

Adaptacyjna regulacja temperatury w piecu do wypału płytek ceramicznych

Ryszard Janas

Politechnika Śląska

Streszczenie: W artykule opisano zastosowanie sterowania adaptacyjnego do automatycznej regulacji temperatury w piecu do wypału płytek ceramicznych. Scharakteryzowano dotychczas stosowane techniki regulacji PID, sytuacje ruchowe w sektorze pieca, określono wady takiego rozwiązania i wady produktów powstające w wyniku wahań temperatury w komorze pieca. Zaproponowano rozwiązanie problemu polegające na zastosowaniu regulacji adaptacyjnej, omówiono jej cechy charakterystyczne, sposób doboru parametrów i procedurę ich zmiany w funkcji zmiennej wiodącej, jak również prowadzenie ruchu pieca przy zastosowaniu regulacji adaptacyjnej.

Słowa kluczowe: regulacja adaptacyjna, regulator PID, piec ceramiczny, nastawy regulatora, zmienna wiodąca, jakość regulacji, płytki ceramiczne, wady wypału, badania symulacyjne

1. Istota sterowania adaptacyjnego

Sterowanie adaptacyjne znajduje zastosowanie w przypadkach, kiedy w czasie realizacji procesu regulacji zachodzą zmiany w samym układzie regulacji, bądź na układ ten oddziałują zakłócenia, których wcześniej nie było, lub które są znane i występują w określonych okolicznościach. Zachodzi wtedy zjawisko niedopasowania parametrów regulatora do parametrów obiektu, co wpływa negatywnie na jakość procesu regulacji, prowadząc do nadmiernych uchybów bądź oscylacji. Wyjściem z sytuacji jest ciągle dopasowywanie parametrów regulacji do parametrów obiektu, osiągnięte na drodze pomiaru jego parametrów, zakłóceń, jak również innych czynników mających wpływ na proces regulacji [6].

Wyróżniamy kilka typów układów sterowania adaptacyjnego:

- z programową zmianą parametrów regulatora (ang. *gain scheduling*),
- regulacji bezpośredniej,
- regulacji pośredniej,
- regulacji pośredniej z syntezą regulatora;

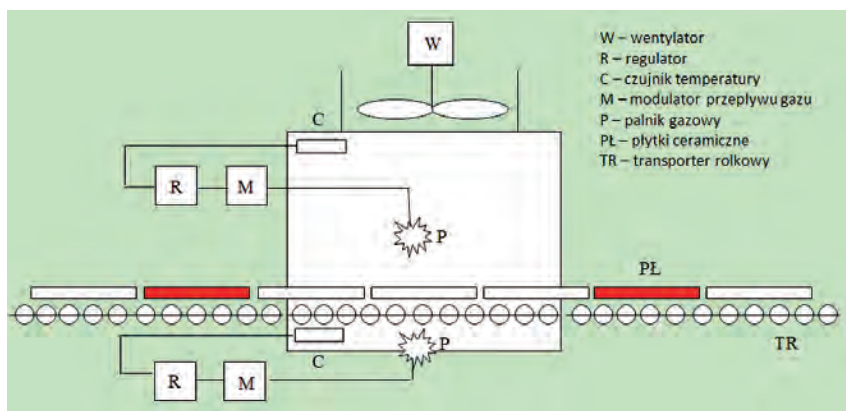
lub podział wg [15]:

- układ ze sprzężeniem do przodu,
- układ ze sprzężeniem zwrotnym,
- układ z modelem odniesienia,
- układ z estymacją parametrów modelu.

Zastosowanie układów sterowania adaptacyjnego jest bardzo szerokie, np. do regulacji temperatury w przechowalniach jabłek [13], gdzie zmiennym parametrem jest malejąca w czasie ich masa, jak również do sterowania wyważeniem samolotu w zależności od zmniejszającej się podczas lotu masy paliwa. Układy takie stosuje się także do regulacji poziomu wody w kulistych zbiornikach [14]. Autorzy wskazują na znaczącą poprawę jakości regulacji po zastosowaniu adaptacji parametrów.

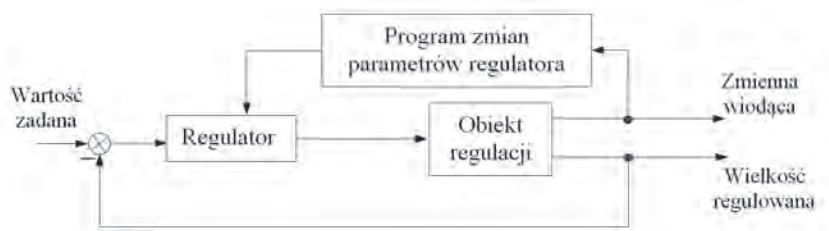
2. Przedstawienie problemu

W procesie wytwarzania ceramiki użytkowej, w szczególności płytek ściennych i podłogowych, jednym z elementów procesu technologicznego jest proces wypału. Jest on realizowany najczęściej w piecu tunelowym sektorowym [1], wewnątrz którego na przenośniku rolkowym TR przesuwają się wsady PŁ (rys. 1). Sektor pieca ma dwa niezależne układy regulacji temperatury, oddzielne dla przestrzeni pod płytkami i nad płytkami. Składają się one z czujnika temperatury C, regulatora R, modulatora przepływu gazu M oraz palnika P.



Rys. 1. Schemat sektora pieca

Fig. 1. Diagram of the kiln chamber



Parametry układu regulacji adaptacyjnej odniesione do rzeczywistego procesu technologicznego: wartość zadana – temperatura wymagana w sektorze wysokotemperaturowym pieca; regulator – regulator PID firmy EROELECTRONIC, typ TFS SERVO; obiekt regulacji – sektor pieca; program zmian parametrów regulatora – program zmieniający wzmocnienie członu P w zależności od sytuacji w sektorze; zmienna wiodąca – zmienna dwustanowa [0; 1] określająca obecność lub nieobecność płytek w sektorze; wielkość regulowana – rzeczywista, zmierzona temperatura w sektorze pieca

Rys. 2. Ogólna zasada regulacji adaptacyjnej

Fig. 2. General principle of adaptive control

palnika P. Usuwanie produktów spalania z sektora zapewnia wentylator W. Piec składa się z poszczególnych sektorów różniących się temperaturą. Sektory wysokotemperaturowe ogrzewane są palnikami gazowymi, sektory niskotemperaturowe ciepłem spalin pochodzących z sektorów wysokotemperaturowych. We wszystkich przypadkach stosowane są cyfrowe regulatory PID z odpowiednio dobranymi parametrami, gwarantujące osiągnięcie zadanej jakości regulacji zapewniającej prawidłowy przebieg procesu wypału [2]. Parametry te są ustawiane dla danego asortymentu płytek na stałe, niezależnie od sytuacji ruchowej (produkcyjnej) w piecu.

Szczególnie ważne jest utrzymanie zadanej wartości temperatury w sektorach wysokotemperaturowych, gdzie temperatura osiąga wartość nawet 1200 °C. Jest to warunek uzyskania zadanych parametrów geometrycznych płytki (płaskość, prostokątność, linowość krawędzi, wymiary, brak pęknięć, pęcherzy, rozwarstwień), jak również parametrów warstwy wierzchniej (szkliwa), takich jak: kolor, parametry w przestrzeni barw, równomierność, połysk, brak porowatości, gładkość.

W sektorach tych regulator PID współpracuje z zaworem proporcjonalnym [3] regulującym dopływ gazu i powietrza do palnika. Zawór taki napędzany jest silnikiem i jego parametrem jest m.in. czas, jaki jest potrzebny do całkowitego otwarcia zaworu z pozycji całkowitego zamknięcia. Temperatura mierzona jest za

pomocą termopar, a proces regulacji jest prowadzony niezależnie dla przestrzeni nad i pod przenośnikiem rolkowym. W warunkach pracy ustalonej (ciągły napływ płytek do pieca) taki układ zapewnia założoną jakość regulacji, co pozwala na osiągnięcie zadanych parametrów jakościowych płytek. Sytuacja zmienia się, gdy z powodów technologicznych lub awarii przerwany zostaje strumień dopływu płytek. Mogą tutaj zachodzić dwa podstawowe rodzaje problemów:

2.1. Przerwa w dopływie płytek jest „krótka” – jest to stan, w którym po zaniku strumienia płytek temperatura w sektorach wzrasta. Przyczyną jest zmiana warunków w sektorze z uwagi na zanik przegrody między przestrzenią górną i dolną, jaką stanowią płytki oraz brak wpływających „zimnych” płytek, jak również opóźnienie w zmniejszeniu strumienia gazu spowodowane określonym czasem reakcji zaworu proporcjonalnego. Następną partia płytek nadchodzi, gdy temperatura jeszcze nie spadła do wartości zadanej, wskutek czego płytki poddane są działaniu zbyt wysokiej temperatury, co jest powodem powstania braków produkcyjnych.

2.2. Przerwa w dopływie płytek jest „długa” – temperatura po początkowym wzroście opada do wartości zadanej, palniki pracują na mocy minimalnej. Parametry regulatora PID są niedopasowane do parametrów „pustego” pieca, z chwilą nadejścia następnej partii temperatura przejściowo spada (reakcja zaworu,

powstanie przegrody), płytki poddane są działaniu zbyt niskiej temperatury, co jest, podobnie jak poprzednio, przyczyną powstawania braków produkcyjnych.

W dotychczas stosowanych dokumentacjach techniczno-ruchowych pieców [1] opisywane są sposoby prowadzenia interwencji manualnej (sterowania ręcznego) służb operatorskich pieca w celu ograniczenia liczby braków i zapobiegnięcia uszkodzeniu pieca. Sprowadza się ona do wygaszania części palników, obniżenia temperatury zadanej po przejściu końcowej części strumienia płytek ceramicznych i przywrócenia parametrów nominalnych przed nadejściem następnej partii płytek. Stosowane są także automatyczne procedury interwencyjne, zaimplementowane przez firmy instalujące i uruchamiające piece, jak również przez producenta. Polegają one na zmniejszeniu wartości zadanej o kilkadziesiąt stopni przy powstaniu przerwy w strumieniu płytek (powoduje to zamknięcie zaworu gazowego i chwilowe wygaśnięcie palników) oraz powrocie wartości zadanej do prawidłowej technologicznie tuż przed napływem nowej partii (zawór gazowy otwiera się, palniki zapalają się automatycznie). Nie eliminuje to jednak braków produkcyjnych i w praktyce przemysłowej zwykle pierwsze kilkadziesiąt lub nawet kilkaset płytek po wyżej opisane przerwie posiada dyskwalifikujące wady wynikające z niewłaściwych parametrów wypału. Służby operatorskie starają się zmniejszać tę liczbę wprowadzając do pieca początkowo „dyżurną partię” wybrakowanych wcześniej płytek. Jest to jednak trudne do przeprowadzenia, szczególnie w całkowicie zrobotyzowanych liniach technologicznych stanowiąc dodatkowe zakłócenie w przebiegu procesu i powodując także dodatkowe niepotrzebne zużycie paliwa gazowego.

Identyfikacja problemu: Stosowane w praktyce sposoby nie rozwiązują problemu, zmiana wartości zadanej przy zmianie parametrów sektora pieca nie jest działaniem właściwym z punktu widzenia teorii regulacji. Przyczyną problemu jest niedopasowanie parametrów regulatorów PID do parametrów pieca, wynikające z istnienia dwóch różnych stabilnych sytuacji

ciepłych w piecu oraz sytuacji przejściowych wynikających z zanikania wsadu i jego pojawiania się w piecu. Dobranie właściwych parametrów dla każdej sytuacji ruchowej pieca zapewniłoby oczekiwaną stałość temperatury. Parametry te mogą być przełączane skokowo lub w sposób ciągły, który zapewnia możliwie najlepsze dopasowanie nastaw regulatora do obiektu, także w sytuacjach przejściowych.

3. Metodyka rozwiązania problemu

Rozwiązanie problemu polega na obliczeniu (określenie) dwóch zestawów parametrów regulatorów PID (dla sektora pieca bez płytek i z płytkami) oraz zastosowaniu sterowania adaptacyjnego poprzez automatyczną zmianę zestawów parametrów (z pozostawieniem niezmiennionej wartości zadanej) w określonych przedziałach czasu charakterystycznych dla przemieszczania strumienia płytek przez sektory pieca. Parametry takie byłyby stosowane do regulacji temperatury w przestrzeni nad i pod płytkami.

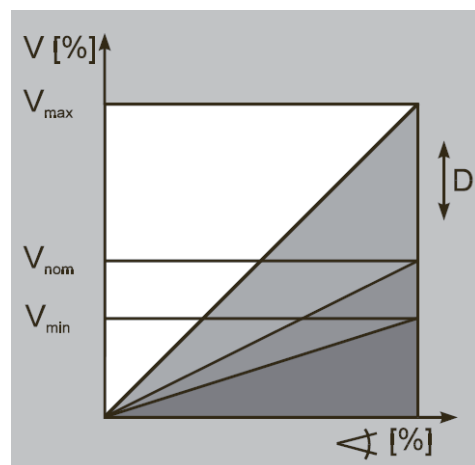
W badanym rozwiązaniu przyjęto koncepcję zastosowania do regulacji temperatury w sektorze pieca przedstawionym na rys. 1, układu regulacji typu „gain scheduling” (rys. 2) z programową zmianą parametrów regulatora określoną przez zmienną wiodącą, którą jest stwierdzona przez system czujników obecność, bądź nieobecność wsadu w sektorze pieca. Zmienna wiodąca może przy tym być określona wyprzedzająco w stosunku do zdarzenia, bowiem system przepływu płytek jest monitorowany począwszy od formowania płytki aż do zapakowania gotowych płytek na palety transportowe. Przyjęcie sterowania adaptacyjnego takiego typu wynika z budowy pieca, jego wyposażenia technologicznego, systemu regulacji temperatury i wyboru zakłóceń (np. zmienność strumienia płytek w czasie), których wpływ na proces wypалу powinien być zmniejszony.

4. Możliwości prowadzenia regulacji adaptacyjnej

W zakresie przyjętej koncepcji istnieją dwa warianty (algorytmy) prowadzenia regulacji adaptacyjnej:

4.1. Przygotowane są dwa zestawy parametrów regulatora, jeden dla sektora pieca wypełnionego całkowicie płytkami, drugi dla sektora pustego (bez płytek). Zmiana tych zestawów odbywa się skokowo w określonych chwilach cyklu wypalu (jest to początek zanikania bądź pojawiania się płytek w sektorze). Osobnym problemem jest określenie momentu przełączania, ponieważ niezależnie od jego wyboru zawsze będzie istniał etap przejściowy, w którym parametry są niedopasowane do aktualnej sytuacji w sektorze. Warto zauważyć, że jeżeli strumień płytek jest symulowany jako przebieg prostokątny, to taki sam musi być przebieg zmian nastaw regulatora.

4.2. Zestawy parametrów przygotowane są jak poprzednio, lecz parametry zmieniane są w sposób ciągły w obu kierunkach, zgodnie z malejącą lub zwiększającą się masą płytek. Masa płytek znajdujących się w sektorze, zwiększa się i zmniejsza liniowo podczas ich zaniku i pojawiania się, zaś stała czasowa obiektu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem, jakim jest sektor pieca, zależy w pewnym



Oznaczenia: V – przepływ gazu w %, $\angle$ – kąt otwarcia zaworu w %, D – zakres roboczy

Rys. 3. Charakterystyka zaworu gazowego sterującego dopływem paliwa do sektora pieca

Fig. 3. Characteristics of the gas control valve fuel inlet to the kiln sector

przybliżeniu liniowo od masy ładunku. Zmiana parametrów regulatora współbieżna z masą płytek zapewnia optymalne i ciągle w czasie dopasowanie parametrów regulatorów PID do zmiennych parametrów ciepłych sektora pieca.

Do dalszych rozważań został wybrany wariant 4.1 ze skokową zmianą parametrów.

5. Określenie parametrów procesu regulacji

Do określenia parametrów sektora pieca wykorzystano program: „Analizator wielowymiarowych obiektów i sygnałów dla systemu Multi-Edip” wersja 6.0, opracowany w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach [16]. Umożliwia on wyznaczenie parametrów obiektu (m.in. wzmocnienie k_{ob} , czas opóźnienia T_o , stała czasowa T_i) na podstawie zarejestrowanych przebiegów wielkości wejściowych i wyjściowych, w tym przypadku modulacji palnika gazowego i temperatury analizowanego sektora pieca. Dla danych wyznaczany jest model ARX¹, po czym obliczane są parametry modelu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem (ciągłego w czasie) na drodze minimalizacji sumy kwadratów różnic odpowiedzi skokowej modelu ARX i odpowiedzi modelu ciągłego [9]. Dane takie zostały zarejestrowane podczas rozruchu pieca do wypalu płytek ceramicznych po remoncie i zapisane w postaci pliku grzan1.dat (tab. 1). Temperatura jest mierzona w sektorze pieca i stanowi wejście regulatora. Modulacja jest wielkością wyjściową z regulatora i steruje proporcjonalnym zaworem przepływu gazu do palnika ogrzewającego sektor.

¹ Model **ARX** (ang. *autoregressive with exogenous input* – model autoregresywny z zewnętrznym wejściem) jest dyskretnym modelem wejściowo-wyjściowym dla procesów stochastycznych.

Tab. 1. Przykładowe dane
Tab. 1. Sample data

Temperatura [°C]	Modulacja [%]	Temperatura [°C]	Modulacja [%]	Temperatura [°C]	Modulacja [%]
900	22	1028	127	1122	127
905	54	1042	127	1121	127
917	84	1048	127	1120	121
924	85	1055	127	1119	119
946	127	1060	127	1119	111
957	127	1070	127	1119	114
967	127	1076	127	1119	109
974	127	1085	127	1119	107
986	127	1090	127	1118	107
994	127	1096	127	1118	107
1004	127	1103	127	1118	106
1012	127	1110	127	1118	106
1020	127	1119	127	1119	101

Uwaga: maksymalne wystawienie zaworu gazowego (maksymalne otwarcie – 100 %) odpowiada wartości modulacji (wielkość wyjściowa z regulatora) 127 % – jest to wartość generowana przez system kompleksowego nadzoru pieca firmy SACMI.

Po wprowadzeniu danych do programu otrzymano:

$$k_{ob} = 2,01, \quad T_z = 13,95 \text{ s}, \quad T_o = 2,00 \text{ s}$$

Na podstawie otrzymanych w ten sposób parametrów obiektu zostały obliczone metodą Zieglera-Nicholsa, za pomocą wzorów (1), parametry regulatora PID regulującego temperaturę w sektorze pieca, współpracującego z zaworem gazowym (rys. 3).

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{1,4 T_z}{k_{ob} T_o} \\ T_I &= 1,3 T_o \\ T_D &= 0,5 T_o \end{aligned} \tag{1}$$

Otrzymano:

$$\begin{aligned} k_p &= 4,86 \\ T_I &= 2,60 \text{ s} \\ T_D &= 1,00 \text{ s} \end{aligned}$$

gdzie: k_p – wzmacnienie członu P, T_I – czas (stała) całkowania, T_D – czas (stała) różniczkowania.

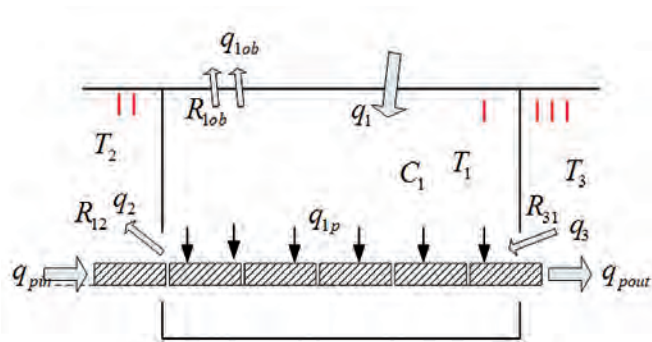
Postępując w analogiczny sposób, wyznaczono dla sektora pieca wypełnionego płytkami parametr

$$k_p = 5,11$$

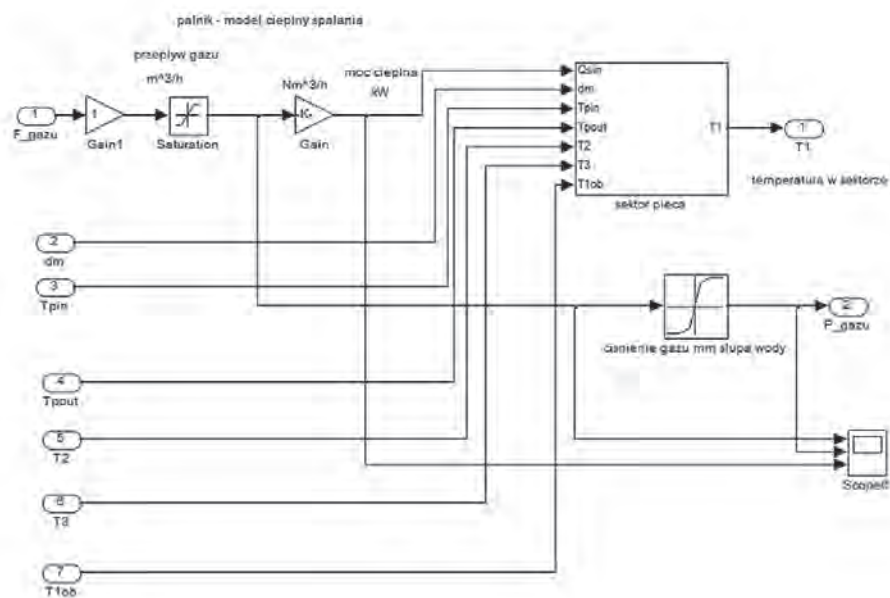
6. Model do symulacji procesu w środowisku MATLAB/Simulink

Piece rolkowe są szeroko stosowane do wypału płytek ceramicznych, jak również do hartowania płytek stalowych. Do symulacji zjawisk cieplnych zachodzących w ich sektorach stosuje się często modele matematyczne [11, 12], oparte na teorii sterowania, w szczególności dotyczącej opisu obiektów [4, 5], jak również technik regulacji temperatury [7] oraz cyfrowych algorytmów regulacji [8]. W celu zbadania wpływu proponowanego rozwiązania na jakość procesu regulacji, został w tym przypadku również zbudowany model pieca (rys. 4) w środowisku MATLAB/Simulink. Przyjęto przy tym następujące założenia:

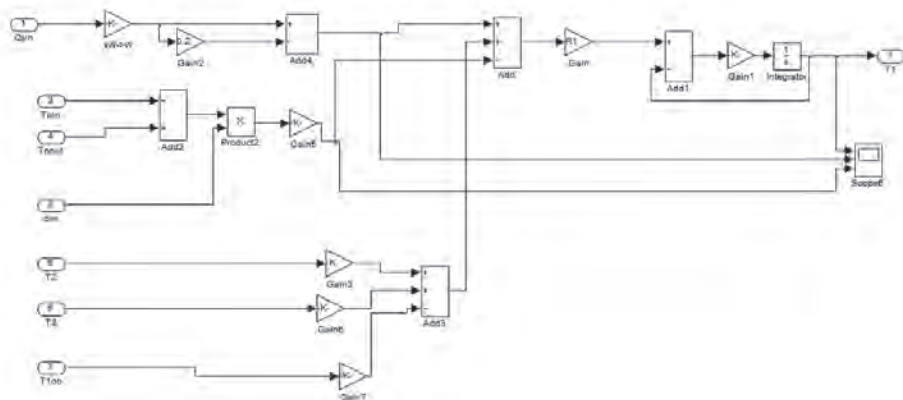
- model procesu regulacji jest liniowy – spełnia określone warunki w założonym przedziale wartości zmiennych,
- model zbudowano na podstawie [12],
- nie wzięto pod uwagę oddziaływania promieniowania cieplnego i towarzyszących mu zjawisk opisanych w [10],
- model symuluje temperaturę wewnątrz sektora pieca,
- zostały wzięte pod uwagę przepływy ciepła z i do sąsiednich sekcji, do obudowy, jak również ciepło uchodzące ze spalinami i konieczne do podgrzania powietrza do spalania,
- temperatura nad i pod płytkami jest taka sama.



Rys. 4. Model sektora pieca
Fig. 4. Model of the kiln sector



Rys. 5. Model analizowanego sektora pieca
Fig. 5. Model of the analysed kiln sector



Rys. 6. Model – wnętrze sektora pieca
Fig. 6. Model – inside of the kiln sector

Oznaczenia (rys. 5 i 6): F_gazu – strumień gazu, dm – strumień masy płytek, pozostałe oznaczenia są zgodne z opisem rys. 4.

Przyjęto oznaczenia (rys. 4):
 q_1 – strumień ciepła dostarczany przez palnik w rozpatrywanym sektorze pieca [J/s],
 q_2 – strumień ciepła przepływający z sektora rozpatrywanego do sektora poprzedniego pieca [J/s],
 q_3 – strumień ciepła przepływający z sektora następnego do sektora rozpatrywanego pieca [J/s],
 q_{1ob} – strumień ciepła przepływający z sektora rozpatrywanego do otoczenia [J/s],
 $q_{pin} = \dot{m}c_{pw}(T_{pin} - T_{pout})$ – całkowite ciepło oddane płytkom w piecu [J/s],
 $q_{pin} = \dot{m}c_{pw}T_{pin}$ [J/s],
 $q_{pout} = \dot{m}c_{pw}T_{pout}$ [J/s],
 T_1 – średnia temperatura w rozpatrywanym sektorze [K],
 T_2 – średnia temperatura w poprzednim sektorze [K],
 T_3 – średnia temperatura w następnym sektorze [K],
 T_{1ob} – średnia temperatura na obudowie [K],
 T_{pin} – temperatura strumienia masy płytek na wejściu do sektora [K],
 T_{pout} – temperatura strumienia masy płytek na wyjściu z sektora [K],
 C_1 – pojemność cieplna sektora [J/K],
 R_{12}, R_{31}, R_{1ob} – opory termiczne, odpowiednio: z rozpatrywanej sekcji do sekcji poprzedniej, z sekcji następnego do rozpatrywanej, z sekcji pieca na obudowę [m^2K/W],
 c_{pw} – ciepło właściwe płytek [J/kgK],
 $\dot{m}$ – strumień masy płytek [kg/s].

Równanie bilansu cieplnego sektora:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = q_1 - q_2 + q_3 - q_{1ob} + q_{pin} - q_{pout} \quad (2)$$
 Po podstawieniu (wg oznaczeń jw.):

$$q_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_{12}}$$

$$q_3 = \frac{T_3 - T_1}{R_{31}}$$

$$q_{1ob} = \frac{T_1 - T_{1ob}}{R_{1ob}}$$

$$q_{pin} = \dot{m}c_{pw}T_{pin}$$

$$q_{pout} = \dot{m}c_{pw}T_{pout}$$

Otrzymujemy:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = q_1 - \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} + \frac{T_3 - T_1}{R_{31}} - \frac{T_1 - T_{1ob}}{R_{1ob}} + q_{1p}$$

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = q_1 - T_1 \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{31}} + \frac{1}{R_{1ob}} \right) + \frac{T_2}{R_{12}} + \frac{T_3}{R_{31}} + \frac{T_{1ob}}{R_{1ob}} + q_{1p}$$

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} + T_1 \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{31}} + \frac{1}{R_{1ob}} \right) = q_1 + \frac{T_2}{R_{12}} + \frac{T_3}{R_{31}} + \frac{T_{1ob}}{R_{1ob}} + q_{1p}$$

$$\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{31}} + \frac{1}{R_{1ob}} = \frac{1}{R_1}$$

Dla celów symulacji i modelowania dynamiki samej sekcji pieca, wpływ poszczególnych sąsiednich sekcji został pominięty, zamiast tego wartość R_1 została przyjęta jako wartość liczbową reprezentująca wypadkowy opór termiczny konstrukcji sekcji. Transformata Laplace’a dla sektora pieca:

$$T_1(s) \left(C_1 s + \frac{1}{R_1} \right) = q_1(s) + \frac{T_2(s)}{R_{12}} + \frac{T_3(s)}{R_{31}} + \frac{T_{1ob}(s)}{R_{1ob}} + q_{1p}$$

$$T_1(s) \left(\frac{R_1 C_1 s + 1}{R_1} \right) = q_1(s) + \frac{T_2(s)}{R_{12}} + \frac{T_3(s)}{R_{31}} + \frac{T_{1ob}(s)}{R_{1ob}} + q_{1p} \tag{3}$$

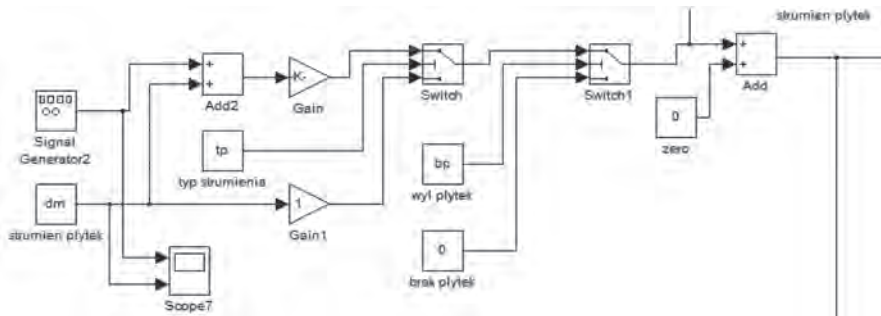
$$T_1(s) = q_1(s) \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} + \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \left(\frac{T_2(s)}{R_{12}} + \frac{T_3(s)}{R_{31}} + \frac{T_{1ob}(s)}{R_{1ob}} \right) + \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} q_{1p}$$

Oznaczenia stosowane na rys. 7 i rys. 8:

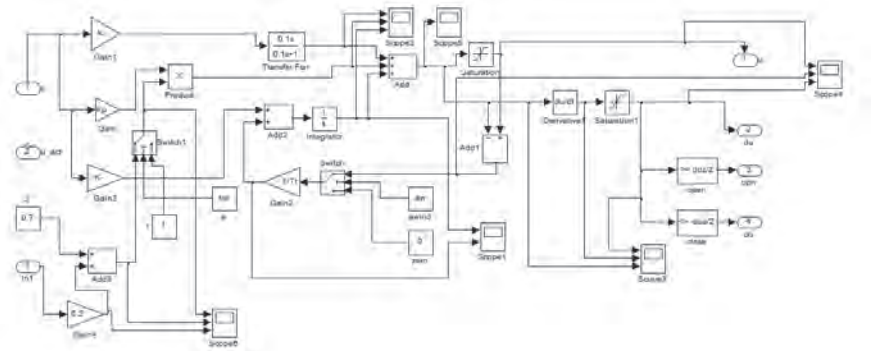
- tp – typ strumienia płytek: stały w czasie lub o przebiegu prostokątnym (zanikanie i pojawianie się płytek w piecu),
- bp – wyłączanie strumienia płytek (badanie sektora pieca całkowicie bez płytek),
- kor – włączanie lub wyłączanie korekcji parametrów regulatora,
- awind – włączanie lub wyłączanie funkcji *anti-windup* regulatora PID,
- opn – sygnał otwierania zaworu gazowego,
- cls – sygnał zamykania zaworu gazowego,
- ln1 – sygnał zmiany parametrów współbieżny ze strumieniem płytek.

Na podstawie zależności (2), (3) został zbudowany model sektora pieca w środowisku MATLAB/Simulink (rys. 5, rys. 6).

Temperatura w analizowanym sektorze jest regulowana za pomocą regulatora PID, a jego parametry są przełączane skokowo jednocześnie ze zmianami strumienia płytek w sektorze (rys. 7, rys. 8). Przyjęto, że zmieniany będzie współczynnik wzmocnienia k_p . Jako moment przełączania przyjęto pojawianie się, bądź znikanie płytek w piecu (skokowa zmiana parametrów). Przewiduje się rozszerzenie symulacji o zmianę parametrów przebiegającą według różnych funkcji, z różnymi wartościami wyprzedzenia w stosunku do zjawisk zachodzących w sektorze.



Rys. 7. Model zmiennego strumienia płytek
Fig. 7. Model of the variable stream of tiles



Rys. 8. Model regulatora PID zastosowanego w procesie symulacji
Fig. 8. PID controller model used in the process simulation

7. Wyniki symulacji procesów zachodzących w piecu

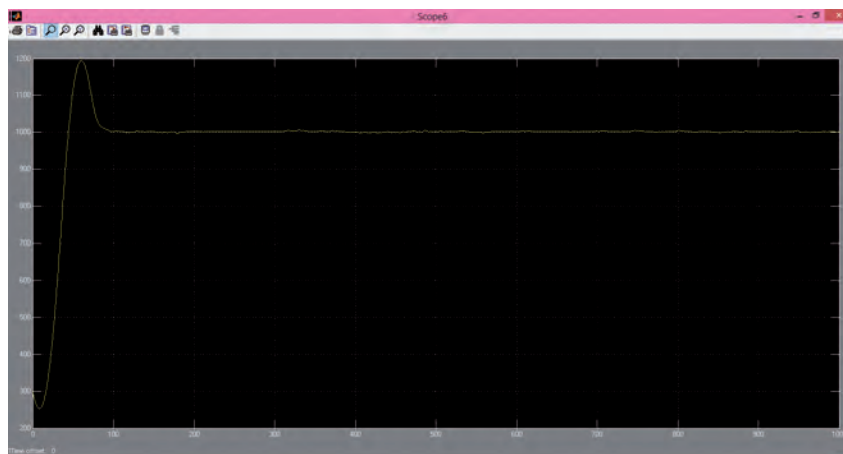
Przeprowadzono próby modelu układu regulacji temperatury sektora pieca (zadana temperatura 1002 °C – określona w technologii temperatura wypału) w następujących rodzajach pracy:

1. praca pieca z jednostajnym strumieniem płytek,
2. praca pieca ze zmiennym strumieniem płytek bez sterowania adaptacyjnego,
3. praca pieca ze zmiennym strumieniem płytek przy zastosowaniu sterowania adaptacyjnego.

Wyniki symulacji przedstawiono na wykresach (rys. 9–11), gdzie oś pionowa – temperatura w sektorze [°C], oś pozioma – czas [s]. Wykresy temperatury wynikowej sektora w poszczególnych przypadkach przedstawiają się następująco:

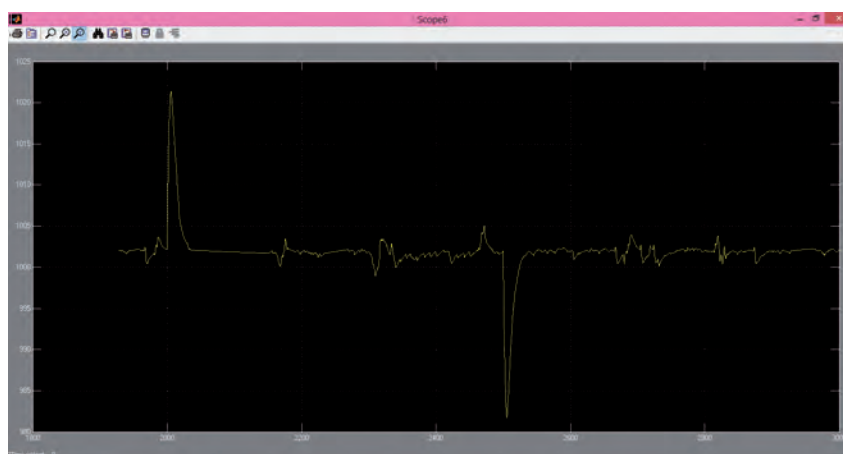
1. temperatura sektora pieca jest stała i wynosi 1002 °C – rys. 9,
2. temperatura sektora pieca jest zmienna w czasie – odchyłka wynosi 20,0 °C – rys. 10,
3. temperatura sektora pieca jest zmienna w czasie – odchyłka wynosi 18,0 °C – rys. 11.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wprowadzenie sterowania adaptacyjnego może poprawić jakość regulacji – odchyłka temperatury po wprowadzeniu korekty współczynnika wzmocnienia jest mniejsza. Należy przypuszczać, że badając różne rodzaje korekt parametrów regulatora, w odniesieniu do strumienia płytek (skokowa, liniowa, wg innej krzywej), jak również wprowadzając korektę parametrów członów różniczkującego i całkującego, jest możliwe znaczące zmniejszenie odchyłki wartości zadanej w trakcie występowania opisywanego zakłócenia, tj. zmiennego w czasie strumienia płytek. Zaobserwowano dodatkowo powstanie niewielkich oscylacji temperatury po wprowadzeniu zmiennego w czasie strumienia płytek, zarówno podczas pracy z adaptacją parametru, jak i bez. Wyjaśnienie źródła i istoty zauważonych oscylacji wymaga dalszych prac badawczych.



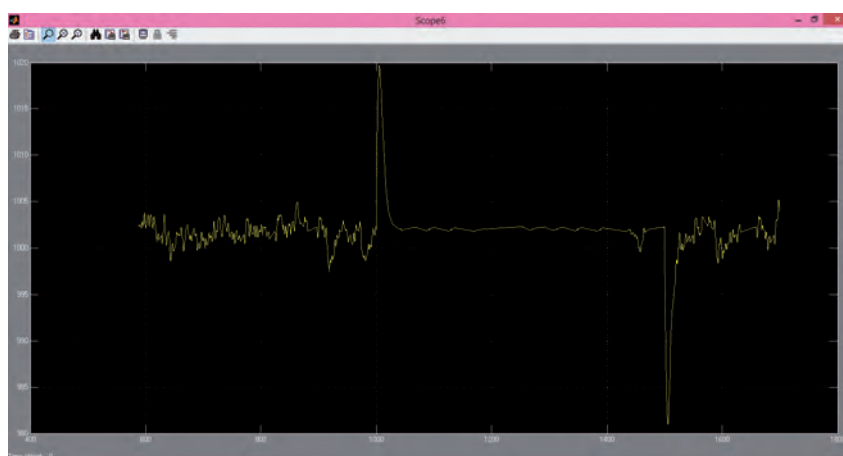
Rys. 9. Temperatura sektora pieca – jednostajny strumień płytek

Fig. 9. Temperature of the kiln section – a steady stream of tiles



Rys. 10. Temperatura sektora pieca – zmienny strumień płytek bez adaptacji parametrów regulatora

Fig. 10. Temperature of the kiln section – variable flow of tiles without adaptation of controller parameters



Rys. 11. Temperatura sektora pieca – zmienny strumień płytek z adaptacją parametrów regulatora

Fig. 11. Temperature of the kiln section – variable flow of tiles with adaptation of the controller parameters

8 Przeprowadzenie prób ruchowych w warunkach przemysłowych

Rezultaty symulacji zostaną zweryfikowane podczas prób na obiekcie rzeczywistym, co jest planowane po przeprowadzeniu pełnego cyklu prób symulacyjnych i potwierdzeniu ich pozytywnego wyniku. Oczekiwana jest poprawa jakości procesu regulacji, charakteryzująca się zmniejszeniem wahań temperatury przy zmianach strumienia płytek, co powinno przyczynić się do zmniejszenia liczby braków produkcyjnych.

9. Wnioski

Zastosowanie regulacji adaptacyjnej do sterowania temperaturą w procesie wypału płytek ceramicznych może w wydatnym stopniu poprawić jakość procesu przez zmniejszenie liczby braków, jak również przyczynić się do zmniejszenia zużycia gazu i wzrostu trwałości ceramicznych ścian sektorów pieca. W artykule opisano wybrane etapy prowadzonych badań układów regulacji temperatury w piecach do wypału płytek ceramicznych. Jest to także temat rozprawy doktorskiej, w której będą dyskutowane wyniki przeprowadzonej dokładnej analizy wielu rodzajów zmian strumienia płytek w sektorze pieca i stosowanych w celu poprawienia jakości regulacji poprzez zmianę parametrów regulatora.

Bibliografia

1. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa: Piec rolkowy jednowarstwowy SF 01A001A, SACMI FORMI Włochy, 2002.
2. Dokumentacja Regulatora PID firmy EROELECTRONIC, typ TFS SERVO.
3. Dokumentacja zaworu gazowego firmy Kromschroder AG, typ LFC 108.
4. Kaczorek T., *Teoria sterowania i systemów*, PWN, Warszawa 1999.
5. Bubnicki Z., *Teoria i algorytmy sterowania*, PWN, Warszawa 2005.
6. Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z., *Regulacja adaptacyjna*, PWN, Warszawa 1995.
7. Skoczowski S., *Technika regulacji temperatury*, PAK, Warszawa 2000.
8. Pułaczewski J., *Cyfrowe algorytmy regulacji*, Prace IAIIS PW, Warszawa 1999–2000.
9. Horla D., *Sterowanie Adaptacyjne*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
10. Kostowski E., *Promieniowanie cieplne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
11. Kim M.Y., *A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace*, "Int. J. Heat Mass Transfer", vol. 50, 2007, 3740–3748.
12. Srisertpol J., Tantrairatn S., Tragrunwong P., *Estimation of the Mathematical Model of the Reheating Furnace Walking Hearth Type in Heating Curve Up Process*, "International Journal of mathematical models and methods in applied sciences", Issue 1, Vol. 5, 2011, 167–174.
13. Wachowicz E., *Modelowanie procesów zachodzących w przechowalniach jabłek*, „Inżynieria Rolnicza” 9(51), 2003, 99–108.
14. VanDoren V., Urbański Ł., *Sterowanie adaptacyjne*, „Control Engineering Polska”, maj 2011.
15. Isermann R., Lachmann K-H, Matko D., *Adaptive Control System*, UK, Prentice Hall International 1992.
16. Kasprzyk J., *MULTI-EDIP – An Interactive Software Package For Process Identification*. Proceedings of the 13th IFAC Symposium on System Identification SYSID'2003, Rotterdam 2003, 1484–1489. ■

Adaptive temperature control in the kiln for firing ceramic tiles

Abstract: The article describes the use of adaptive control for regulation of the temperature in the kiln for firing the ceramic tiles. It describes the PID technology used before and material movement cases in the kiln chamber zone, and also determines defects in the solutions used before and product defects resulting from temperature fluctuations in the kiln chamber. The article presents the problem solution involving the use of adaptive control, its characteristics, guidelines for selecting the parameters, and procedure of their changes as a function of the scheduling variable, as well as the operation of the kiln using adaptive control, simulation studies.

Keywords: adaptive control, PID controller, ceramic kiln, controller settings, scheduling variable, adaptive control quality, ceramic tile, firing defects

Artykuł recenzowany, nadesłany 08.05.2013, przyjęty do druku 26.07.2013.

mgr inż. Ryszard Janas

Autor jest doktorantem Politechniki Śląskiej. Jest nauczycielem akademickim, wicedyrektorem szkoły technicznej, prowadzi zajęcia dydaktyczne w Pracowni elektrycznej i elektronicznej w Zespole Szkół Politechnicznych „Energetyk” w Wałbrzychu, zajmuje się regulacją PID i sterownikami PLC, jest twórcą pracowni i wielu stanowisk dydaktycznych do ćwiczeń z zakresu techniki PLC, posiada uprawnienia egzaminatora Centralnej Komisji Egzaminacyjnej w zawodzie technik informatyk i technik mechatronik.

e-mail: rjanas1@wp.pl

