

## Analiza wpływu sygnału zakłócającego na jakość klasycznego i neuronowo-rozmytego sterowania piecem indukcyjnym

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono metodę opracowania modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym z wykorzystaniem symulacji komputerowej w programie MATLAB®-Simulink. Zastosowano algorytmy regulatorów PID oraz neuronowo-rozmytego (model Takagi-Sugeno). Istotę działania modelu układu sterowania zilustrowano na schematach blokowych. Dokonano oceny jakości sterowania z wykorzystaniem wskaźników całkowitych. Analizowano wyniki symulacji komputerowej modelu układu sterowania.

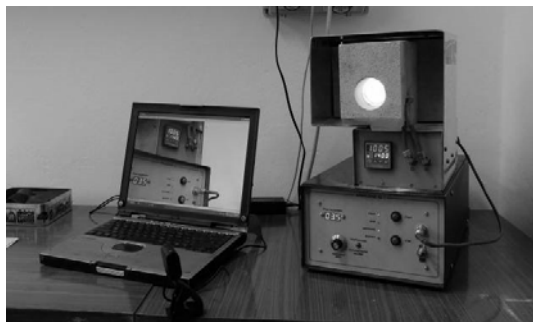
**Abstract.** The paper presents a method of development of a simulation model of the induction furnace control system, using a computer simulation in MATLAB®-Simulink program. Algorithms controls PID and neuro-fuzzy (Takagi-Sugeno model) were used. The essence of the model of the control system is illustrated in the block diagrams. The quality of control was evaluated using integral indicators. Results of the computer simulation model of the control system were analyzed. (**Analysis of the impact of the interference signal on the quality of induction furnace control**)

**Słowa kluczowe:** piec indukcyjny, układ regulacji, model symulacyjny.

**Keywords:** induction furnace, control system, simulation model.

### Wprowadzenie

W energetyce wzrasta zastosowanie biomasy, która dostępna jest w postaci pelletu lub brykietu [1]. Ważnym parametrem związanym z procesem spalania paliw związanym z prawidłowym spalaniem w kotłach jest temperatura płynięcia popiołu. Nieprawidłowej jej dobranej w zależności od temperatury spalania w kotle powoduje stopienie popiołu i zalanie ruszta. W celu utrzymania prawidłowych warunków eksploatacji kotła, zachodzi konieczność indywidualnego określenia temperatury płynięcia popiołu dla poszczególnych partii biomasy przeznaczonej do spalania. Możliwe jest tu zastosowanie pieca indukcyjnego, który pozwoli na oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową zgodnie z normą [2]. Jego widok ogólny przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Piec indukcyjny do oznaczania topliwości popiołu z biopaliw stałych

Istota działania tego urządzenia bazuje na wykorzystaniu zjawiska rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego. Podstawowym elementem konstrukcji pieca jest kilkunastojowy wzbudnik, który kumuluje energię pola elektromagnetycznego w przewodzącej (wymiennej) rurze grafitowej. Dzięki wydzielaniu przez grafit w czasie procesu nagrzewania tlenku i dwutlenku węgla we wnętrzu rury powstaje atmosfera neutralna. Urządzenie zasilane jest energią elektryczną prądu przemiennego 230 V o średnim poborze mocy [3, 4, 5]. Dla dostosowania parametrów pracy pieca do wytycznych, zawartych w dokumentach normatywnych konieczne jest wyposażenie go w poprawnie skonfigurowany system sterowania. Podjęto zatem badania

zmierzające do określenia podstawowych założeń dla projektu takiego systemu. W ramach tych działań na podstawie charakterystyki dynamicznej pieca zdefiniowano transmitancyjny model symulacyjny obiektu. Na jego bazie w programie Matlab-Simulink sformułowano model układu sterowania z predyktorem Smitha. Analizowano jego działanie w konfiguracjach z regulatorami, klasycznym PID i neuronowo-rozmytym FLC. W celu oceny jakości sterowania wymienionych struktur przeprowadzono symulację komputerową z uwzględnieniem obecności sygnału zakłócającego o przebiegu sinusoidalnym. Do oceny jakości wykorzystano wskaźniki całkowite.

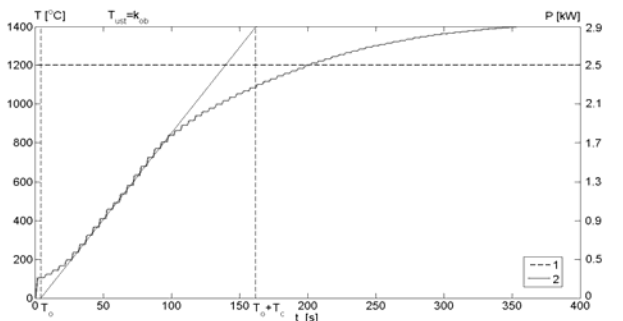
Przeprowadzono analizę, z wykorzystaniem modelowania komputerowego w środowisku Matlab®-Simulink, wpływu zakłóceń na proces sterowania piecem indukcyjnym do oznaczania topliwości popiołu z biopaliw stałych w wysokiej temperaturze metodą rurową. Przedstawiony model obiektu regulacji opracowanego na podstawie charakterystyki skokowej, sformułowano model symulacyjnego układu regulacji w konfiguracji z regulatorami: PID i neuronowo-rozmytym FLC, symulację komputerową procesu sterowania z uwzględnieniem obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego, ocenę jakości regulacji na podstawie wskaźników całkowitych.

### Założenia dla modelu układu sterowania piecem indukcyjnym

Na podstawie charakterystyki skokowej pieca indukcyjnego zilustrowanej na rysunku 2 sformułowano transmitancyjny model symulacyjny obiektu regulacji. Wyrażono go zależnością 1.

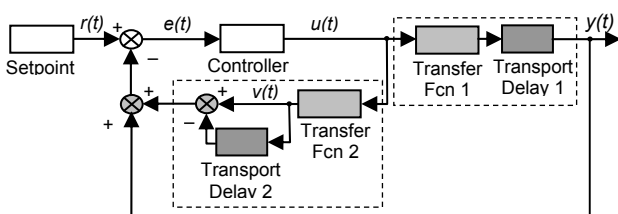
Na bazie zależności (1) opracowano model symulacyjny układu sterowania z predyktorem Smitha. Jego schemat blokowy zilustrowano na rysunku 3 [6].

Znaczenie występujących na schemacie symboli jest następujące: *Setpoint* – blok wartości zadanej, *Controller* – transmitancja regulatora (PID lub neuronowo-rozmytego FLC), *Transfer Fcn 1* – transmitancja obiektu, *Transport Delay 1* – opóźnienie transportowe, *r(t)* – sygnał wartości zadanej, *e(t)* – błąd regulacji, *u(t)* – sygnał sterujący, *y(t)* – sygnał wyjściowy modelu obiektu, *Transfer Fcn 2* – estymata transmitancji obiektu w predyktorze, *Transport Delay 2* – estymata opóźnienia transportowego w predyktorze, *v(t)* – sygnał wyjściowy estymaty transmitancji obiektu w predyktorze.



Rys.2. Charakterystyka skokowa obiektu sterowania: 1 – wymuszenie skokowe, moc  $P$  [kW]; 2 – odpowiedź obiektu, temperatura  $T$  [°C];  $t$  – czas [s];  $T_{ust}$  – temperatura po ustabilizowaniu [°C];  $k_{ob}$  – współczynnik wzmocnienia statycznego obiektu;  $T_c$  – stała czasowa [s];  $T_o$  – opóźnienie transportowe [s]

$$(1) \quad G(s) = 0,56 \frac{1}{100s + 1} e^{-14s}$$

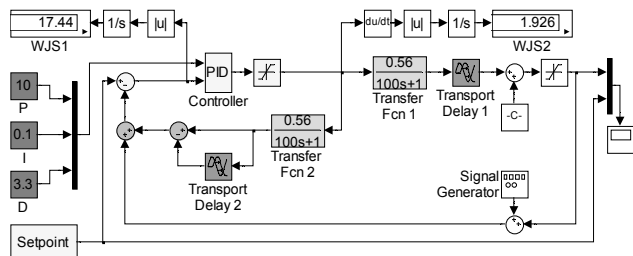


Rys.3. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania z predyktorem Smitha

Zilustrowany schematem blokowym model (rys.3) zaimplementowano w środowisku Matlab-Simulink. Powstały dwie jego wersje tj. z regulatorem PID i alternatywna z regulatorem neuronowo-rozmytym FLC bazującym na modelu Takagi-Sugeno.

### Model układu sterowania z regulatorem PID

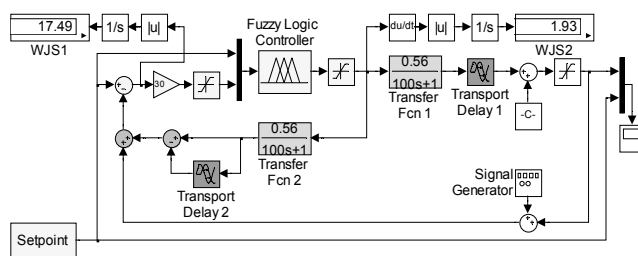
Model układu regulacji z regulatorem PID po zapisaniu zgodnie z nomenklaturą Simulink-a przyjął postać schematu blokowego przedstawionego na rysunku 4. Funkcje przedstawionych na schemacie (rys.4) bloków są analogiczne jak w przypadku rysunku 3. Znaczenie pozostałych elementów (nie występujących na rys.3) jest następujące: blok *Signal Generator* odpowiada za wytworzenie sygnału zakłócającego; bloki *P*, *I* oraz *D* reprezentują wartości nastaw regulatora; *WJS1* i *WJS2*, to całkowe wskaźniki jakości sterowania.



Rys.4. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania z regulatorem PID w programie Matlab-Simulink. Nastawy dla regulatora PID dobrano podczas symulacji komputerowej.

### Model układu sterowania z regulatorem neuronowo-rozmytym FLC

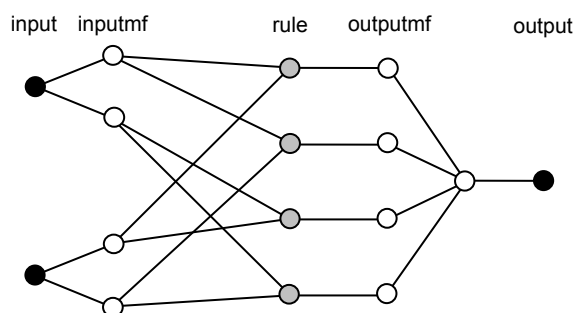
Zaimplementowany w Simulink-u model układu regulacji z regulatorem neuronowo-rozmytym FLC zilustrowano na rysunku 5.



Rys.5. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania z regulatorem FLC w programie Matlab-Simulink

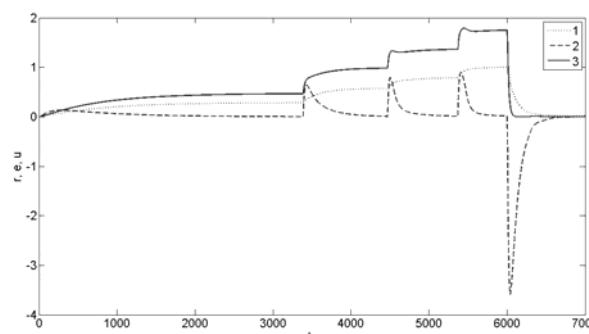
Zadania pełnione przez przedstawione na schemacie (rys.5) bloki funkcjonalne są analogiczne jak w przypadku rysunków 3, 4.

Nastawy dla regulatora FLC dobrano z wykorzystaniem systemu ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Umożliwia on poddanie regulatora strojeniu przy wykorzystaniu adaptacyjnej sieci neuronowej. Strojenie polegało na zmodyfikowaniu parametrów funkcji przynależności zmiennych wejściowych, utworzeniu bazy reguł i obliczeniu parametrów funkcji zależności. Schemat zastosowanej sieci neuronowej zilustrowano na rysunku 6.



Rys. 6. Adaptacyjna sieć neuronowa

Widoczne kolejne warstwy struktury pełnią następujące funkcje (rys.6): warstwa pierwsza (input) oznacza wartości wejściowe, warstwa druga (inputmf) jest odpowiedzialna za fuzyfikację (rozmycie) wartości wejściowej, warstwa trzecia (rule) reprezentuje reguły. Kolejne warstwy (outputmf i output) odpowiadają za defuzyfikację (wyostrenie) [7, 8, 9].



Rys.7. Dane uczące: 1 – wartość zadana  $r$ , 2 – uchyb regulacji  $e$ , 3 – sygnał sterujący  $u$ ,  $t$  – czas

Przyjęto strukturę regulatora w postaci: 2 terminy typu *trimf* na uniwersum pierwszej i drugiej zmiennej wejściowej oraz zależność między wejściem a wyjściem typu *constant*. Jako dane uczące zastosowano ciągi wartości zmiennych zilustrowanych na rysunku 7.

Były to 2 wielkości wejściowe regulatora – wartość zdana  $r(t)$  i uchyb regulacji  $e(t)$  (powiększony trzydziestokrotnie) oraz wielkość wyjściowa w postaci sygnału sterującego  $u(t)$  (rys.7). Przebiegi ukształtowano na

podstawie analizy wyników symulacji komputerowych, w taki sposób aby odzwierciedlały relacje między wejściem i wyjściem regulatora zapewniając prawidłowy przebieg procesu sterowania.

### Ocena jakości sterowania

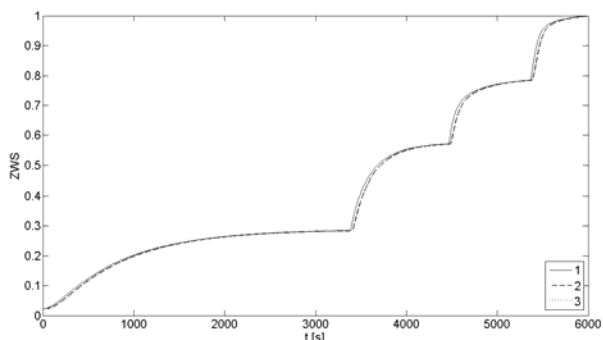
Zamodelowany układ sterowania piecem indukcyjnym poddano analizie. Określono wpływ sygnału zakłócającego na jakość sterowania przy zastosowaniu rozpatrywanych regulatorów, PID i neuronowo-rozmytego FLC. Jako kryteria oceny jakości sterowania przyjęto wskaźniki całkowite [10, 11, 12]:

$$(2) \quad WJS1 = \int_{t_p}^{t_f} |e| dt$$

$$(3) \quad WJS2 = \int_{t_p}^{t_f} \left| \frac{du}{dt} \right| dt$$

gdzie:  $WJS1$  – całka z wartości bezwzględnej uchybu,  $WJS2$  – całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego,  $e$  – uchyb w układzie sterowania,  $\frac{du}{dt}$  – pochodna sygnału sterującego,  $t$  – czas,  $t_p$  – początek interwału czasowego sterowania,  $t_f$  – koniec interwału czasowego sterowania.

W ramach etapu wstępnego badań symulacyjnych analizie poddano działanie układu bez obecności zakłóceń. Na rysunku 8 zilustrowano wykresem znormalizowane wartości symulacji komputerowej (ZWS) procesu sterowania piecem indukcyjnym przy zadanej wartości temperatury, dla obu rozpatrywanych regulatorów, bez obecności wymuszonego sygnału zakłócającego.



Rys.8. Wyniki symulacji dla układu sterowania bez obecności sygnału zakłócającego: 1 – wartość zadana temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatora PID, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatora FLC

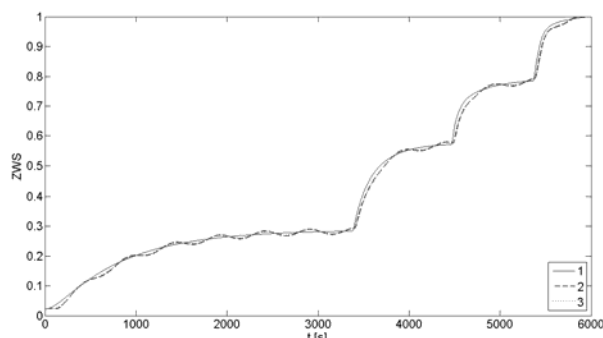
Na podstawie analizy przedstawionych na wykresie sygnałów wyjściowych układu regulacji (krzywe 2 i 3) należy stwierdzić, iż nastawy obu regulatorów dobrano poprawnie – sygnały są zgodne z wartością zadaną temperatury reprezentowaną przez linię 1.

Analizując przebiegi 2 i 3 można zaobserwować, iż algorytmy obu regulatorów pozwalają na uzyskanie zbliżonej dokładności sterowania. Między wskaźnikami  $WJS1$  i  $WJS2$  obu regulatorów nie odnotowano istotnych różnic. Wartości  $WJS1$  wynosiły odpowiednio: 17,44 dla regulatora PID i 17,49 dla regulatora FLC. Natomiast wartości  $WJS2$  dla obu regulatorów były równe 1,93.

W dalszej kolejności przeprowadzono symulację sterowania z uwzględnieniem wytwarzanego przez blok *Signal Generator* (rysunki 4, 5) sinusoidalnego sygnału zakłócającego o częstotliwości  $f=0,002$  Hz i amplitudach: 1

%, 3 % i 5 % maksymalnej amplitudy sygnału zadanego. Znormalizowane wyniki symulacji ZWS zilustrowano na rysunkach 9-11. Wartości wskaźników  $WJS1$  i  $WJS2$  przedstawiono w tabelach 1-3.

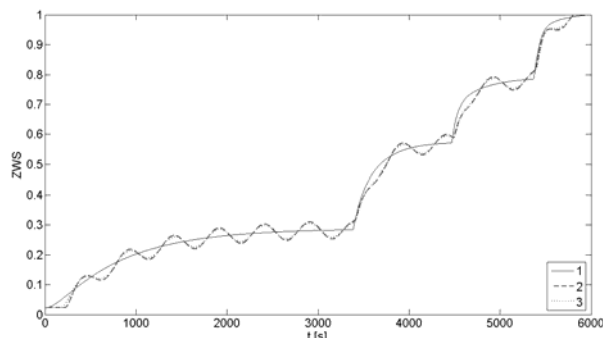
Znaczenie krzywych przedstawionych na rysunkach 8-10 jest następujące: 1 – wartość zadana temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatora PID, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatora FLC.



Rys.9. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 1 %

Tabela 1. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania dla sygnału zakłócającego o amplitudzie 1 %

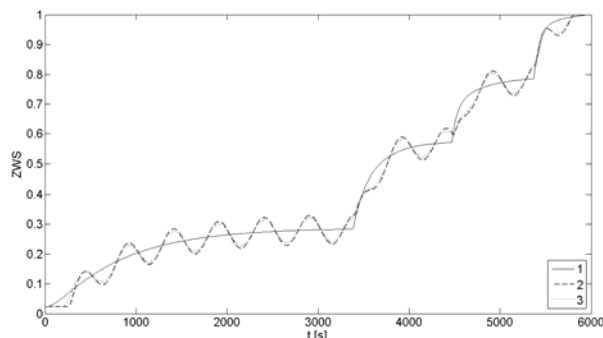
Regulator \ Wskaźnik	PID	FLC
WJS1	20,72	21,94
WJS2	2,66	2,50



Rys.10. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 3 %

Tabela 2. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania dla sygnału zakłócającego o amplitudzie 3 %

Regulator \ Wskaźnik	PID	FLC
WJS1	37,57	41,25
WJS2	4,73	4,20



Rys.11. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 5 %

Tabela 3. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania dla sygnału zakłócającego o amplitudzie 5%

Regulator	PID	FLC
WJS1	57,53	64,37
WJS2	6,96	6,02

Analizując przebiegi sygnałów wyjściowych układu sterowania (rysunki 9-11) oraz wartości całkowych wskaźników jakości przedstawione w tabelach 1-3, stwierdzono, że wraz ze wzrostem amplitudy sinusoidalnego sygnału zakłócającego, wzrastają wartości całkowych wskaźników jakości sterowania. Należy podkreślić, że im niższa jest wartość wskaźnik *WJS2*, tym jakość sterowania jest lepsza. Z kolei niższa wartość wskaźnika *WJS1* oznacza mniejszą dynamikę sygnału sterującego. Całkowite wskaźniki jakości dla analizowanych regulatorów odznaczają się zbliżonymi wartościami. Na tej podstawie, należy uznać, że oba analizowane regulatory PID i FLC zapewniają akceptowalną jakość sterowania. W związku z tym, iż nie odnotowano istotnych różnic w jakości sterowania między badanymi regulatorami należy do dalszego wykorzystania w pracach projektowych wskazać regulator PID, którego algorytm jest mniej złożony od regulatora FLC i w związku z tym łatwiejszy w implementacji.

### Wnioski

1. Przeprowadzone badania symulacyjne wskazują, iż możliwe jest sterowanie temperaturą pieca indukcyjnego przy zastosowaniu układu regulacji z regulatorami PID lub FLC.
2. Wskaźniki oceny jakości sterowania dla układów regulacji z regulatorami PID i FLC przyjęły zbliżone wartości, na tej podstawie należy uznać, że wymienione regulatory zapewniają porównywalną jakość sterowania.
3. Ze względu na porównywalną jakość sterowania w przypadku układów z regulatorem PID i FLC, integrując prototyp układu sterowania piecem indukcyjnym, należy zastosować regulator PID.
4. Przeprowadzone badania stanowią etap w rozwoju projektu układu sterowania piecem indukcyjnym do określenia temperatury płynięcia popiołu.

**Autorzy:** 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](mailto:Stanislaw.Lis@ur.krakow.pl); 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](mailto:Marcin.Tomasik@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](mailto:Krzysztof.Necka@ur.krakow.pl); dr inż. Maciej OZIEMBLÓWSKI, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,

Wydział Nauk o Żywności, E-mail: [Maciej.Oziembowski@up.wroc.pl](mailto:Maciej.Oziembowski@up.wroc.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](mailto: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](mailto:rtawara@cyf-kr.edu.pl); dr hab. inż. Paweł KIEŁBASA, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, E-mail: [Pawel.Kielbasa@ur.krakow.pl](mailto:Pawel.Kielbasa@ur.krakow.pl), dr inż. Marek OSTAFIN, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Mikrobiologii, E-mail: [mostafin@ar.krakow.pl](mailto:mostafin@ar.krakow.pl)

### LITERATURA

- [1] Kalembasa D., Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. *Acta Agrophysica*, ISSN 1243-4125, (2006), nr 7(4), s. 909-914
- [2] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową
- [3] Gąsiorowski A., Posytek Z., Drózdź T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 1 (2015), 144-148
- [4] Lis S., Tomasik M., Nęcka K., Drózdź T., Nawara P., Wrona P., Oziembłowski M. Konstrukcja i analiza modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym. *Przegląd Elektrotechniczny*. (2015) nr 12, s. 147-150
- [5] Nęcka K., Lis S., Drózdź T., Nawara P., Wrona P., Oziembłowski M. Charakterystyka prototypowego stanowiska laboratoryjnego do badania topliwości popiołu metodą rurową. *Przegląd Elektrotechniczny*. (2016) nr 1, s. 109-112
- [6] Tarnowski W., Projektowanie układów regulacji automatycznej. Ciągłych z liniowymi korektorami ze wspomaganiami za pomocą Matlab'a. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. (2008) ISSN 0239-7129, Koszalin
- [7] Mroczek B. Projektowanie regulatorów rozmytych w środowisku MATLAB-Simulink. *Pomiary, Automatyka, Robotyka*. (2006) nr 11, s. 5 – 13, Warszawa.
- [8] Wachowicz E. Zastosowania teorii zbiorów rozmytych do modelowania procesów technologicznych. *Inżynieria Rolnicza*. (2002) nr 7 (40), s. 5 – 17, Warszawa.
- [9] Chmielewski W., Z.. Sterowanie rozmyte w inżynierii Środowiska. Wyd. Politechniki Krakowskiej. (2013) ISBN 978-83-7242-693-2, Kraków.
- [10] Śmierciak P., Ziółkowski E., Comparison of Energy Consumption in the Classical (PID) and Fuzzy Control of Foundry Resistance Furnace. *Archives of foundry engineering*, ISSN 1897-3310, 3 (2012), vol. 12, s. 129-132
- [11] Śmierciak P., Ziółkowski E., Kryteria optymalizacji w systemach sterowania rozmytego piecami odlewniczymi. *Archives of foundry engineering*, ISSN 1897-3310, 2 (2014), vol. 14, s. 95-100
- [12] Śmierciak P., Ziółkowski E., Wpływ wybranych parametrów zakłóceń na jakość klasycznego i rozmytego sterowania piecem oporowym. *Archives of foundry engineering*, ISSN 1897-3310, 4 (2014), vol. 14, s. 123-126