementację sprzętową przekąźnikowej metody strojenia regulatora PID, umożliwiającej automatyczne wyznaczenie jego parametrów. Przedstawiono wyniki samostrojenia dla trzech algorytmów (I i II metoda Zieglera-Nicholsa oraz metoda Åströma-Hägglunda). Przeprowadzono analizę ilościową uzyskanych wyników sterowania.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Ziegler J.G., Nichols N. B.: Optimum settings for automatic controllers, ASME Transactions, Vol. 64, 1942, pp. 759–768.
2. Xu W., Lim K. W., Ho. W.K.: Optimal Gain and Phase Margin Tuning for PID Controllers, Automatica, Vol. 34, No. 8, 1998, pp. 1009-1014.
3. Padula F., Visioli A.: Optimal tuning rules for proportional-integral-derivative and fractional-order proportional-integral-derivative controllers for integral and unstable processes, IET Control Theory Appl., Vol. 6, Issue 6, 2012, pp. 776-786.
4. Dziendziel T., Gruk M., Piotrowski R.: Optymalizacja nastaw regulatorów PID do sterowania suwnicą 3D, Pomiary Automatyka Robotyka, Nr 6, 2014, s. 84-89.
5. Åström K. J., Hägglund T.: Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control, Journal of Process Control, Vol. 14, No. 6, 2004, pp. 635-650.
6. Das S., Chakraborty A., Ray J.K., Bhattacharjee S., Neogi B.: Study of Different Tuning Approach with Incorporation of Simulation Aspect for Z-N (Ziegler-Nichols) Rules, International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 2, No. 8, 2012, pp. 1-5.
7. Haugen F., Lie B.: Relaxed Ziegler-Nichols Closed Loop Tuning of PI Controllers, Modeling, Identification and Control, Vol. 34, No. 2, 2013, pp. 83-97.
8. Åström K.J., Hägglund T.: Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, Automatica, Vol. 20, No. 5, 1984, pp. 645-651.
9. Świder Z., Trybus L., Stec A.: Automatyczne strojenie przekąźnikowe mikroregulatora temperatury, Pomiary Automatyka Robotyka, Nr 2, 2010, s. 588-597.
10. Kula K.: Automatyczne strojenie regulatora PID w układzie on-line na podstawie identyfikacji metodą przekąźnikową, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Nr 62, 2009, s. 37-50.

## PLC IMPLEMENTATION OF AUTOMATICS TUNING METHODS FOR PID CONTROLLER

Industrial environments are still interested in classic control algorithms: providing acceptable results of the work and stability in relation to changing environmental conditions. This paper includes the description of heuristic tuning methods for the widely used PID. There's also shown Åström-Hägglund (relay) automatic tuning algorithm implemented in Programmable Logic Controller. Results of experiments were obtained from simulations using dynamic plant model in Hardware In the Loop technique. Simulation tests presents control results for the dynamic plant.

**Keywords:** PID controller, heuristic tuning methods, automatic tuning of PID, Programmable Logic Controller.