

## Zastosowanie regulatora PI o zmodyfikowanej strukturze w procesie 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 pPI. Istotę działania modelu układu sterowania zilustrowano na schematach blokowych. Dokonano oceny jakości sterowania z wykorzystaniem wskaźników całkowych. Poddano analizie 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 pPI 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. (*The use of a PI controller with a modified structure in the induction furnace control process*)

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

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

### Wprowadzenie

Od wielu lat na rynku energii obserwuje się intensyfikację wysiłków ukierunkowanych na wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych w pokryciu zapotrzebowania gospodarki na moc. Niewyczerpanymi rezerwuarami energii odnawialnej są, promieniowanie słoneczne oraz energia wiatru. Wadą tych źródeł energii jest jednak ich rozproszenie, dostępność zróżnicowana terytorialnie i czas występowania nie pokrywający się z okresami zapotrzebowania odbiorców [1,2]. Z wymienionych powodów potencjał wskazanych źródeł nie może być w pełni wykorzystany. W warunkach Polski na uwagę zasługuje produkcja energii poprzez spalanie biomasy. Obecnie udział mocy wytwarzanej w ten sposób w bilansie energii produkowanej ze źródeł odnawialnych wynosi 2,8 TWh [3]. Biomasa najczęściej dostępna jest w postaci pelletu i brykietu [4]. W przypadku tego typu paliwa istotnym parametrem procesu spalania jest temperatura płynięcia popiołu, której przekroczenie powoduje stopienie popiołu i zalanie rusztu w palenisku kotła. Aby nie dopuścić do awarii konieczne jest określenie temperatury płynięcia popiołu dla poszczególnych partii biomasy przeznaczonej do spalania. Możliwe jest zastosowanie do tego celu pieca indukcyjnego i oznaczenie, zgodnie z normą, topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową [5]. Dla dostosowania parametrów pracy pieca do wytycznych, zawartych w dokumencie normatywnym niezbędne jest zaprojektowanie systemu sterowania zapewniającego uwzględnienie indywidualnych cech obiektu sterowania. Podjęto zatem działania zmierzające do określenia podstawowych założeń dla projektu takiego systemu. W ramach nich w programie Matlab®-Simulink sformułowano modele układu sterowania w konfiguracjach z klasycznym regulatorem PID oraz regulatorem PI o zmodyfikowanej strukturze tj. predykcyjnym pPI. Regulator PID przyjęto jako wzorcowy, natomiast pPI stanowił alternatywne rozwiązanie.

### Cel i zakres

Celem pracy była analiza zastosowania algorytmu regulatora pPI w procesie sterowania piecem indukcyjnym służącym do oznaczania topliwości popiołu z biopaliw stałych w wysokiej temperaturze metodą rurową. Zakres pracy obejmował: sformułowanie modelu symulacyjnego układu regulacji z wykorzystaniem

transmitancyjnego opisu obiektu regulacji opracowanego na podstawie charakterystyki skokowej, symulację komputerową procesu sterowania z zastosowaniem klasycznego regulatora PID i regulatora predykcyjnego pPI, ocenę jakości regulacji na podstawie wskaźników całkowych.

### Obiekt sterowania i jego model

Obiekt sterowania stanowił piec indukcyjny do badania topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową. Istota działania tego urządzenia opiera się na wykorzystaniu zjawiska rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego. Nagrzewanie indukcyjne należy do energooszczędnych, przyjaznych dla środowiska, nowoczesnych technik przemysłowych. Podstawowym elementem konstrukcji zastosowanego pieca jest kilkuzwojowy wzbudnik, który kumuluje energię pola elektromagnetycznego w rurze grafitowej. Urządzenie zasilane jest energią elektryczną prądu przemiennego 230 V [6-8]. Jego widok ogólny przedstawiono na rysunku 1.



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

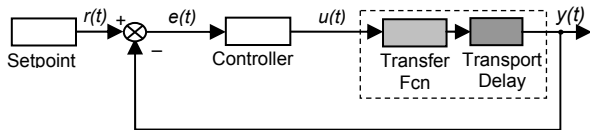
Na podstawie zarejestrowanej charakterystyki dynamicznej pieca sformułowano transmitancyjny model obiektu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem. Wyraża go zależność:

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

gdzie:  $G(s)$  – transmitancja operatorowa,  $s$  – operator Laplace'a,

## Model układu regulacji

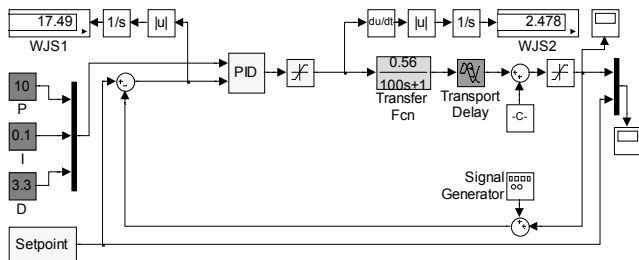
Z wykorzystaniem zależności (1) opisującej obiekt regulacji opracowano model symulacyjny układu sterowania. Jego schemat blokowy zilustrowano na rys. 2.



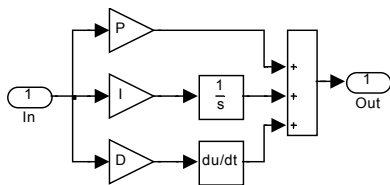
Rys.2. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania

Znaczenie przedstawionych na schemacie bloków funkcjonalnych i symboli jest następujące: *Setpoint* – blok wartości zadanej, *Controller* – blok regulatora, *Transfer Fcn* – transmitancja obiektu regulacji, *Transport Delay* – opóźnienie transportowe,  $r(t)$  – sygnał wartości zadanej,  $e(t)$  – błąd regulacji,  $u(t)$  – sygnał sterujący,  $y(t)$  – sygnał wyjściowy modelu obiektu.

Zilustrowany schematem blokowym model (rys.2) zaimplementowano w środowisku Matlab-Simulink. Powstały dwie wersje, mianowicie z klasycznym regulatorem PID oraz regulatorem PI o zmodyfikowanej strukturze. Schematy blokowe, układu sterowania i regulatora PID w środowisku Matlab-Simulink przedstawiono na rysunkach 3, 4.



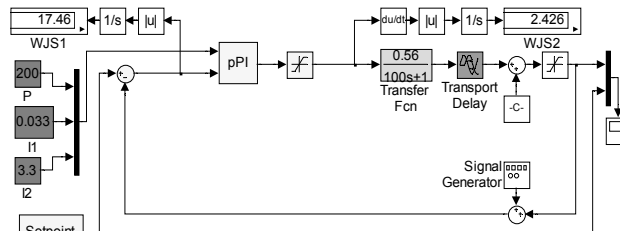
Rys.3. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania z regulatorem PID



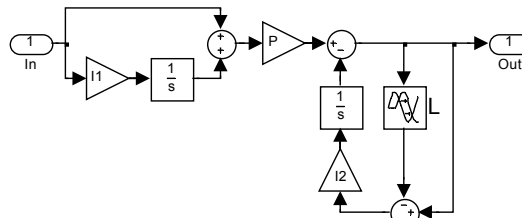
Rys.4. Schemat blokowy klasycznego regulatora PID

Przedstawione na schemacie bloki funkcjonalne (rys.4) reprezentują następujące elementy regulatora: proporcjonalny  $P$ , całkujący  $I$ , różniczkujący  $D$ .

Według literatury przedmiotu, zastosowanie klasycznego regulatora PID, w przypadku obiektów charakteryzujących się występowaniem znacznych opóźnień reakcji na sygnał sterujący, może nie zapewnić odpowiedniej jakości sterowania. Dla podniesienia jakości sterowania w przypadku tego typu obiektów zaleca się implementację systemów wykorzystujących zmodyfikowane struktury regulatora PID. Jednym z rozwiązań tego rodzaju jest regulator predykcyjny pPI, bazujący na predyktorze Smitha, przeznaczony dla układów sterowania obiektami z dużym opóźnieniem stałym [9]. Możliwość zastosowania go w systemie sterowania piecem indukcyjnym poddano analizie w niniejszym opracowaniu. Schematy blokowe, układu sterowania i regulatora pPI w środowisku Matlab-Simulink przedstawiono na rysunkach 5, 6.



Rys.5. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania z regulatorem pPI



Rys.6. Schemat blokowy predykcyjnego regulatora pPI

W strukturze regulatora (rys.6) znajdują się następujące bloki funkcjonalne: proporcjonalny  $P$ , całkujący  $I1$  regulatora PI, całkujący  $I2$  części predykcyjnej, opóźnienia odpowiedzi obiektu na sygnał sterujący  $L$ .

## Ocena jakości sterowania

Jakość sterowania zapewnianą przez zamodelowane układy z regulatorami PID i pPI poddano analizie podczas badań symulacyjnych. Jako kryteria oceny jakości sterowania przyjęto wskaźniki całkowite. Były to,  $WJS1$  – całka z wartości bezwzględnej uchybu (2),  $WJS2$  – całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego (3).

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

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

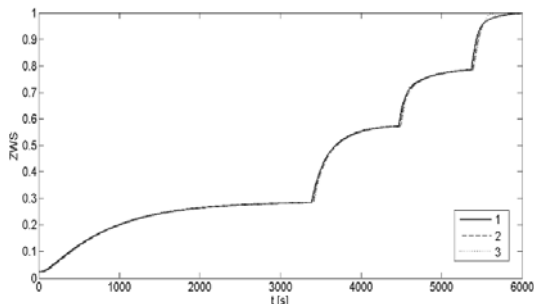
gdzie:  $e$  – uchyb w układzie sterowania,  $\frac{du}{dt}$  – pochodna sygnału sterującego,  $t$  – czas,  $t_p$  – początek interwału czasowego sterowania,  $t_f$  – koniec interwału czasowego sterowania.

$WJS2$  dostarcza informacji na temat dynamiki sygnału sterującego, natomiast wartość wskaźnik  $WJS1$  informuje o jakości sterowania (im wartość ta jest niższa tym jakość sterowania jest lepsza) [10-13].

W ramach badań symulacyjnych analizowano przebiegi *znormalizowanych wartości symulacji* komputerowej (ZWS) procesu sterowania piecem indukcyjnym przy zadanej wartości temperatury, dla obu rozpatrywanych regulatorów. Na przedstawionych poniżej wykresach zilustrowano następujące przebiegi ZWS: 1 – wartość zadaną temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem PID, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania z regulatorem pPI.

## Symulacja komputerowa dla warunków idealnych

Wstępnie analizie poddano działanie układu w warunkach idealnych tj. bez obecności zakłóceń. Uzyskane przebiegi ZWS zilustrowano na rysunku 7. Wartości wskaźników całkowitych zestawiono w tabeli 1.



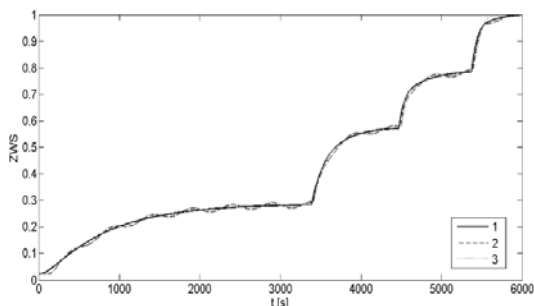
Rys.7. Wyniki symulacji dla układów sterowania – brak zakłóceń

Tabela 1. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania – brak zakłóceń

Regulator \ Wskaźnik	PID	pPI
WJS1	17,49	17,46
WJS2	2,75	2,43

### Symulacja komputerowa w obecności sygnału zakłócającego

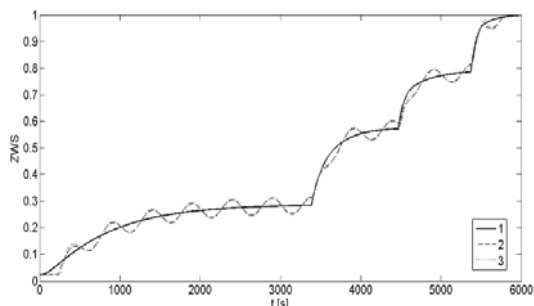
W dalszej kolejności przeprowadzono symulację sterowania z uwzględnieniem, wprowadzonego do pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, sygnału zakłócającego o przebiegach: sinusoidalnym i prostokątnym. Parametry sygnału były następujące – wartość częstotliwości wynosiła 0,002 Hz a amplituda odpowiednio: 1 %, 3 % i 5 % maksymalnej amplitudy sygnału zadanego. Sygnał zakłócający generowano przy wykorzystaniu bloku funkcjonalnego Signal Generator (rys.3, 5).



Rys.8. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 1 %

Tabela 2. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania dla sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 1%

Regulator \ Wskaźnik	PID	pPI
WJS1	20,71	23,39
WJS2	3,56	3,30



Rys.9. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 3 %

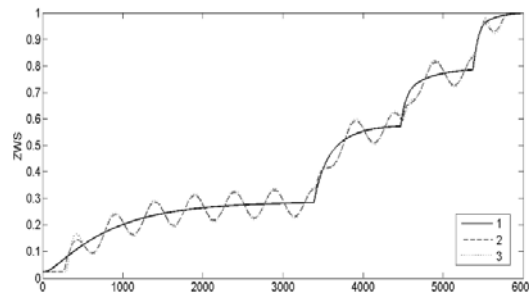
Znormalizowane wyniki symulacji ZWS dla sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego

z zilustrowano na rysunkach 8-10. Wartości wskaźników WJS1 i WJS2 przedstawiono w tabelach 2-4.

Znormalizowane wyniki symulacji ZWS działania układu sterowania w obecności prostokątnego sygnału zakłócającego zilustrowano na rysunkach 11-13. Wartości wskaźników WJS1 i WJS2 przedstawiono w tabelach 5-7.

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

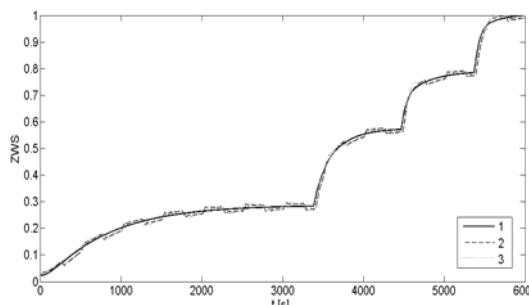
Regulator \ Wskaźnik	PID	pPI
WJS1	40,12	46,30
WJS2	6,18	5,86



Rys.10. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 5 %

Tabela 4. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania dla sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 5%

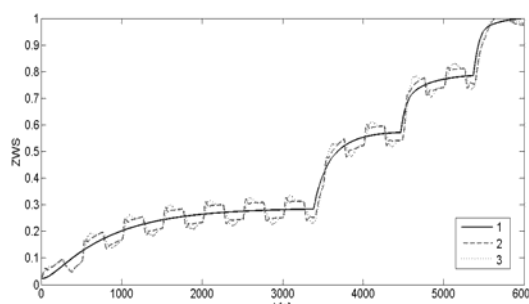
Regulator \ Wskaźnik	PID	pPI
WJS1	61,05	72,18
WJS2	13,52	8,61



Rys.11. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 1 %

Tabela 5. Wartości całkowych wskaźników jakości sterowania dla prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 1%

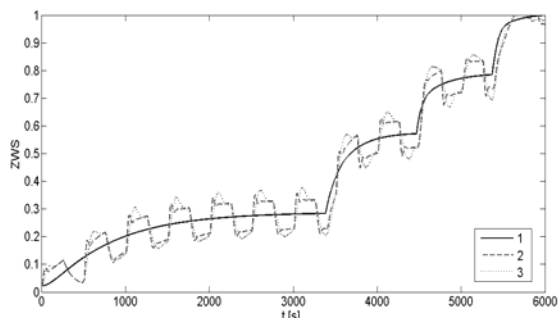
Regulator \ Wskaźnik	PID	pPI
WJS1	29,14	38,69
WJS2	117,20	160,10



Rys.12. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 3 %

Tabela 6. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania dla prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 3%

Regulator \ Wskaźnik	PID	pPI
WJS1	69,06	109,60
WJS2	313,00	365,80



Rys.13. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 5 %

Tabela 7. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania dla prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 5%

Regulator \ Wskaźnik	PID	pPI
WJS1	124,10	195,60
WJS2	268,30	448,90

### Analiza wyników

Analizując przebieg symulacji komputerowej dla sterowania w warunkach idealnych tj. bez obecności sygnału zakłócającego (rys.7) można zaobserwować, że algorytmy badanych regulatorów pozwalają uzyskać zbliżoną dokładność sterowania. W obu przypadkach całkowite wskaźniki jakości *WJS1* i *WJS2* przyjęły porównywalne wartości (tab.1).

Podsumowując natomiast wyniki symulacji dla układu sterowania działającego w obecności sygnału zakłócającego o przebiegach, sinusoidalnym i prostokątnym przedstawione na rysunkach 8-13 i opisane wskaźnikami całkowitymi zestawionymi w tabelach 2-7, należy stwierdzić, że wraz ze wzrostem amplitudy sygnału zakłócającego, maleje jakość sterowania. Należy przy tym zauważyć, iż sygnał zakłócający o przebiegu prostokątnym wpływa znacznie silniej na spadek jakości sterowania niż sygnał o przebiegu sinusoidalnym.

Na podstawie analizy całkowitych wskaźników jakości należy stwierdzić, że lepszy rezultat w zakresie sterowania w obecności sygnału zakłócającego pozwala uzyskać tradycyjny regulator PID.

### Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że wbrew opiniom prezentowanym w literaturze przedmiotu na temat sterowania obiektami o znacznym opóźnieniu reakcji na sygnał sterujący [8], regulator typu pPI nie zapewnia lepszej jakości sterowania od klasycznego regulatora PID. Wskazuje na to analiza całkowitych wskaźników jakości na podstawie, której należy stwierdzić, że lepszy rezultat w zakresie sterowania w obecności sygnału zakłócającego pozwala uzyskać tradycyjny regulator PID.

W wyniku badań symulacyjnych z wykorzystaniem, w zamodelowanych systemach sterowania, algorytmów regulatorów PID oraz pPI, w przypadku braku sygnału zakłócającego uzyskano porównywalne przebiegi dla procesu sterowania.

**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); doc. Ing. Maroš Korenko, PhD. Slovak University of Agriculture in Nitra Department of Quality and Engineering Technologies Department of Quality and Engineering Technologies, e-mail: [korenko@mech.uniag.sk](mailto:korenko@mech.uniag.sk); doc. Ing. Slovak University of Agriculture in Nitra, Faculty of Engineering, Department of Machines and Production Biosystems, Nitra, Slovakia, e-mail: [pavol.findura@uniag.sk](mailto:pavol.findura@uniag.sk)

### LITERATURA

- [1] Korzeniewska, E., Drzymała, A. "Photovoltaic power plants - technical and economic aspects" 2013 Przegląd Elektrotechniczny 89(12), pp. 324-327
- [2] Pawlak, R., Kawczyński, R., Korzeniewska, E., (...), Tomczyk, M., Walczak, M. "Photovoltaic cells of unconventional shapes" 2013 Przegląd Elektrotechniczny 89(7), pp. 288-292
- [3] Nęcka K., Lis S., Drózd T., Oziębłowski M., Kiełbasa P., Tomasik M., Ostafin M., Nawara P. Charakterystyka pracy siłowni fotowoltaicznej w zmiennych warunkach meteorologicznych. Przegląd Elektrotechniczny, (2016) nr. 12, s. 105-108
- [4] Kiełbasa D., Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. *Acta Agrophysica.*, (2006), nr 7(4), s. 909-914
- [5] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową
- [6] Gąsiorowski A., Posytek Z., Drózd T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową, Przegląd Elektrotechniczny, (2015), nr 1, s.144-148
- [7] Lis S., Tomasik M., Nęcka K., Drózd T., Nawara P., Wrona P., Oziębłowski M. Konstrukcja i analiza modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym. Przegląd Elektrotechniczny, (2015) nr 12, s. 147-150
- [8] Nęcka K., Lis S., Drózd T., Nawara P., Wrona P., Oziębłowski M. Charakterystyka prototypowego stanowiska laboratoryjnego do badania topliwości popiołu metodą rurową. Przegląd Elektrotechniczny, (2016) nr 1, s. 109-112
- [9] Gruk W., Habecki S., Piotrowski R., Implementacja niekonwencjonalnych regulatorów PID w sterowniku programowalnym. *Pomiary Automatyka Robotyka*, ISSN 1427-9126, 1 (2017), R. 21, s. 31-39
- [10] Lis S., Tomasik M., Nęcka K., Oziębłowski M., Nawara P., Kiełbasa P., Ostafin M., Drózd T. Analiza wpływu sygnału zakłócającego na jakość sterowania piecem indukcyjnym. Przegląd Elektrotechniczny, (2016) nr 12, s. 89-92.
- [11] Śmierciak P., Ziółkowski E., Kryteria optymalizacji w systemach sterowania rozmytego piecami odlewniczymi. *Archives of foundry engineering*, 2 (2014), vol. 14, s. 95-100
- [12] 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
- [13] 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