



# Porównanie energochłonności klasycznego (PID) i rozmytego sterowania odlewniczym piecem oporowym

E. Ziółkowski<sup>a</sup>, P. Śmierciak

<sup>a</sup> AGH, Wydział Odlewnictwa, Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych,  
Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

\* Kontakt korespondencyjny: e-mail: ez@agh.edu.pl

Otrzymano 16.04.2012; zaakceptowano do druku 02.07.2012

## Streszczenie

Odlewnicze piece oporowe są urządzeniami cieplnymi o stosunkowo dużym opóźnieniu czasowym ich reakcji na zmianę parametrów zasilania. Powszechnie stosowane w automatyce klasyczne regulatory PID nie spełniają w sposób zadowalający stawianych przed nimi wymagań wysokiej jakości sterowania. Rozwijana w ostatnich latach teoria sterowania rozmytego znajduje coraz szersze zastosowania w różnych gałęziach gospodarki i przemysłu. Regulatory rozmyte umożliwiają wprowadzenie nowych rozwiązań w układach sterowania także piecami odlewniczymi. Prawidłowo dobrany regulator rozmyty może znacznie obniżyć energochłonność procesu cieplnego w sterowanym urządzeniu grzejnym. W artykule przedstawiono porównanie energochłonności pracy układu sterowania oporowym piecem odlewniczym, wyposażonego albo w regulator typu PID, albo optymalnie dobrany regulator rozmyty.

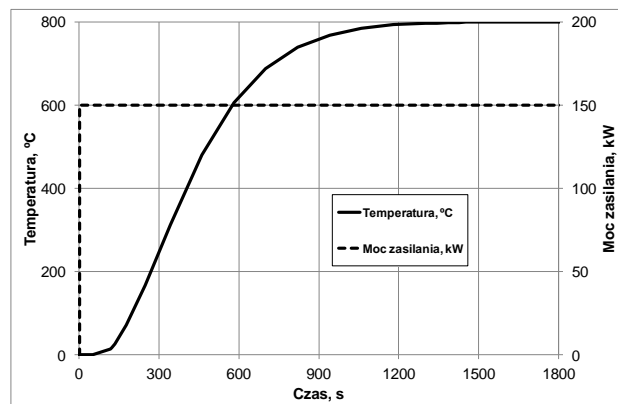
**Słowa kluczowe:** automatyzacja procesów odlewniczych, sterowanie piecami odlewniczymi, regulatory PID i rozmyte

## 1. Wprowadzenie

W celu zaprojektowania układu sterowania odlewniczym piecem oporowym niezbędna jest znajomość charakterystyki dynamicznej tego pieca, najczęściej opisywanej w postaci transmitancji  $G(s)$ . Dla znanej transmitancji takiego pieca dobiera się układ regulacji o założonej strukturze i odpowiednio zdefiniowanych parametrach. W artykule przedstawiono etapy projektowania regulatorów dla odlewniczego pieca oporowego o transmitancji

(1)

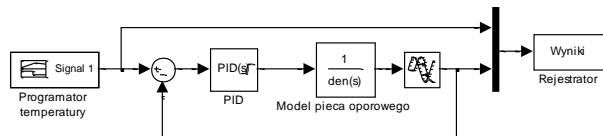
Na rysunku 1 przedstawiono wykres zmiany temperatury w komorze pieca po włączeniu maksymalnej mocy zasilania wynoszącej 150 kW. Dla pieca o takiej charakterystyce dynamicznej zostanie dobrany klasyczny regulator PID oraz regulator rozmyty o założonej strukturze wewnętrznej.



Rys. 1. Wykres zmiany temperatury w komorze odlewniczego pieca oporowego po włączeniu maksymalnej mocy zasilania

## 2. Układ sterowania z klasycznym regulatorem PID

Schemat klasycznego układu sterowania z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, z regulatorem PID, zamodelowany w pakiecie MATLAB/Simulink, przedstawiono na rysunku 2. W celu umożliwienia porównania energochłonności dwóch projektowanych układów sterowania, dokonano przeskalowania obiektów pieca oporowego oraz regulatorów. Założono możliwość programowania przebiegu temperatury oraz przyjęto, że regulator PID steruje piecem bez przeregulowania.



Rys. 2. Zamodelowany w pakiecie MATLAB/Simulink układ sterowania piecem oporowym z regulatorem PID

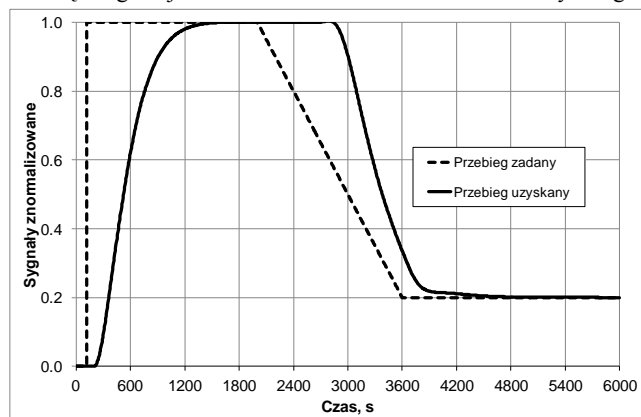
Procedura automatycznego strojenia regulatora PID, zawarta w programie Simulink, wyznaczyła następujące optymalne wartości parametrów tego regulatora:

- wzmacnienie członu proporcjonalnego  $k_p = 2.2475$ ,
- wzmacnienie członu całkującego  $k_i = 0.0056$ ,
- wzmacnienie członu różniczkującego  $k_d = 215.9919$ .

Na rysunku 3 pokazano przykład symulacji pracy układu sterowania z klasycznym regulatorem PID dla założonego normalizowanego przebiegu temperatury w komorze pieca oporowego.

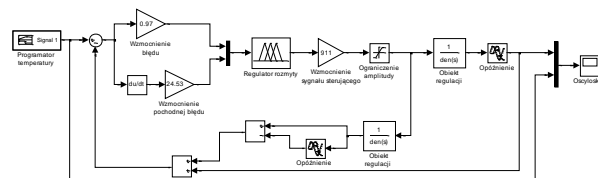
## 3. Układ sterowania z rozmytym regulatorem o założonej strukturze

Sterowanie rozmyte jest coraz powszechniej stosowaną metodą regulacji w układach sterowania automatycznego.



Rys. 3. Wykres zmiany przeskalowanej temperatury w komorze pieca oporowego sterowanego w układzie z regulatorem PID o optymalnie dobranych parametrach

Teorię i praktyczne zastosowania sterowania rozmytego można znaleźć między innymi w pracach [1-3]. Na rysunku 4 przedstawiono zamodelowany w Simulinku przykład układu sterowania piecem oporowym z zastosowaniem regulatora rozmytego. W układzie tym, z uwagi na dużą inercję obiektu zastosowano predyktor Smitha.



Rys. 4. Schemat układu sterowania piecem oporowym z regulatorem rozmytym i predyktorem Smitha

Regulator rozmyty, zastosowany w tym układzie sterowania, ma założoną strukturę wewnętrzną, poprzez przyjęcie funkcji przynależności dla sygnałów wejściowych (sygnał błędów temperatury i sygnał pochodnej błędów temperatury w badanym układzie) oraz sygnału wyjściowego, sterującego piecem oporowym. Bazę reguł regulatora stanowi zbiór odpowiednio 9, 25, 49 oraz 81 reguł, tworzących regulator rozmyty typu Mamdaniego. Jednakowo przyjęte dla wszystkich znormalizowanych sygnałów wejściowych funkcje przynależności zdefiniowano w Simulinku za pomocą narzędzia *fuzzy* (pakiet *Fuzzy Logic Toolbox* [6]) i pokazano na rysunku 5.

Strojenie tak zdefiniowanego regulatora rozmytego polega na wyznaczeniu optymalnych wartości wzmacnień na jego obu wejściach oraz wyjściu [4, 5]. Kryterium optymalności najczęściej przyjmuje jedną z czterech zależności:

(2)

(3)

(4)

(5)

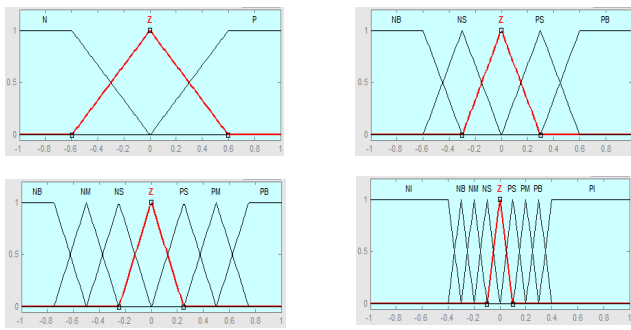
Im wartość  $K$  tego kryterium jest mniejsza, tym bardziej odpowiedź układu sterowania jest zgodna z żądanym przebiegiem w układzie sterowania.

Dobór wartości parametrów regulatora rozmytego można zrealizować różnymi metodami, na przykład:

- metodą poszukiwań prostych [5],
- algorytmem genetycznym [4, 5],
- z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych [5].

Przedstawione kryteria jakości sterowania mogą stanowić miarę energochłonności układu sterowania na przykład piecem oporowym. Regulator, dla którego wartości  $K$  przyjętego kryterium jakościowego jest większa, będzie pracował w układzie zużywającym więcej energii elektrycznej, zasilającej ten piec.

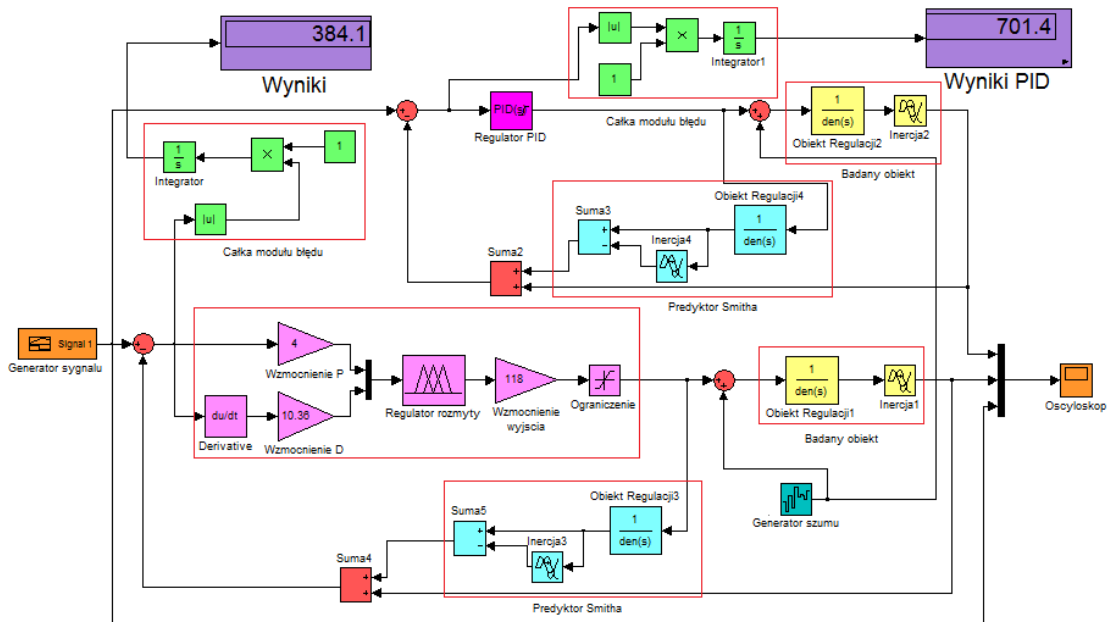
Na rysunku 5 przedstawiono schemat zamodelowanego w Simulinku układu do porównania wartości kryterium jakości sterowania w przypadku sterowania z zastosowaniem zarówno regulatora PID, jak i regulatora rozmytego. W układzie tym przyjęto kryterium jakości sterowania w postaci (2). Wyniki symulacji pracy obu układów regulacji pokazano na rysunku 6.



Rys. 5. Postaci zdefiniowanych w Simulinku funkcji przynależności dla regulatora Mamdaniego o 9, 25, 49 i 81 regułach wnioskujących

Z analizy wyników symulacji, pokazanych na rysunku 7 wynika, że zużycie energii w układzie sterowania z regulatorem PID, pomimo dobrania optymalnych wartości jego parametrów,

jest znacznie większe, niż w przypadku układu z regulatorem rozmytym o założonej strukturze wewnętrznej i optymalnie dobranych wartościach wzmoceń. Wartość kryterium K dla układu regulacji PID wynosiła 701.4, natomiast dla układu z regulatorem rozmytym wynosiła 384.1. Różnica tych wartości wynika z różnych odpowiedzi zastosowanych regulatorów w obszarze zmniejszania zadanej temperatury z poziomu maksymalnego do odpowiadającego 20% temperatury maksymalnej. Regulator PID z ponad 12 minutowym opóźnieniem rozpoczął reakcję na zmianę zadanej temperatury, poczym uzyskał założony drugi poziom temperatury z około 8 minutowym opóźnieniem. W układzie z regulatorem rozmytym nadążanie za założoną temperaturą było niemal natychmiastowe. Etap nagrzewania pieca do temperatury nominalnej w obu przypadkach był identyczny i wynikał z zasilania pieca oporowe- go maksymalną dostępną mocą.



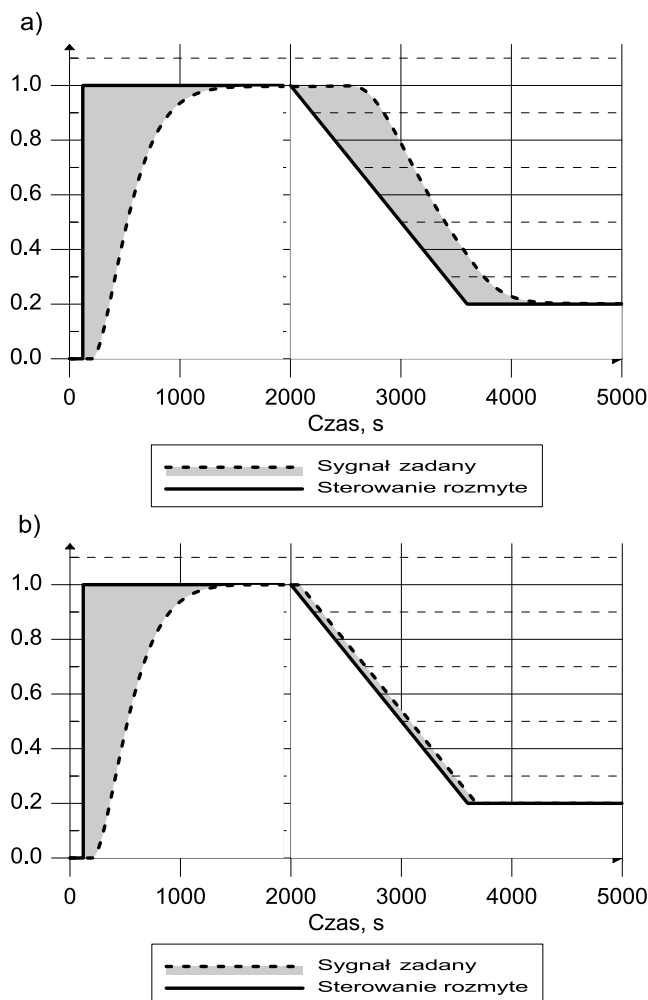
Rys. 6. Schemat zamodelowanego w Simulinku systemu symulacyjnego do porównania wartości kryterium jakości sterowania K, obliczanego według zależności (2), dla układu z regulatorem PID oraz regulatorem rozmytym o założonej strukturze wewnętrznej

#### 4. PODSUMOWANIE

Sterowanie oporowymi piecami odlewniczymi, charakteryzującymi się dużym opóźnieniem reakcji na zmianę parametrów zasilania, można z powodzeniem zrealizować za pomocą regulatorów rozmytych. Różnorodność struktury wewnętrznej oraz niekiedy bardzo duża liczba parametrów definiujących działanie tych regulatorów powodują konieczność stosowania zaawansowanych metod strojenia tych regulatorów. Dobór wartości parametrów regulatora rozmytego można realizować z zastosowaniem algorytmów genetycznych lub sieci neuron-

wych. Optymalnie nastrojone za pomocą tych metod układy regulacji znacznie lepiej odwzorowują żądany przebieg zmian temperatury w komorze sterowanego pieca, niż nawet optymalnie dobrane regulatory PID. Kryterium optymalności doboru wartości parametrów regulatora rozmytego może jednocześnie stanowić miarę energochłonności projektowanego układu sterowania.

Optymalnie dobrany układ sterowania rozmytego, w tym przypadku oporowym piecem odlewniczym umożliwia istotne, w porównaniu do klasycznych układów sterowania z regulatorem PID, zmniejszenie zużycia energii potrzebnej do prowadzenia procesu cieplnego, przez co można oczekiwać większych korzyści organizacyjnych, ekonomicznych i ekologicznych dla odlewni.



Rys. 7. Wyniki symulacji odpowiedzi układu sterowania dla optymalnych wartości parametrów regulatorów wraz z zaznaczonym obszarem różnicy sygnału zadanego i uzyskanego: a) dla układu z regulatorem PID, b) dla układu z regulatorem rozmytym o założonej strukturze wewnętrznej

## Podziękowania

Obliczenia wykonano za pomocą pakietu MATLAB/Simulink z biblioteką Fuzzy Toolbox na komputerach Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego ([www.wcss.wroc.pl](http://www.wcss.wroc.pl)), grant obliczeniowy Nr 212.

Prace finansowane w ramach umowy z MNiSW nr 15.11.170.448.

## Literatura

- [1] Yager, R.R. & Filev, D.P. (1995). Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. WNT, Warszawa.
- [2] Piegat, A. (1999). Modelowanie i sterowanie rozmyte. EXIT, Warszawa.
- [3] Kacprzyk, J. (2001). Wieloetapowe sterowanie rozmyte. WNT, Warszawa.
- [4] Byrne, J.P. (2003). GA-Optimisation of a Fuzzy Logic Controller. School of Electronic Engineering.
- [5] Mrozek B. (2006). Projektowanie regulatorów rozmytych w środowisku MATLAB-Simulink. *Pomiary Automatyka Robotyka*, nr 11, 5-12.
- [6] The Math Works. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide.

## Comparison of energy consumption in the classical (PID) and fuzzy control of foundry resistance furnace

### Abstract

Foundry resistance furnaces are thermal devices with a relatively large time delay in their response to a change in power parameters. Commonly used in automation classical PID controllers do not meet the requirements of high-quality control. Developed in recent years, fuzzy control theory is increasingly being used in various branches of economy and industry. Fuzzy controllers allow to introduce new developments in control systems of foundry furnaces as well. Correctly selected fuzzy controller can significantly reduce energy consumption in a controlled thermal process of heating equipment. The article presents a comparison of energy consumption by control system of foundry resistance furnace, equipped with either a PID controller or fuzzy controller optimally chosen.

**Keywords:** automation of foundry processes, control of foundry furnaces, PID and fuzzy controllers