

Sterowanie piecem indukcyjnym do laboratoryjnego spalania biomasy

Streszczenie. W pracy przedstawiono koncepcję modernizacji pieca indukcyjnego przeznaczonego do laboratoryjnego spalania biomasy. Polegała ona na zastosowaniu programowalnego sterownika logicznego (PLC) do sterowania temperaturą spalania próbek biomasy. Opracowano jeden główny program sterujący, składający się z kilku podprogramów. Wyniki testów laboratoryjnych potwierdziły skuteczność funkcjonowania w/w systemu sterowania piecem indukcyjnym.

Abstract. The paper presents the concept of modernization of the induction furnace designed for laboratory biomass combustion. This entails the use of a programmable logic controller (PLC) to control the combustion temperature of samples of biomass. Developed one of the main control program, consisting of several sub-schemes. Results of laboratory tests have confirmed the effectiveness of w / w induction furnace control system. **(The control program for laboratory induction furnace combustion of biomass)**

Słowa kluczowe: piec indukcyjny, sterownik PLC, algorytm regulacji PID.
Keywords: induction furnace, PLC controller, PID control algorithm.

Wstęp

Z uwagi na duże zainteresowanie zagadnieniami dotyczącymi zastosowania w energetyce cieplnej biomasy lignocelulozowej, w Laboratorium Technologii Produkcji i Oceny Jakości Biopaliw na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja w Krakowie – prowadzone są prace badawcze nad możliwością stosowania różnego rodzaju materiału wsadowego do kotłów – określanych jako biomasa. Paliwo to produkowane jest przemysłowo z roślin energetycznych i najczęściej dostępne jest w postaci granulowanego pelletu lub brykietu. Jednym z najważniejszych problemów eksploatacyjnych kotłów jest zalaniem rusztu płynnym popiołem (szlaką). Stąd istotnym parametrem związanym z procesem spalania biomasy jest temperatura płynięcia popiołu. Przekroczenie tej temperatury skutkuje zalaniem rusztu szlaką, a to powoduje wyłączenie kotła z eksploatacji. W celu zapewnienia prawidłowych warunków eksploatacji kotła istnieje konieczność indywidualnego określenia temperatury płynięcia popiołu dla poszczególnych partii biomasy przeznaczonej do spalania. Każda partia biomasy może charakteryzować się innym składem fizyko-chemicznym [1].

Dla dotrzymania prawidłowych warunków eksploatacji kotła istnieje konieczność indywidualnego określenia temperatury płynięcia popiołu dla poszczególnych partii tego surowca. Zadanie to jest realizowane w/w laboratorium na urządzeniu wykorzystującym zjawisko rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego [2]. Urządzenie umożliwia oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową zgodne z normą [3].

Cel i zakres

Celem pracy było opracowanie systemu sterowania piecem indukcyjnym do spalania biomasy w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem sterownika PLC. Zakres prac obejmował opracowanie algorytmu sterowania z uwzględnieniem procedur opisanych normą [3] oraz przeprowadzenie weryfikacji w/w systemu sterowania w warunkach laboratoryjnych. Konieczność zastosowania programowalnego sterownika wynika z dużej liczby prowadzonych badań laboratoryjnych, które są czasochłonne i muszą być prowadzone wg ściśle określonych procedur. Dla poprawnego funkcjonowania

kotłów jest niezwykle ważne precyzyjne wyznaczenie temperatury płynięcia popiołu.

Charakterystyka układu sterowania piecem indukcyjnym

Układ sterowania został opracowany zgodnie z metodyką stosowaną w cyklu projektowania układu sterowania w oparciu o model. Przeprowadzono identyfikację obiektu sterowania pod względem jego właściwości dynamicznych. Wykonano model sterowania w programie Matlab-Simulink, który zweryfikowano logicznie symulacją komputerową [4, 5]. W/w prace projektowe i badawcze ułatwiły opracowanie algorytmu sterowania oraz pozwoliły wstępnie oszacować nastawy regulatora PID. Bez tych informacji zestrojenie regulatora z obiektem byłoby skomplikowane [6].

Opisany w normie algorytm prowadzenia procesu spalania biomasy celem wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu wymaga precyzyjnego (liniowego) zwiększania jej wartości. Wielkości fizyczne w systemach automatyki mogą być sterowane lub regulowane (stabilizowane). W przypadku klasycznego sterowania, wartość jest tylko zmieniana, bez możliwości kompensacji odchyłeń wywołanych czynnikami zewnętrznymi. W przypadku regulacji, ustalona wartość jest korygowana tak, aby zapewnić najmniejsze odchylenie od wartości zadanej [7]. Stąd wybrano sterownik PLC, gdzie istnieje możliwość zaprogramowania liniowego tempa wzrost z funkcją regulacji. Kluczowym jest również możliwość zapisania w pamięci sterownika kilku wariantów programu, różniących się dynamiką oraz specjalnego programu umożliwiającego fizyko-chemiczne badanie próbek popiołu. Do sterowania stanowiskiem laboratoryjnym wybrano sterownik Siemens Logo 8 z panelem wizualizacyjnym klasy HMI. Sterownik ten należy do grupy sterowników małych (mikro), czasami nazywanych również przekaźnikami inteligentnymi lub programowalnymi. Wyposażony jest w komunikację Ethernet, wbudowany Webserver i moduł GSM/GPRS do zdalnej komunikacji przez sieć komórkową [8]. Najistotniejszymi cechami funkcjonalnymi, dla których wybrano ten model była możliwość programowania językiem schematów blokowych, który jest zbliżony do programu Matlab-Simulink oraz możliwość zastosowania w programie bloków funkcyjnych regulatora PI (proporcjonalno-całkującego) [9].

Konfigurację w/w sterownika z panelem HMI przedstawiono na rysunku 1. Graficzny panel HMI pozwala na dotykową obsługę systemu sterowania w tym: wybór programu spalania, zmiana wybranych parametrów (nastaw) dla programu, obserwację charakterystyk temperaturowych na wykresach rejestrowanych jako trendy bieżące i historyczne.



Rys. 1. Sterownik Logo 8 w konfiguracji z panelem HMI

Na rysunku 2 zamieszczono zdjęcie zabudowy systemu sterowania PLC w rozdzielnicy z dodatkowymi modułami: zasilacza, wejść/wyjść cyfrowych i analogowych oraz komunikacji sieciowej Ethernet. Zadaniem komunikacji Ethernet jest przesyłanie sygnałów pomiędzy sterownikiem PLC a panelem graficznym oraz transmisja sygnałów pomiarowych i sterujących do komputera rejestrującego te wielkości w pamięci.



Rys. 2. Rozdzielnica z sterownikiem Logo

Program sterujący piecem indukcyjnym

Program sterujący spalaniem próbek biomasy został opracowany w języku FBD (Function Block Diagram) [10,11]. Cechami charakterystycznymi tego języka są: graficzna postać programu oraz reprezentacja algorytmu programu w postaci bloków funkcjonalnych. Najważniejsze funkcje stanowią wyrażenia algebry Boola. Bloki specjalne pozwalają realizować złożone zadania determinowane czasem, wyrażeniami arytmetycznymi itp.. Istnieje możliwość zmiany funkcjonowania bloków poprzez ustawianie ich parametrów. Przepływ sygnału realizowany jest liniami (szynami). Specjalny moduł symulacji pozwala sprawdzić logikę działania programu, dodatkowo sterowniki Siemens-Logo posiadają rozbudowaną możliwość weryfikacji online na działającym obiekcie. Często występują takie sytuacje, kiedy w symulacji na komputerze program działa poprawnie, natomiast we współpracy z obiektem występują problemy. W dużej mierze może to wynikać z tego, że sterownik wykonuje program szybciej

(jest systemem czasu rzeczywistego RTC – real-time computing) niż komputer.

Program sterujący celem lepszej przejrzystości podzielono na trzy części (podprogramy):

- spalanie poprzez nagrzewanie pieca do temperatury 800°C z następującą dynamiką wzrostu temperatury (wybieraną przyciskiem na pulpicie sterowniczym): 10°C/min, 20°C/min, 30°C/min, 40°C/min, 50°C/min (rys. 3);
- spalanie wg algorytmu z sekwencją dwukrotnego przetrzymywania w zadanej temperaturze, który przedstawia rysunek 4;
- system zabezpieczeń systemu sterowania przed nielogicznym użytkowaniem, m.in. jednoczesnym wybraniem kilku wersji programów jednocześnie, alarmowanie o kluczowych stanach awaryjnych oraz występowaniu określonych stanów jego stanów (rys. 5).

Działanie pierwszego z programów rozpoczyna uruchomienie przyciskiem start (I1) całego systemu sterowania. Następnie należy wybrać wariant programu: przycisk I9 – sterowanie wg algorytmu sekwencji, przycisk I8 – sterowanie z wybraną dynamiką wzrostu temperatury. Jeżeli wybrany zostanie I8 to kolejnym krokiem jest załączenie dynamiki wzrostu odpowiednim przyciskiem od I3 do I7. Przycisk I2 pozwala zresetować układ sterowania. Sterowanie dynamiką wzrostu temperatury uzyskano poprzez zaprogramowanie efektu całkowania sygnału sterującego. Opracowano pięć wariantów tempa wzrostu tej wielkości fizycznej, poprzez krokowe podnoszenie wartości zadanej dla regulatora PID. Tempem wzrostu sterują bloki czasowe widoczne na rysunku 3 jako: B003, B009, B013, B018 i B024 (różnią się nastawą timera). Każdy zakończony cykl resetuje zegar i zwiększa stan licznika odpowiednio B002, B011, B016, B021 oraz B027. Wyjście Q1 sygnalizuje zakończenie pracy wybranego programu. Przedstawiony na rysunku 4 algorytm programu, prowadzi spalanie biomasy dwuetapowo z sekwencjami dwugodzinnego przetrzymywania w zadanej temperaturze [12]. W każdym z etapów prowadzony jest również liniowy wzrost temperatury do wartości zadanej. Koniec programu sygnalizowany jest lampką podłączoną do wyjścia Q3.

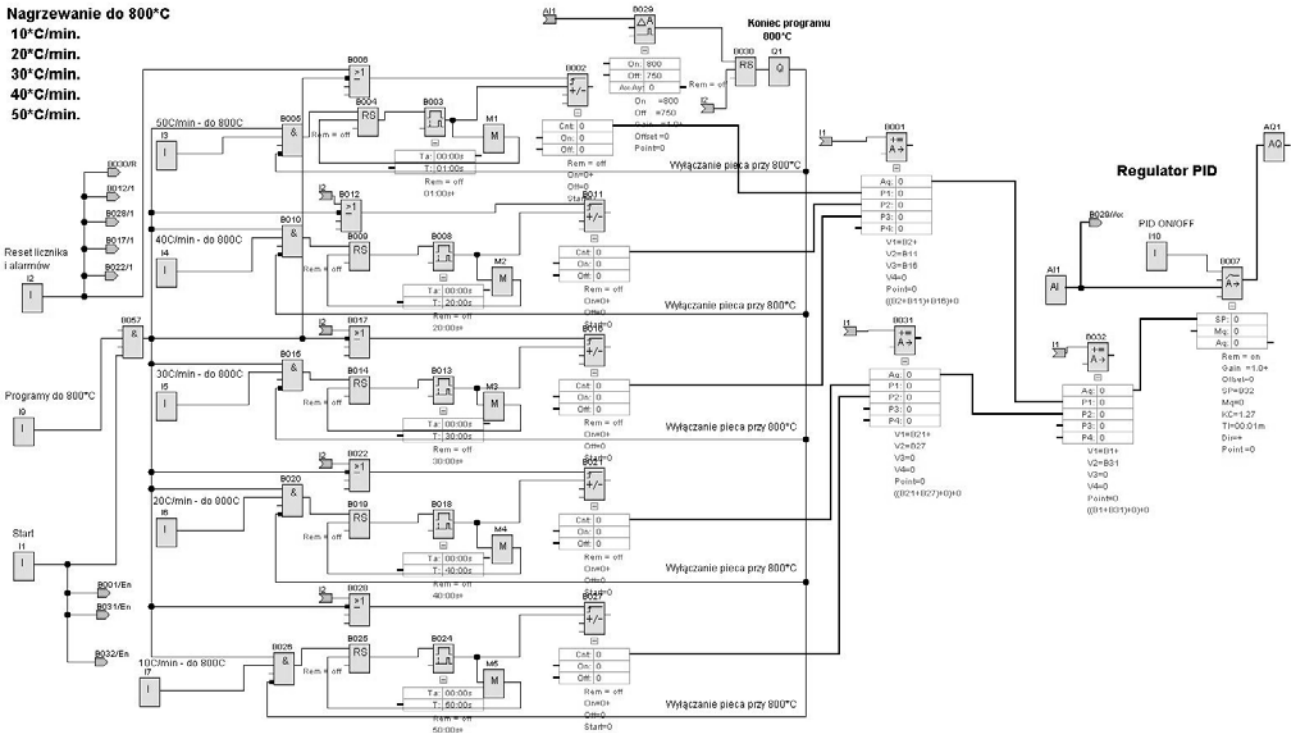
Wszystkie programy współpracują z regulatorem PID odpowiedzialnym za stabilizację temperatury w piecu indukcyjnym. Regulator ten odpowiada za utrzymywanie temperatury spalania próbki jak najbliższej wartości zadanej. Sygnał wyjściowy (sterujący) – wystawiany na wyjście tranzystorowe (cyfrowe) załącza i wyłącza cyklicznie cewkę indukcyjną stanowiącą element wykonawczy pieca.

Poprawne zestrojenie regulatora PID pozwalało uzyskać efekt liniowego wzrostu temperatury spalania biomasy zgodny z wymaganiami normy.

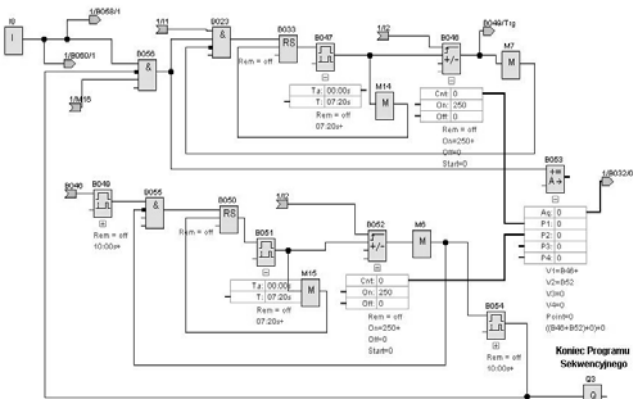
Ostatnim elementem programu jest system zabezpieczeń, przed przypadkowym wybraniem dwóch i więcej programów jednocześnie (rys. 5). Zrealizowano go jako układ kombinacyjny składający się z bramek logicznych NOR i AND, widoczne są również negacje sygnałów wejściowych reprezentowane jako kropki. Do programu wykorzystano również rejestry pamięci M informujące o wybranym algorytmie programu, np. wybranie przyciskiem I3 programu z dynamiką spalania 50°C/min zostaje zapisane do rejestru pamięci M9.

Jakikolwiek błąd jest sygnalizowany poprzez wystawienie alarmu na wyjście Q2. Do wyjścia podłączone są lampka oraz buzzer dźwiękowy. Również brak wybrania programu jest sygnalizowany alarmem. Reset alarmu jak również przywrócenie ustawień początkowych jest realizowane przyciskiem podłączonym do wejścia I2.

Nagrzewanie do 800°C
 10°C/min.
 20°C/min.
 30°C/min.
 40°C/min.
 50°C/min.

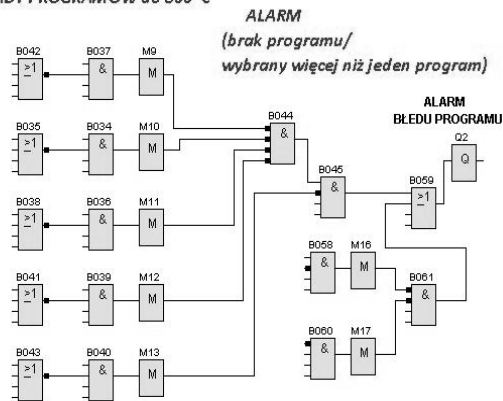


Rys. 3. Program sterujący spalaniem biomasy z obieralną dynamiką wzrostu temperatury



Rys. 4. Program sterujący spalaniem biomasy wg algorytmu sekwencyjnego

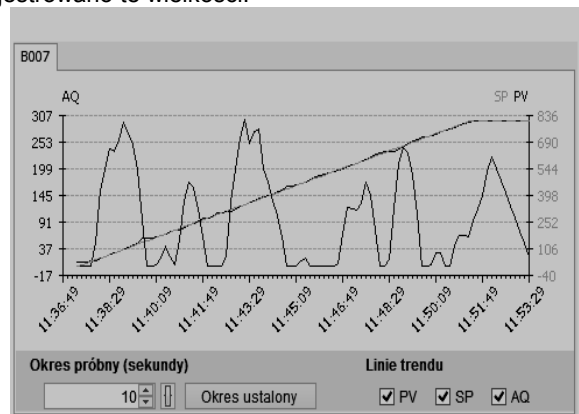
BLOKADY PROGRAMÓW do 800°C



Rys. 5. Programowy system zabezpieczeń

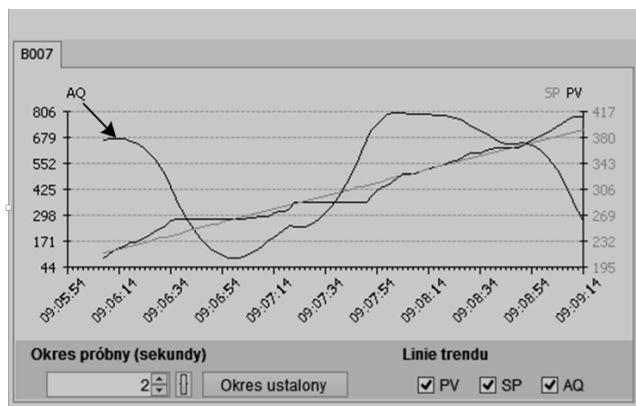
Wyniki testów systemu sterowania piecem indukcyjnym przedstawiono na wykresach. Rysunek 6 obrazuje pełne

spalanie próbki biomasy, na wykresie zamieszczono 3 trendy: SP (Set Point) – wartość zadana (oczekiwana), stanowiącą liniową charakterystykę wzrostu temperatury, wielkość PV (Proces Value) jest sygnałem z czujnika temperatury trafiającym do regulatora celem porównania z wartością zadaną, AQ (Analog Output) odpowiada sygnałowi sterującemu piecem. Zakres tej wielkości zawiera się pomiędzy 0 a 1024 (odpowiada 10-cio bitowemu przetwornikowi analogowo-cyfrowemu), gdzie im większa wartość liczbowa, tym większy jest sygnał sterujący odpowiedzialny za zwiększenie intensywności grzania pieca indukcyjnego. Proces spalania próbki prowadzony jest do uzyskania 800°C, następnie regulator wyłącza sygnał sterujący piecem indukcyjnym, można to zaobserwować na wykresie (pozioma linia trendu SP i PV). Ponieważ proces spalania próbki przebiega stosunkowo wolno, stąd dobrze zestrojony regulator w większości przypadków bardzo dobrze radził sobie z utrzymywaniem zmiennej procesowej PV blisko wartości zadanej SP. Dla przeprowadzonych prób z mniejszą dynamiką wzrostu, jeszcze bliżej siebie rejestrowano te wielkości.



Rys. 6. Charakterystyka funkcjonowania układu serwowania dla programu spalania próbki z dynamiką 50°C/min

Przeprowadzono kilkanaście prób układu sterowania dla różnych wariantów nastaw regulatora PID, w których otrzymano maksymalny błąd regulacji wynoszący 5%. Występowanie tego błędu szczególnie dobrze widoczne jest na rysunku 7, gdzie trend SP i PV bardzo są od siebie oddalone. Można również zaobserwować szybką reakcję regulatora PID, który w dwóch widocznych przypadkach na początku i końcu wykresu zmniejszał sygnał sterujący nie dopuszczając do nadmiernego wzrostu temperatury. Natomiast w środkowej części sygnał sterujący intensywnie rośnie z uwagi na mniejszą wartość temperatury spalania od wartości zadanej. Należy zaznaczyć, że duże znaczenie ma odpowiednie dobranie parametrów tego regulatora. W prowadzonych badaniach wybrano kompromis pomiędzy szybkością reakcji i wielkością błędu regulacji. Dla takich ustawień uzyskano błąd regulacji pomiędzy 2-3%.



Rys. 6. Charakterystyka funkcjonowania układu sterowania z widocznym błędem regulacji

Podsumowanie

Przeprowadzona w warunkach laboratoryjnych symulacja logiki programu potwierdziła jego poprawne funkcjonowanie. System zabezpieczeń poprawnie blokuje możliwość przypadkowych załączeń dwóch i więcej programów równocześnie. Również po starannym zestrojeniu regulatora PID z obiektem uzyskano pożądany efekt jakości jego pracy, którego mierzalną informacją był względny błąd maksymalny wynoszący 5%, a przeciętnie nie przekraczał 3%. Na podstawie przeprowadzonej analizy przebiegu regulacji temperatury stwierdzono, iż zaproponowany układ sterowania dla pieca indukcyjnego do oznaczania topliwosci popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową działa poprawnie.

Autorzy: dr inż. Marcin Tomasik, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Marcin.Tomasik@ur.krakow.pl; dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Stanislaw.Lis@ur.krakow.pl; dr inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Krzysztof.Necka@ur.krakow.pl; dr inż. Tomasz Drózdź, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Tomasz.Drozdz@office.urk.edu.pl; dr inż. Piotr Nawara, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: rtawara@cyf-kr.edu.pl; dr hab. inż. Paweł Kielbasa, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Pawel.Kielbasa@ur.krakow.pl; dr inż. Marek Ostafin, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, E-mail: m.ostafin@ur.krakow.pl; dr inż. Maciej Oziębłowski, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Nauk o Żywności, ul. J. Chelmońskiego 37, 51-630 Wrocław, E-mail: Maciej.Oziembowski@up.wroc.pl

LITERATURA

- [1] Kalembasa D. Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. *Acta Agrophysica*, 4, (2006) nr 7. 909-914
- [2] Gąsiorowski A., Posytek Z., Drózdź T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwosci popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, (2015), 144-148
- [3] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczenie topliwosci popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową
- [4] Lis S., Tomasik M., Nęcka K., Drózdź T., Nawara P., Wrona P., Oziębłowski M. Konstrukcja i analiza modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12, (2015), 147-150
- [5] Mrozek B., Mrozek Z.: MATLAB i Simulink. Gliwice, Wyd. HELION, (2004)
- [6] Kula K. Automatyczne strojenie regulatora PID w układzie online na podstawie identyfikacji metodą przekąźnikową. *Zeszyty naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*. 62, (2009), nr 12, 37-50
- [7] Wójcicki S., Rutkowski T. Projekt i budowa uniwersalnego sterownika programowalnego. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 2, (2013), 436-442
- [8] Bogusz J. Programowanie sterownika Siemens Logo! (1). *Elektronika Praktyczna*. 4 (2011), 124-127
- [9] Ziębiński A., Glinianowicz M., Lachowski G. Implementacja regulatora PID w strukturze FPGA. *Pomiary Automatyka Kontrola*. 54, (2008), 523-525
- [10] Juszka H., Tomasik M., Lis S. Sterowanie mikroprocesorowe procesem zadawania paszy dla zwierząt. *Inżynieria Rolnicza*. 95, (2007), nr 7, 53-60
- [11] Oprędkiewicz K., Porównanie języków programowania. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 12, (2006), 5-9.
- [12] Franczok K. Metoda modelowania procesów sekwencyjnych i współbieżnych w środowisku sterowników PLC. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 1, (2014), 98-104