

Kryteria optymalizacji w systemach sterowania rozmytego piecami odlewniczymi

E. Ziółkowski*, P. Śmierciak

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków

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

Otrzymano 20.06.2014; zaakceptowano do druku 12.07.2014

Streszczenie

Regulatory rozmyte są coraz powszechniej stosowane w układach sterowania urządzeniami technicznymi i procesami technologicznymi. Projektowanie regulatorów rozmytych przeznaczonych do sterowania piecami odlewniczymi, które charakteryzują się dużymi wartościami stałych czasowych i czasów opóźnień, jest zagadnieniem bardzo złożonym. Do optymalizacji struktury i wartości parametrów takich regulatorów można zastosować różne kryteria jakościowe, które decydują o efektywności układu sterowania. W artykule przedstawiono wybrane kryteria optymalizacji parametrów regulatora rozmytego o założonej strukturze. Na podstawie zaprezentowanych wyników symulacji pracy modelowego układu sterowania rozmytego odlewniczym piecem elektrycznym oporowym dokonano oceny jakości sterowania dla wybranych kryteriów optymalizacji.

Słowa kluczowe: sterowanie rozmyte, optymalizacja regulatorów rozmytych, kryteria optymalizacji sterowników rozmytych.

1. Wprowadzenie

Regulatory rozmyte znajdują coraz szersze zastosowanie w sterowaniu różnego rodzaju urządzeniami, zarówno powszechnego użytku (AGD), jak i przemysłowymi. Zasady projektowania tych regulatorów, bazujące na teorii rozmytości, zawarto w licznych publikacjach, na przykład w [1, 3, 4]. Projektowanie takich regulatorów wymaga:

- zdefiniowania bazy reguł wnioskowania,
- normalizacji (skalowania) wartości sygnałów wejściowych i wyjściowych,
- przyjęcia metody defuzyfikacji (wyostrzenia) wartości wyjściowych z regulatora rozmytego,
- wyboru kryterium optymalizacji wartości parametrów regulatora.

Regulatory rozmyte mogą znaleźć zastosowanie do sterowania elektrycznymi piecami odlewniczymi, jako alternatywa klasycznych regulatorów typu PID w różnych odmianach. W artykule opisano efekty projektowania i obliczeń symulacyjnych w układzie

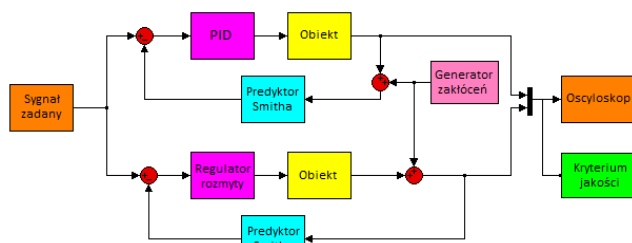
porównania jakości sterowania wybranym piecem elektrycznym oporowym, dla przyjętych kryteriów jakościowych.

W celu oceny przydatności sterowania rozmytego w modelowym układzie sterowania elektrycznym piecem odlewniczym oporowym zrealizowano następujące zadania:

- przeprowadzono identyfikację modelu matematycznego pieca wraz z jego normalizacją,
- w środowisku MATLAB/SIMULINK zamodelowano układ sterowania piecem za pomocą zoptymalizowanego regulatora PID,
- opracowano model struktury wewnętrznej regulatora rozmytego, w którym ustalono postać funkcji przynależności dla poszczególnych wejść i wyjścia regulatora, a także bazę 9 reguł wnioskowania,
- opracowano algorytm optymalizacji parametrów wzmocnienia sygnałów wejściowych i wyjścia znormalizowanego regulatora rozmytego,
- zamodelowano wskaźniki jakości sterowania, dla założonego przebiegu czasowego obiektu sterowania,
- opracowano w środowisku SIMULINK model układu porównania jakości sterowania badanym obiektem za

pomocą zoptymalizowanego regulatora PID oraz zaprojektowanego regulatora rozmytego.

Na rysunku 1 pokazano schemat blokowy układu sterowania piecem oporowym (nazwanym jako „Obiekt”) za pomocą zarówno regulatora typu PID, jak i regulatora rozmytego. W układzie znajdują się także takie elementy jak generator sygnału zadanego („Sygnał zadany”), generator sygnałów zakłócających („Generator zakłóceń”), „Predyktor Smitha”, który stosowany jest w układach sterowania z stałym opóźnieniem. Do wyświetlenia przebiegów będących wynikiem symulacji służy „Oscyloskop”, natomiast wartość kryterium jakości, przyjętego w chwili symulacji działania układu sterowania, jest wyświetlana w bloku „Kryterium jakości”.



Rys. 1. Schemat blokowy układu porównania jakości sterowania obiektem za pomocą regulatorów typu PID i rozmytego, zamodelowanego w środowisku MATLAB/SIMULINK

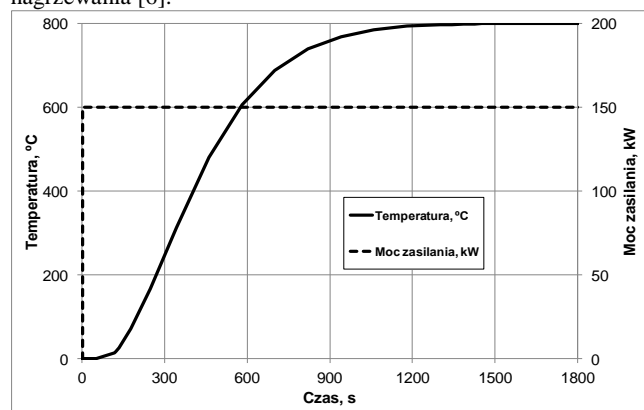
Na podstawie posiadanych danych pomiarowych przemysłowego pieca elektrycznego oporowego przeprowadzono identyfikację parametrów transmitancji tego obiektu [5]. Przyjęto model obiektu inercyjnego drugiego rzędu z opóźnieniem w postaci:

$$G(s) = \frac{e^{-80s}}{40000s^2 + 370s + 1} \quad (1)$$

gdzie:

$G(s)$ – transmitancja obiektu sterowania,
 s – operator Laplace’a,

Na rysunku 2 pokazano przebieg zmiany temperatury w komorze pieca oporowego, opisanego transmitancją (1), podczas jego nagrzewania [6].

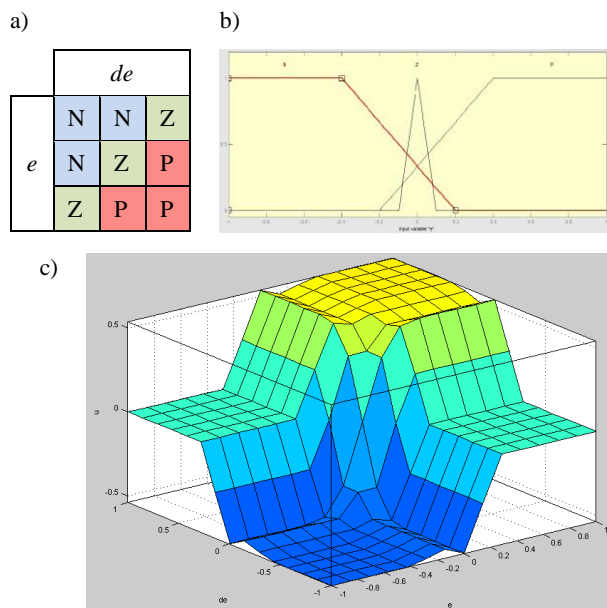


Rys. 2. Wykres zmian wartości temperatury w komorze pieca opisanego transmitancją (1) podczas procesu nagrzewania

Optymalne wartości parametrów regulatora typu PID mogą być w środowisku MATLAB/SIMULINK wyznaczone w sposób automatyczny, dla zdefiniowanego schematu układu sterowania obiektem o zadanej transmitancji [4]. W celu wyznaczenia wartości optymalnych parametrów regulatora rozmytego należy zdefiniować matematyczne zależności kryterium optymalizacji układu sterowania.

2. Kryteria optymalizacji regulatora rozmytego

Projektowanie regulatora rozmytego wymaga zdefiniowania jego struktury, bazy reguł wnioskowania, metody defuzyfikacji oraz wartości uwzględnionych parametrów. Tabełaryczną postacią bazy reguł pokazano na rysunku 3a. Na rysunku 3b przedstawiono graficzną postać funkcji przynależności jaką założono dla dwóch wielkości wejściowych oraz jednej wielkości wyjściowej znormalizowanego regulatora rozmytego. Powierzchnię modelu regulatora rozmytego, która została zamodelowana w środowisku MATLAB, wiążącą zależność wartości wielkości wyjściowej regulatora od wartości jego wielkości wejściowych (odchyłka od wartości zadanej e oraz pochodną błędu regulacji de), przedstawiono na rysunku 3c.



Rys. 3. Graficzna prezentacja bazy reguł (a), funkcji przynależności dla obu wielkości wejściowych i jednej wyjściowej (b) oraz powierzchnia odpowiedzi regulatora rozmytego zamodelowana w środowisku SIMULINK

W celu przeprowadzenia optymalizacji wartości parametrów regulatora rozmytego można przyjąć znane w literaturze z zakresu sterowania automatycznego następujące kryteria jakości sterowania:

$$\int_{t_0}^{t_k} |e| dt \quad (2)$$

$$\int_{t_0}^{t_k} e^2 dt \quad (3)$$

$$\int_{t_0}^{t_k} (t - t_0) |e| dt \quad (4)$$

$$\int_{t_0}^{t_k} (t - t_0) e^2 dt \quad (5)$$

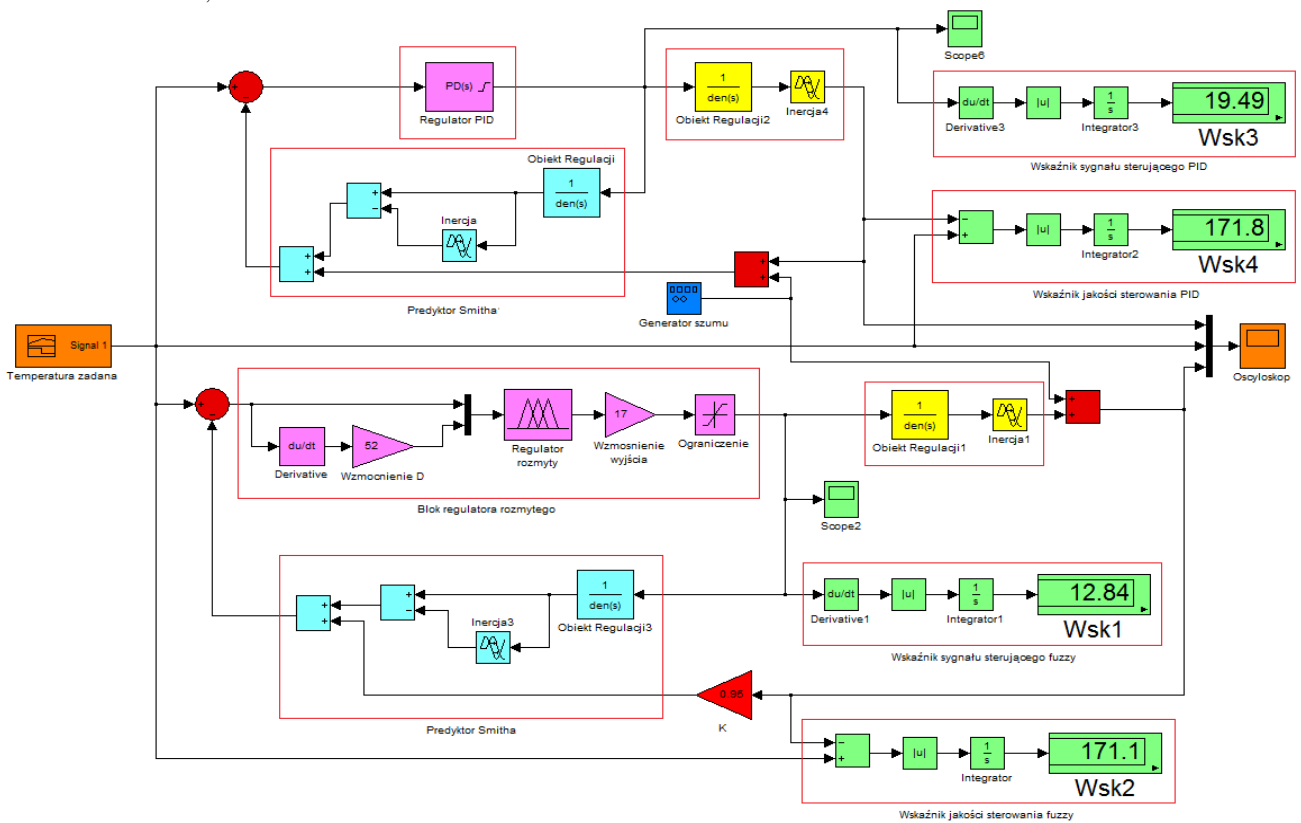
gdzie:

- e - uchyb w układzie sterowania,
- t_0, t_k - odpowiednio początek i koniec przedziału czasu sterowania,

t - czas.

Do przeprowadzenia serii symulacji obliczeniowych, mających na celu porównanie efektywności regulatora PID oraz regulatora rozmytego, zdefiniowano w środowisku SIMULINK złożony przebieg znormalizowanej wartości zadanej, tak aby charakteryzował się on różnymi czasami narastania i opadania sygnału.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy schemat zaprojektowanego w środowisku SIMULINK układu sterowania piecem oporowym z zastosowaniem regulatora typu PID oraz regulatora rozmytego o założonej strukturze, bazie reguł oraz dla przyjętych postaci funkcji przynależności oraz kryterium w postaci Schemat ten zawiera zoptymalizowane dla kryterium jakości (2) wartości współczynników regulatora rozmytego. Schematy dla pozostałych kryterium mają postać analogiczną do rysunku 4.

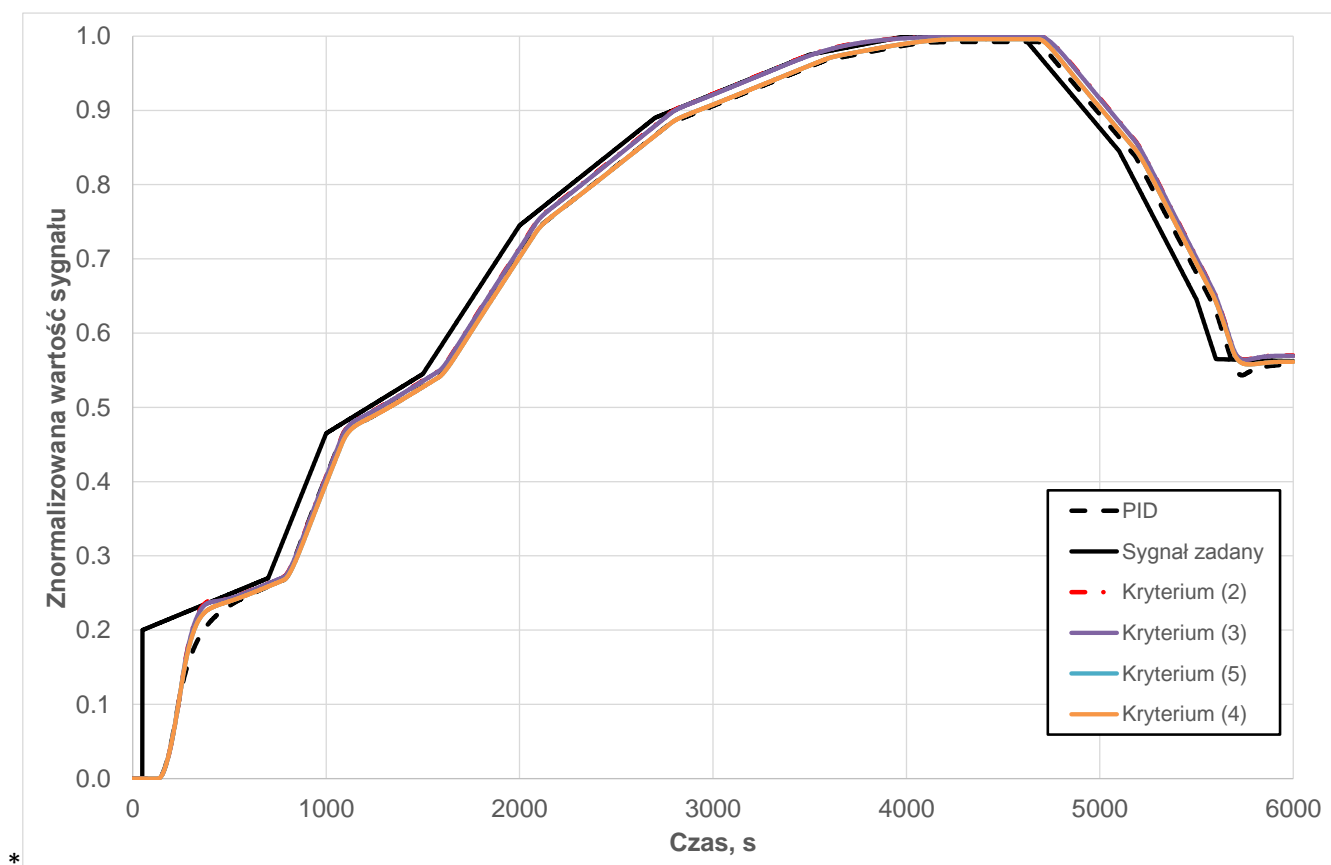


Rys. 4. Schemat zamodelowanego w środowisku SIMULINK układu sterowania wybranym obiektem za pomocą regulatora typu PID oraz regulatora rozmytego

Występujący na rysunku 4 wskaźnik *Wsk2* ujmuje wartość kryterium (2) w układzie sterowania obiektem za pomocą regulatora rozmytego, natomiast wskaźnik *Wsk4* określa wartość tego kryterium jakości w przypadku sterowania modelem piecem oporowym z wykorzystaniem zoptymalizowanego regulatora typu PID.

Na rysunku 5 przedstawiono wykres zawierający przebieg zmian wartości znormalizowanego sygnału zadanego oraz

odpowiedzi układu sterowania dla wszystkich rozważanych kryteriów jakości (2)-(5). Z analizy tego wykresu wynika, że odpowiedzi układu sterowania zawierającego zoptymalizowany regulator typu PID są nieco gorsze niż w przypadku układu sterowania z regulatorem rozmytym, niezależnie od przyjętego kryterium jakości sterowania. Należy zaznaczyć, że w niektórych przedziałach czasowych wszystkie przebiegi były do siebie bardzo zbliżone.



Rys. 5. Wykres zmian znormalizowanych wartości sygnału zadanego oraz odpowiedzi układu sterowania ze zoptymalizowanym regulatorem typu PID oraz regulatorem rozmytym o parametrach zoptymalizowanych według kryteriów (2)-(5)

Jedynie w części wykresu odnoszącej się do zadanego przebiegu obniżania temperatury w komorze pieca oporowego można zauważyć, że regulator typu PID działa nieco szybciej niż regulator rozmyty. W pozostałych fragmentach wykresu nadążanie regulatora rozmytego jest lepsze.

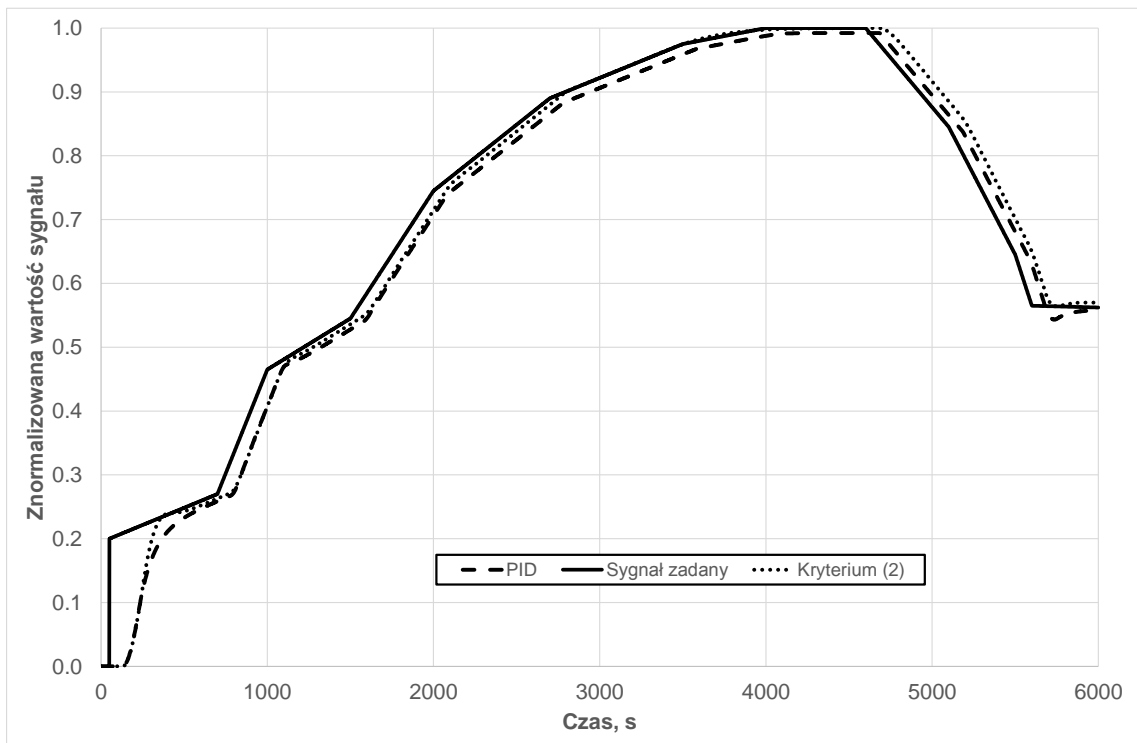
W tabeli 1 zestawiono porównanie wartości wskaźników jakości sterowania w układzie z regulatorami PID i rozmytym.

Tabela 1. Zestawienie wartości kryteriów jakości sterowania uzyskanych w obliczeniach symulacyjnych

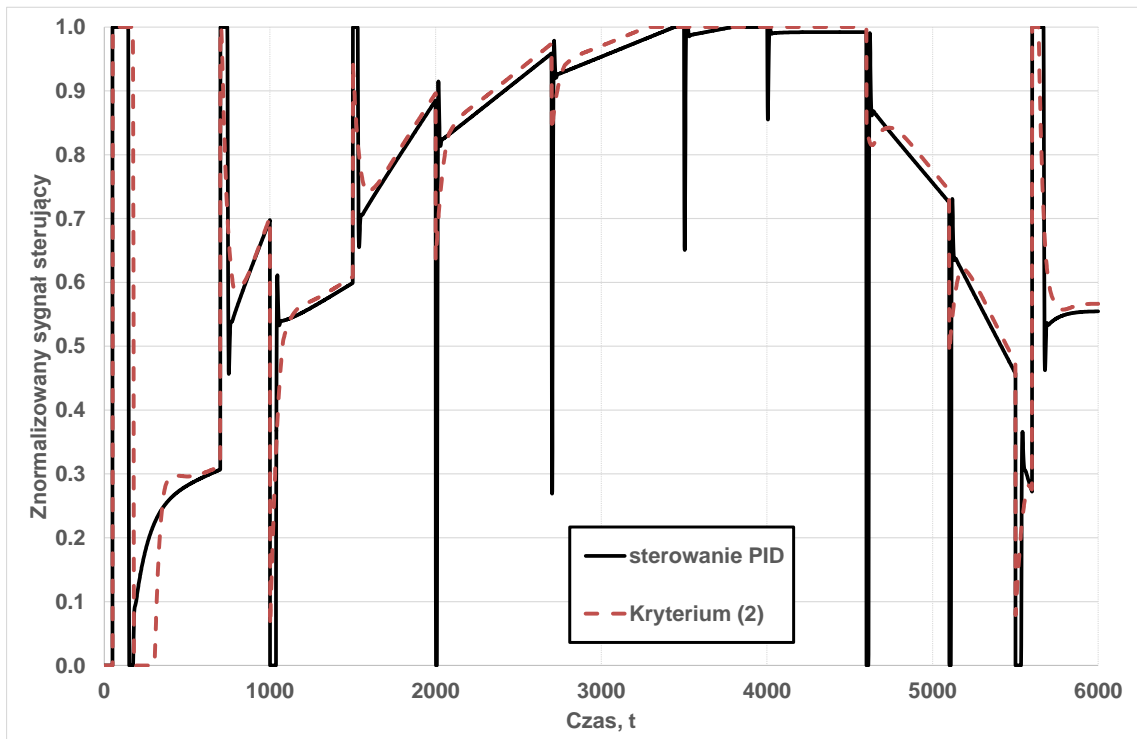
Kryterium jakości	Układ sterowania z regulatorem	
	PID	rozmytym
Kryterium (2)	166.80	142.80
Kryterium (3)	11.08	11.49
Kryterium (4)	10960	15270
Kryterium (5)	365500	356400

Z przedstawionych w tabeli 1 wyników można wnioskować, że poza przypadkiem obliczeń symulacyjnych, w których stosowano regulator rozmyty o wartościach parametrów wyznaczonych za pomocą kryterium jakości (4), układ z regulatorem rozmytym osiągał mniejsze wartości kryterium niż układ z regulatorem PID. Dla kryterium (3) i (5) wartości wskaźników jakościowych niewiele od siebie odbiegają, stanowiąc odpowiednio 3.6% oraz 2.5% odchyłki. Dla kryterium (2) odchyłka ta wynosi 14.4%, co jest znaczącą odchyłką, preferującą zastosowanie regulatora rozmytego. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki symulacji pracy układu sterowania piecem oporowym w układzie ze zoptymalizowanym regulatorem typu PID oraz regulatorem rozmytym o parametrach dobranych według kryterium jakości (2).

Jedną z istotnych zalet zastosowania w układzie sterowania regulatora rozmytego zamiast regulatora typu PID jest „łagodniejszy” przebieg sygnału wyjściowego z regulatora. Przykład taki pokazano na rysunku 7 dla zaprojektowanego regulatora rozmytego z zastosowaniem kryterium jakości (2). Przebieg zmian tego sygnału ma mniejszą liczbę przełączy o stosunkowo dużej amplitudzie.



Rys. 6. Wykres przebiegów znormalizowanych sygnałów w układzie sterowania z regulatorem PID oraz regulatorem o parametrach wyznaczonych według kryterium jakości (2)



Rys. 7. Wykres zmian znormalizowanych sygnałów sterujących w układzie z regulatorami typu PID oraz rozmytym o parametrach wyznaczonych według kryterium (2)

Układ sterowania nie jest wówczas narażony na gwałtowne zmiany sygnału sterującego obiektem, co przyczynić się może do zwiększenia niezawodności pracy całego systemu sterowania.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych można wywnioskować, że prawidłowo zaprojektowany regulator rozmyty może istotnie poprawić jakość regulacji elektrycznym piecem oporowym, w porównaniu do klasycznego układu sterowania za pomocą optymalnego regulatora typu PID. Regulator rozmyty może także zwiększyć niezawodność pracy systemu dzięki mniej dynamicznym zmianom sygnału wyjściowego z takiego regulatora. Zebrane wyniki obliczeń wartości poszczególnych wskaźników jakościowych dla modelowych symulacji wykazały, że stosowanie bardziej skomplikowanych, a przez to czasochłonnych kryteriów jakości niekoniecznie istotnie poprawia efektywność i dokładność systemów sterowania.

Podziękowania

Praca realizowana w ramach Pracy Statutowej AGH nr 11.11.170.318-6.

Literatura

- [1] A. Piegat (1999). *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT
- [2] B. Łysakowska, G. Mzyk (2005). *Komputerowa symulacja układów automatycznej regulacji w środowisku MATLAB/Simulink*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [3] K.M. Passino, S. Yurkovich (1998). *Fuzzy Control*. Addison Wesley Longman, Inc..
- [4] B. Mrozek (2006). *Projektowanie regulatorów rozmytych w środowisku MATLAB-Simulink*. *Pomiary Automatyka Robotyka*, nr 11..
- [5] T. Kaczorek (1977). *Teoria sterowania, część I*. Warszawa, PWN.
- [6] E. Ziółkowski & P. Śmierciak (2012). Porównanie energochłonności klasycznego (PID) i rozmytego sterowania odlewniczym piecem oporowym. *Archive of Foundry Engineering. Vol. 12, Special Issue 1, pp. 195-198*.

The Optimization Criteria in Fuzzy Control Systems of Foundry Furnaces

Fuzzy controllers are more commonly used in technical equipment and technological processes of control systems. Designing fuzzy regulators for controlling foundry furnaces, which are characterized by high values of the time constants and time delays, is very complicated. To optimize the structure and parameters of such controllers different quality criteria could be applied to determine the effectiveness of the control system. The paper presents the selected criteria to optimize the fuzzy controller parameters of the assumed structure. On the basis of the presented simulation results of the fuzzy control model of the foundry electric resistance furnace, the quality control for the selected optimization criteria has been assessed.