

Tadeusz RODACKI<sup>1</sup>, Andrzej KANDYBA<sup>1</sup>, Marian KALUS<sup>2</sup>, Jerzy WYDRYCH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

<sup>2</sup> Instytut Systemów Sterowania w Chorzowie

## REGULACJA TEMPERATURY WODY W UKŁADZIE KOTŁA GAZOWEGO

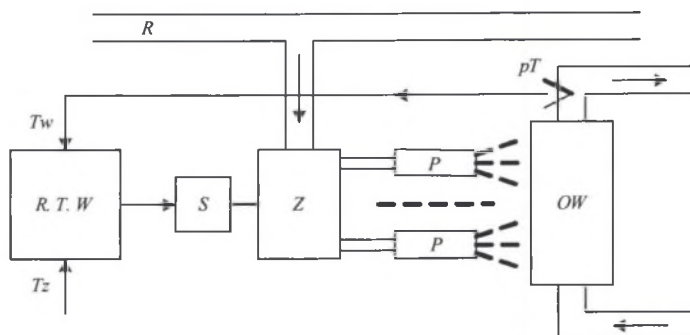
**Streszczenie.** Przeprowadzono syntezę obwodu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego opierając się na klasycznej teorii sterowania i teorii sterowania rozmytego. Przeprowadzono symulację komputerową obu metod sterowania i na podstawie uzyskanych wyników dokonano analizy porównawczej, głównie w kontekście odporności na zakłócenia zewnętrzne (zmiany przepływu wody obiegowej, zmiany temperatury wody obiegowej na wlocie kotła gazowego, zmiany wartości opałowej gazu).

## CONTROL OF TEMPERATURE OF WATER IN ARRANGEMENT OF GAS BOILER

**Summary.** A synthesis of a circuit of circulating water temperature in a gas boiler system has been done basing on the classic control theory and fuzzy control theory. A computer simulation of both control methods has been done and on the basis of the simulation results analysis has been done mainly in the context of resistance to ambient disturbances (changes in circulating water flow, changes of the temperature of water incoming to the gas boiler, changes in gas caloric value).

### 1. KONCEPCJA OBWODU REGULACJI TEMPERATURY WODY OBIEGOWEJ W UKŁADZIE KOTŁA GAZOWEGO

Schemat ideowy obwodu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego przedstawiono na rysunku 1, w którym przyjęto następujące oznaczenia: *OW* – obieg wody w układzie kotła gazowego, *R.T.W* – regulator temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego, *S* – serwomechanizm napędzający elementy wykonawcze zaworu *Z*, *Z* – zawór liniowy lub stałoprocentowy, *P* – palniki gazowe, *R* – rurociąg gazowy *T<sub>w</sub>* – wartość rzeczywista temperatury wody obiegowej, *T<sub>z</sub>* – wartość zadana temperatury wody obiegowej, *pT* – czujnik temperatury wody obiegowej. Wielkością regulowaną w rozpatrywanym obwodzie regulacji jest temperatura wody obiegowej w układzie kotła gazowego. Zasada działania układu regulacji temperatury wody obiegowej polega na sterowaniu wartością przepływu gazu opałowego do komory paleniska kotła gazowego. Elementem wykonawczym w układzie regulacji jest zawór *Z*, umieszczony w rurociągu zasilającym obwody palników gazowych, w palenisku kotła gazowego. Sygnał sterujący z wyjścia regulatora temperatury wody *R.T.W*. steruje stopniem otwarcia zaworu *Z*.

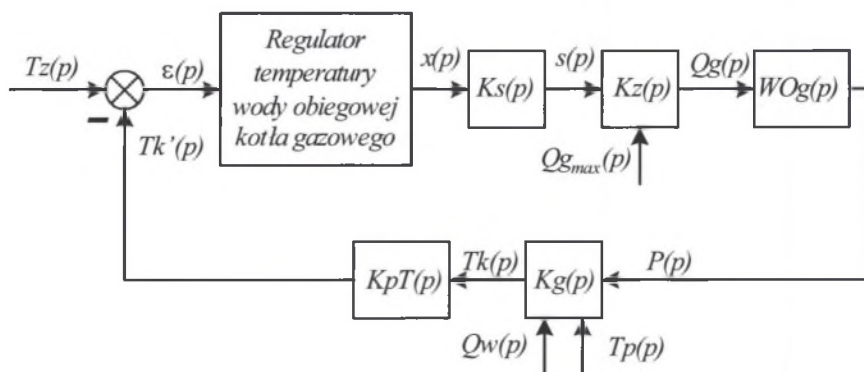


Rys. 1. Schemat przedstawiający zasadę układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego  
 Fig. 1. Scheme presenting the method of circulating water temperature regulation in a gas boiler

Kocioł gazowy opisano równaniem quasi-liniowym, wynikającym z prawa bilansu ciepła pomiędzy komorą paleniska a obiegiem wody kotła. Założono, że kocioł gazowy z punktu widzenia własności dynamicznych jest elementem inercyjnym I rzędu.

## 2. KLASYCZNY OBWÓD REGULACJI TEMPERATURY WODY OBIEGOWEJ KOTŁA GAZOWEGO

Schemat blokowy obwodu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego zbudowano opierając się na schemacie z rysunku 1 i przedstawiono na rysunku 2, przyjmując



Rys. 2. Schemat blokowy klasycznego układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego  
 Fig. 2. Block scheme of classic a circuit of circulating water temperature in a gas boiler system

następujące oznaczenia:  $T_z(p)$  – sygnał proporcjonalny do temperatury zadanej wody obiegowej kotła gazowego [V];  $Tk'(p)$  – sygnał wyjściowy czujnika temperatury  $KpT$ , proporcjonalny do temperatury rzeczywistej wody obiegowej  $Tk(p)$  kotła gazowego [V];  $\epsilon(p)$  – błąd węzła sumacyjnego regulatora temperatury wyrażony w [V], zdefiniowany następująco:

$$\epsilon(p) = T_z(p) - Tk'(p); \quad (1)$$

$x(p)$  – sygnał sterujący wyjściowy klasycznego regulatora temperatury wody obiegowej [V];  $Ks(p) = s(p)/x(p) = Ks/pTs$  – transmitancja operatorowa serwomechanizmu  $S$  [1/V]; gdzie:  $s(p)$  – stopień otwarcia zaworu  $Z$  [-] (zawiera się w granicach od 0–1);  $Ts$  – całkowity czas otwierania serwomechanizmu  $S$  zaworu  $Z$  [s];  $Ks = s(p)_{\max}/x(p)_{\max}$  – współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego serwomechanizmu  $S$  zaworu  $Z$  [1/V];  $Kz(p) = Qg(p)/s(p)$  – transmitancja operatorowa zaworu gazowego zastosowanego w układzie kotła gazowego [m<sup>3</sup>/s]; gdzie:  $Qg(p)$  – strumień objętości gazu w gałęzi zaworu  $Z$  [m<sup>3</sup>/s].

Rozpatrywane są dwa rodzaje zaworów: stałoprocentowy i liniowy.

#### Przypadek zaworu $Z$ stałoprocentowego:

$$Q_g(p) = Q_{g \max} \cdot \left( \frac{k_{V_o}}{k_{V_s}} \cdot e^{n_{st} \cdot s(p)} \right), \quad (2)$$

gdzie:  $k_{V_s}$ ,  $k_{V_o}$  – wartości średnie współczynnika przepływu odpowiadające odpowiednio pełnemu otwarciu i pełnemu przymknięciu zaworu  $Z$  [m<sup>3</sup>/s];  $n_{st} = \ln(k_{V_s}/k_{V_o})$  – nachylenie charakterystyki zaworu stałoprocentowego;  $Q_g(p)$ ,  $Q_{g \max}(p)$  – bieżąca i maksymalna wartość strumienia objętości gazu w gałęzi zaworu  $Z$  [m<sup>3</sup>/s].

#### Przypadek zaworu $Z$ liniowego:

$$Q_g(p) = Q_{g \max} \cdot \left( \frac{k_{V_o}}{k_{V_s}} + n_{lin} \cdot s(p) \right), \quad (3)$$

gdzie:  $n_{lin} = 1 - (k_{V_o}/k_{V_s})$  – nachylenie charakterystyki zaworu liniowego,  $WOG(p) = P(p)/Qg(p)$  – transmitancja operatorowa wartości opałowej gazu [J/m<sup>3</sup>], gdzie:  $P(p)$  – moc, jaką uzyskuje się po spaleniu bieżącej wartości przepływu gazu doprowadzonego do paleniska kotła [W];  $Qg(p)$  – bieżąca wartość przepływu gazu doprowadzonego do paleniska kotła [m<sup>3</sup>/s];  $Kg(p) = Tk(p)/P(p)$  – transmitancja operatorowa kotła gazowego [°C/W]; gdzie:  $Tk(p)$  – temperatura wody na wylocie obiegu wody kotła gazowego [°C].

Założono, że z punktu widzenia własności dynamicznych kocioł gazowy jest elementem inercyjnym I rzędu. Współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego w tym elemencie określono z prawa bilansu energii pomiędzy komorą paleniska a obwodem wody obiegowej kotła:

$$P(p) = Qw(p) \cdot \gamma w \cdot Cw \cdot \Delta T, \quad (4)$$

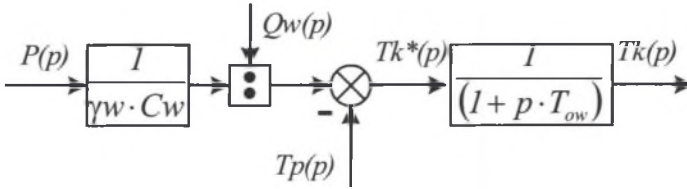
$$P(p) = Qw(p) \cdot \gamma w \cdot Cw \cdot [Tk(p) - Tp(p)]. \quad (5)$$

Po przekształceniach uzyskano zależność:

$$Tk(p) - Tp(p) = \frac{P(p)}{Qw(p) \cdot \gamma w \cdot Cw}, \quad (6)$$

gdzie:  $\gamma w$  – gęstość wody [kg/m<sup>3</sup>];  $Cw$  – ciepło właściwe wody [J/(kg·°C)];  $Tp(p)$  – temperatura wody na wlocie obiegu wody kotła gazowego [°C];  $Qw(p)$  – strumień objętości wody w gałęzi obiegu wody kotła gazowego [m<sup>3</sup>/s].

Układ realizujący transmitancję operatorową kotła  $Kg(p)$  przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy transmitancji operatorowej  $Kg(p)$  kotła gazowego (przez  $Tow$  oznaczono stałą czasową obiegu wody kotła)

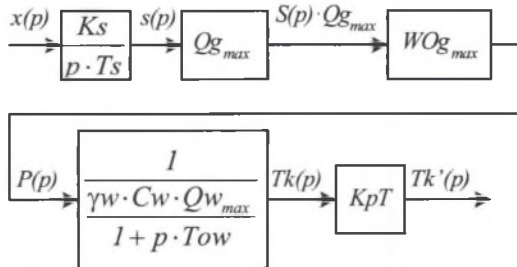
Fig. 3. Block scheme of operational transmittance  $Kg(p)$  of a gas boiler ( $Tow$  is boiler water circulation time-constant)

$$KpT(p) = \frac{Tk'(p)}{Tk(p)} = \frac{Tk'(p)_{\max}}{Tk(p)_{\max}} \quad - \text{transmitancja operatorowa przetwornika pomiarowego}$$

temperatury [V/°C]; gdzie:  $Tk'(p)$  – sygnał napięciowy z przetwornika pomiarowego temperatury, proporcjonalny do temperatury  $Tk(p)$  [V].

### 2.1. Wybór struktury klasycznego regulatora temperatury wody obiegowej kotła gazowego oraz dobór parametrów do tej struktury

Syntezę klasycznego układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego, przeprowadzono opierając się na kryterium „symetrycznego optimum” według C. Kesslera [2, 4]. Punktem wyjścia do syntezy klasycznego regulatora temperatury wody obiegowej opartego na tym kryterium jest transmitancja otwartego układu regulacji (bez regulatora),



Rys. 4. Schemat blokowy otwartego układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego  
Fig. 4. Block scheme of open regulation system of water temperature in a gas boiler system

$$K_o(p) = \frac{Ks \cdot Qg_{\max} \cdot W Og_{\max} \cdot KpT}{p \cdot Ts(1 + p \cdot Tow)} \quad (7)$$

którą uzyskano na podstawie kryterium „symetrycznego optimum” według C. Kesslera. Przyjęto regulator temperatury wody obiegowej kotła gazowego o strukturze proporcjonalno-całkującej typu PI. Parametry tej struktury opisują następujące zależności:

Czas zdwojenia członu I:

$$Tz = 4 \cdot Tow \quad (8)$$

Współczynnik wzmocnienia członu P:

$$V_p = \frac{T_s}{2 \cdot V_o \cdot T_{ow}}, \quad (9)$$

gdzie:

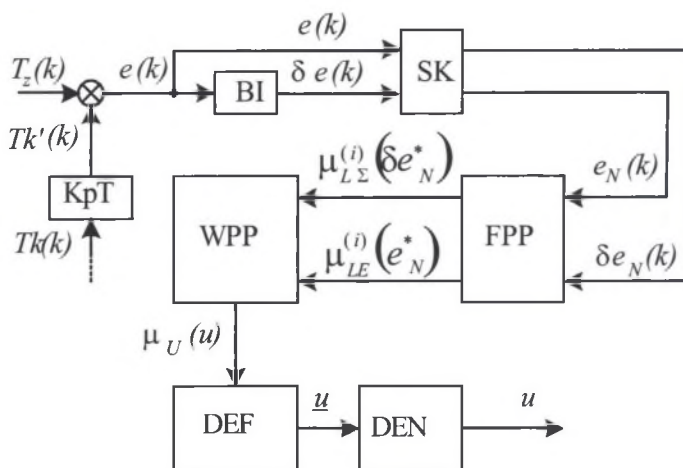
$$V_o = \frac{K_s \cdot Q_{g_{\max}} \cdot W O_{g_{\max}} \cdot K_{pT}}{\gamma_w \cdot C_w \cdot Q_{w_{\max}}}, \quad (10)$$

stąd ostatecznie:

$$V_p = \frac{T_s \cdot \gamma_w \cdot C_w \cdot Q_{w_{\max}}}{2 \cdot T_{ow} \cdot K_s \cdot Q_{g_{\max}} \cdot W O_{g_{\max}} \cdot K_{pT}}. \quad (11)$$

### 3. STRUKTURA WEWNĘTRZNA REGULATORA ROZMYTEGO (FUZZY) TEMPERATURY WODY OBIEGOWEJ W UKŁADZIE KOTŁA GAZOWEGO

Wstępnie przyjęto regulator rozmyty (fuzzy) o strukturze proporcjonalno-całkującej typu PI. Schemat wewnętrzny struktury obliczeniowej regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego typu PI przedstawiono na rys. 5 [1, 3, 5, 6, 7].



Rys. 5. Struktura obliczeniowa regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego

Fig. 5. Calculation structure of a fuzzy regulator of water temperature in a gas boiler system

Na rysunku 5 przyjęto następujące oznaczenia: BI – blok integracyjny, SK – blok skalowania, FPP – fuzyfikacja, WPP – wnioskowanie lub odpalanie reguły, DEF i DEN – odpowiednio defuzyfikacja i denormalizacja.  $T_k(k)$  – temperatura wody obiegowej w układzie kotła gazowego w  $k$ -tej chwili [°C];  $T'k(k)$  – sygnał napięciowy z przetwornika pomiarowego temperatury, proporcjonalny do temperatury rzeczywistej  $T_k(k)$  w  $k$ -tej chwili [V];

$$K_{pT} = \frac{T'k(k)}{T_k(k)} = \frac{T'k(k)_{\max}}{T_k(k)_{\max}} - \text{wzmocnienie przetwornika pomiarowego temperatury [V/°C];}$$

$T_z(k)$  - temperatura zadana w k-tej chwili [V];  $e(k)$  - błąd porównania w k-tej chwili [V];

$$e(k) = T_z(k) - T^*k(k) \quad (12)$$

$\delta e(k)$  - suma błędów w k-tej chwili realizowana w bloku integracyjnym [V];

$$\delta e(k) = \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \quad (13)$$

$e_N(k)$ ,  $\delta e_N(k)$  – odpowiednio błąd porównania [V] i suma błędów w k-tej chwili po normalizacji [V];  $\delta e_N^*$ ,  $e_N^*$  – odpowiednio bieżąca wartość sumy błędów (w chwili pomiaru – odczytu) [V] i bieżąca wartość błędu porównania [V];  $\mu_{L\Sigma}^{(i)}(\delta e_N^*)$  – wartość funkcji przynależności od bieżącej wartości sumy błędów dla i-tej reguły (uzyskana w procesie fuzyfikacji), przy czym  $i = 1, \dots, 49$ , lub  $i = 1, \dots, 25$ , względnie  $i = 1, \dots, 9$  [-];  $\mu_{LE}^{(i)}(e_N^*)$  – wartość funkcji przynależności od bieżącej wartości błędu porównania (uzyskana w procesie fuzyfikacji) dla i-tej reguły, przy czym  $i = 1, \dots, 49$ , lub  $i = 1, \dots, 25$ , względnie  $i = 1, \dots, 9$  [-];  $\mu_u(u_N)$  - funkcja przynależności odwzorowująca wartość ogólnego wyjścia sterującego [-];  $u_N$  – skalarna wartość sygnału sterującego w dziedzinie znormalizowanej uzyskana w procesie defuzyfikacji [V];  $u$  - skalarna wartość sygnału sterującego w dziedzinie fizycznej uzyskana w procesie denormalizacji [V].

### 3.1. Skalowanie (normalizacja) i fuzyfikacja

Regulator rozmyty (fuzzy) temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego typu PI, posiada dwie zmienne w poprzędku reguły algorytmu regulatora. Są to błąd porównania w k-tej chwili  $e(k)$  i suma błędów  $\delta e(k)$  określone kolejno zależnościami (12) i (13). W procedurze skalowania wejścia (normalizacji) rozpatrywane zmienne są normalizowane przy użyciu następującej zależności:

$$e_n = N_e \cdot e, \quad (14)$$

gdzie:

$$N_e = \begin{bmatrix} N_{e(k)} & 0 \\ 0 & N_{\delta e(k)} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$e = [e(k) \quad \delta e(k)]^T, \quad (16)$$

$$e_N = [e_N(k) \quad \delta e_N(k)]^T. \quad (17)$$

przy czym:  $N_{e(k)}$ ,  $N_{\delta e(k)}$  – współczynniki normalizujące (korygujące) odpowiednio zmienne: błędu porównania  $e(k)$  i sumy błędu porównania  $\delta e(k)$ ;  $e(k)$ ,  $\delta e(k)$  – błąd porównania i suma błędu porównania przed normalizacją;  $e_N(k)$ ,  $\delta e_N(k)$  – błąd porównania i suma błędu porównania po normalizacji. Regulator rozmyty temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego typu PI, w sensie ogólnym jest opisany przez następujący algorytm:

$$\text{Jeżeli } e_N(k) \text{ jest } \langle \text{symbol własności} \rangle \text{ I } \delta e_N(k) \text{ jest } \langle \text{symbol własności} \rangle \\ \text{TO } u \text{ jest } \langle \text{symbol własności} \rangle \quad (18)$$

### 3.2. Określenie bazy reguł regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej typu PI w układzie kotła gazowego

Bazę reguł regulatora rozmytego typu PI określono opierając się na algorytmie postaci oraz ogólnym równaniu regulatora o strukturze proporcjonalno-całkującej:

$$u_N(k) = e_N(k) + \delta e_n(k). \quad (19)$$

W tabeli 1 przedstawiono bazę reguł regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej typu PI w układzie kotła gazowego – dla przypadku siedmiu funkcji przynależności.

Tabela 1

Baza reguł regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego typu PI dla przypadku siedmiu funkcji przynależności

$\delta e_N(k)$ $e_N(k)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZO</b>
NM	<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZO</b>	<b>PS</b>
NS	<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZO</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>
ZO	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZO</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
PS	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZO</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>
PM	<b>NS</b>	<b>ZO</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>
PB	<b>ZO</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>

Przy czym funkcje przynależności dla poszczególnych przypadków zdefiniowane są następująco: dla siedmiu funkcji przynależności (NB – duży ujemny, NM – średni ujemny, NS – mały ujemny, ZO – zero, PS – mały dodatni, PM – średni dodatni, PB – duży dodatni). Dla pięciu funkcji przynależności nie zastosowano funkcji PM i funkcji NM. Natomiast dla trzech funkcji przynależności zastosowano tylko funkcje: N – ujemny, ZO – zero, P – dodatni.

### 3.3. Odpalanie reguły (wnioskowanie) regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej typu PI w układzie kotła gazowego

Regulator rozmyty (fuzzy) temperatury wody obiegowej typu PI w układzie kotła gazowego jest opisany przez algorytm postaci (18) i ogólne równanie regulatora o strukturze proporcjonalno-całkującej postaci (19), którego strukturę w formie bazy reguł przedstawia tabela 1 dla przypadku 7 funkcji przynależności. Dla pięciu i trzech funkcji przynależności bazę reguł tworzy się w taki sam sposób.

Funkcje przynależności  $\mu_{e_N}^{(i)}$ ,  $\mu_{\delta}^{(i)}$  i  $\mu_u^{(i)}$ , określone odpowiednio dla  $LE^{(i)}$ ,  $L\Sigma^{(i)}$  i  $LU^{(i)}$ , są zdefiniowane we wspólnej znormalizowanej dziedzinie, tzn:

$$E = \Sigma = U = N, \quad (20)$$

przy czym:  $i = 1, \dots, 49$  – dla przypadku 7 funkcji przynależności,  $i = 1, \dots, 25$  – dla przypadku 5 funkcji przynależności oraz  $i = 1, \dots, 9$  – dla przypadku 3 funkcji przynależności. Bieżący znormalizowany wektor wejściowy dla regulatora rozmytego (fuzzy) o strukturze PI przedstawia się następująco:

$$e_N^* = \left[ e_N^* \delta e_N^* \right]. \quad (21)$$

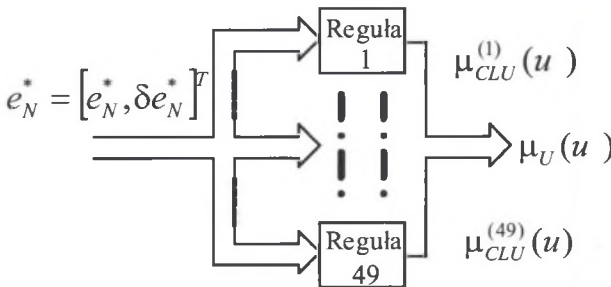
Dla bieżącego znormalizowanego wektora wejściowego postaci (21) niech wyjściem  $i$ -tej reguły będzie ściśnięta funkcja przynależności  $\mu_{CLU}^{(i)}(u)$  dla zmiennej sterującej  $u$ , przy czym:  $i = 1, \dots, 49$  – dla przypadku 7 funkcji przynależności:  $i = 1, \dots, 25$  – dla przypadku 5 funkcji przynależności oraz  $i = 1, \dots, 9$  – dla przypadku 3 funkcji przynależności. Wówczas funkcja przynależności  $\mu_u(u)$  odwzorowująca wartość ogólnego wyjścia sterującego (dla 7 funkcji przynależności), jest powiązana ze ściśniętymi funkcjami przynależności dla każdej reguły według następującej zależności:

$$\bigcap_u \mu_u(u) = \max(\mu_{CLU}^{(1)}(u), \dots, \mu_{CLU}^{(49)}(u)), \quad (22)$$

przy czym ściśnięta funkcja przynależności  $\mu_{CLU}^{(i)}$  dla  $i$ -tej reguły jest opisana przez następującą zależność dla  $i = 1, \dots, 49$ :

$$\mu_{CLU}^{(i)}(u) = \min\{\min(\mu_{e_N}^{(i)}(e_N^*), \mu_{\delta}^{(i)}(\delta e_N^*)), \mu_u^{(i)}(u)\}. \quad (23)$$

W przypadku pięciu i trzech funkcji przynależności zależność (22) różni się tylko odpowiednim indeksem. Schemat ideowy przedstawiający zasadę odpalania reguły (wnioskowania) regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej typu PI w układzie kotła gazowego – dla przypadku 7 funkcji przynależności ilustruje rysunek 6.



Rys. 6. Schemat przedstawiający zasadę odpalania reguły (wnioskowania) regulatora rozmytego temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego typu PI, dla 7 funkcji przynależności

Fig. 6. Scheme presenting the method of a rule launching (concluding) in a fuzzy regulator of water temperature in a gas boiler system type PI for 7 adhesion functions

### 3.4. Defuzyfikacja i denormalizacja

Proces defuzyfikacji regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej w układzie kotła gazowego typu PI przeprowadzono opierając się na metodzie środka obszaru (COA): W przypadku dyskretnym ( $u = \{u_1, \dots, u_l\}$ ) zależność ma postać:

$$\underline{u} = \frac{\sum_{k=1}^l u_k \cdot \mu_u(u_k)}{\sum_{k=1}^l \mu_u(u_k)}. \quad (24)$$



W przypadku ciągłym otrzymujemy:

$$\underline{u} = \frac{\int u \cdot \mu_u(u) du}{\int \mu_u(u) du} \quad (25)$$

Procedurę denormalizacji w regulatorze rozmytym (fuzzy) temperatury wody obiegowej typu PI w układzie kotła gazowego określa następująca zależność:

$$u = K_u \cdot \underline{u}, \quad (26)$$

w której współczynnik denormalizacji  $K_u$  jest zdefiniowany w następujący sposób:

$$K_u = \frac{u_{\max}}{\underline{u}_{\max}}, \quad (27)$$

gdzie:  $u_{\max}$  – oznacza maksymalną wartość sygnału sterującego w układzie sterowania serwo-mechanizmu zaworu regulacyjnego  $Z$  w rurociągu zasilającym palniki komory ogniowej kotła gazowego;  $\underline{u}_{\max}$  – maksymalna wartość sterująca uzyskana w procesie defuzyfikacji.

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU REGULACJI TEMPERATURY WODY OBIEGOWEJ KOTŁA GAZOWEGO

Celem badań symulacyjnych układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego było: wyznaczenie przebiegów czasowych charakterystycznych wielkości fizycznych w poszczególnych obwodach kotła gazowego oraz układu sterowania w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego temperatury zadanej oraz w odpowiedzi na zakłócenia: wartości opałowej gazu, wartości strumienia objętości wody obiegowej, temperatury wody obiegowej na wlocie kotła gazowego.

Narzędziem wykorzystanym do budowy modeli badanych układów regulacji był pakiet SIMULINK. Do budowy regulatora rozmytego (fuzzy) wykorzystano blok „Fuzzy” wchodzący w skład narzędzi SIMULINKA. Skorzystano również z możliwości definiowania własnych bloków poprzez łączenie i grupowanie elementów już istniejących (tworzenie podsystemów). Opracowując model układu regulacji założono, że podstawą do tworzenia modeli poszczególnych układów regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego był bilans energetyczny, a wszystkie obliczenia przeprowadzono w układzie SI.

##### 4.1. Wyniki badań symulacyjnych układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego

Badania symulacyjne układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego z zaworem liniowym i stałoprocentowym, przeprowadzono dla następujących danych znamionowych:

**Kocioł gazowy:** maksymalny strumień objętości wody obiegowej w układzie kotła gazowego  $Q_{w_{\max}} = 6.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , minimalny strumień objętości wody obiegowej w układzie kotła gazowego  $Q_{w_{\min}} = 2.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , maksymalny strumień objętości gazu opałowego  $Q_{g_{\max}} = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , wartość opałowa gazu (wartość średnia)  $W_{Og} = 34000000 \text{ J/m}^3$ , stała

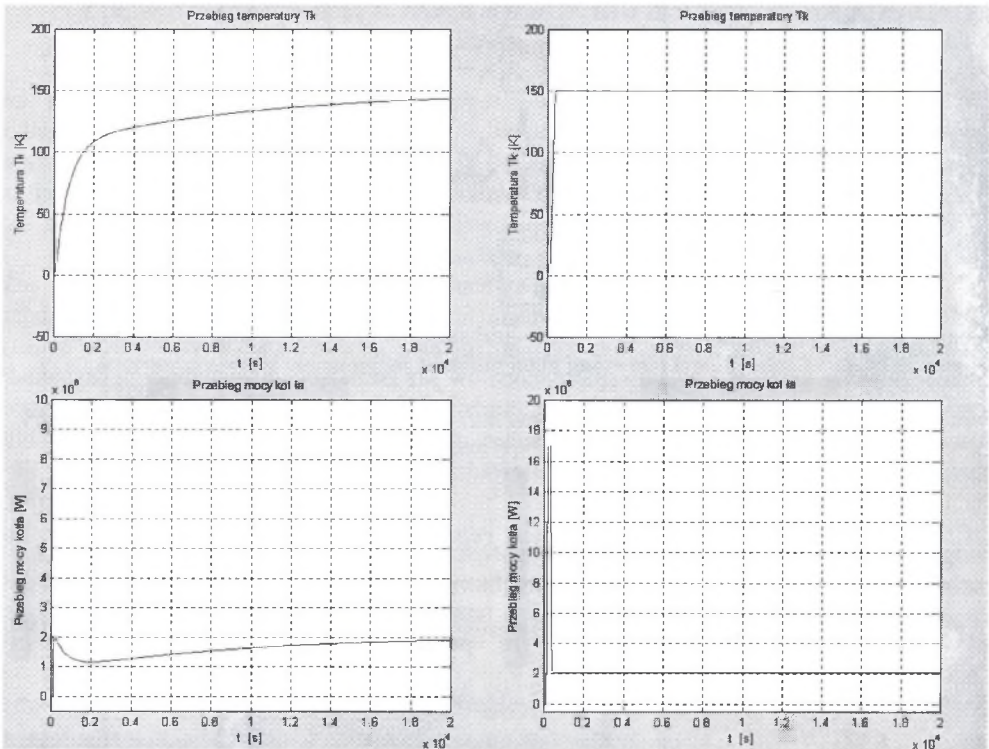
czasowa obiegu wody kotła gazowego  $T_{OW} = 900$  s. Serwomechanizm: całkowity czas otwierania serwomechanizmu  $T_S = 90$  s, współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego serwomechanizmu  $K_S = 0.1$  1/V.

**Zawór liniowy lub stałoprocentowy:** wartość średnia współczynnika przepływu, odpowiadająca maksymalnemu otwarciu zaworu  $k_{VS} = 1800$  m<sup>3</sup>/h, wartość średnia współczynnika przepływu, odpowiadająca pełnemu przymknięciu zaworu  $k_{Vo} = 0.0618$  m<sup>3</sup>/h.

**Czujnik temperatury wody obiegowej:** współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego czujnika temperatury wody obiegowej  $K_{pT} = 0.05$  V/°C.

Parametry klasycznego regulatora typu PI temperatury wody obiegowej kotła gazowego, współpracującego z zaworem gazowym liniowym lub stałoprocentowym, którego strukturę i jej parametry dobrano opierając się na kryterium „symetrycznego optimum” wg C. Kesslera: czas zdwojenia regulatora  $T_Z = 3600$  s, współczynnik wzmocnienia  $V_p = 0.0175$ .

Parametry klasycznego regulatora typu PI temperatury wody obiegowej kotła gazowego, współpracującego z zaworem gazowym liniowym, którego strukturę i jej parametry dobrano opierając się na kryterium umożliwiającym maksymalnie szybkie dochodzenie układu regulacji do temperatury zadanej, przy minimalnym przeregulowaniu: czas zdwojenia regulatora  $T_Z = 875$  s, współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego  $V_p = 0.0175$ .



Rys. 7. Wybrane przebiegi czasowe wielkości fizycznych uzyskane w procesie symulacji układu z regulatorem klasycznym (lewa kolumna) i z regulatorem fuzzy (prawa kolumna)

Fig. 7. Chosen times of physical values received in the process of simulation of a system with classic (left column) and fuzzy (right column) regulator

Parametry klasycznego regulatora typu PI temperatury wody obiegowej kotła gazowego, współpracującego z zaworem gazowym stałoprocentowym, którego strukturę i jej parametry dobrano opierając się na kryterium umożliwiającym maksymalnie szybkie dochodzenie układu regulacji do temperatury zadanej, przy minimalnym przeregulowaniu: czas zdwojenia regulatora  $T_z = 292$  [s], współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego  $V_p = 0.0175$ .

Parametry rozmytego regulatora temperatury wody obiegowej kotła gazowego z zaworem liniowym lub stałoprocentowym: typ regulatora: proporcjonalno-całkujący PI o dwóch zmiennych w poprzedniku reguły (błąd porównania  $e(k)$  w  $k$ -tej chwili, suma błędów  $\delta e(k)$  w  $k$ -tej chwili); rodzaj funkcji przynależności przyjętych zarówno dla przesłanek, jak i dla wniosków, typu: trójkątnego, Gaussa, Bella (krzywe dzwonowe); ilość funkcji przynależności zarówno dla przesłanek, jak i dla wniosków: 3, 5, 7; baza reguł: została określona w oparciu o algorytm postaci (18) oraz o ogólne równanie regulatora o strukturze PI postaci (19); bazę reguł regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wody obiegowej, kotła gazowego z zaworem liniowym lub stałoprocentowym typu PI, dla 7 funkcji przynależności zarówno dla przesłanek, jak i wniosków, przedstawiono w formie tablicy 1; odpalenie reguły regulatora rozmytego (fuzzy) zostało przeprowadzone w oparciu o zasadę Mamdaniego; proces defuzyfikacji regulatora rozmytego (fuzzy) został przeprowadzony metodą środka obszaru (COA). Dane wejściowe symulacji: czas symulacji: 20000 s; krok symulacji: zmienny; zastosowany algorytm symulacyjny: ode 45 (Dormand-Prince).

Na rysunku 7 przedstawiono wybrane przebiegi czasowe temperatury  $T_k$  na wylocie obiegu wody dla regulatora klasycznego i rozmytego i mocy kotła. W celu porównania przebiegów poszczególnych wielkości, odpowiednie przebiegi umieszczone są obok siebie (w lewej kolumnie przebiegi regulatora klasycznego, w prawej dla regulatora rozmytego).

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzono syntezę obwodu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego opierając się na teorii sterowania rozmytego oraz klasycznej teorii sterowania. Przeprowadzono symulację komputerową tych metod sterowania i na podstawie uzyskanych wyników dokonano ich analizy porównawczej. Założono, że z punktu widzenia własności dynamicznych kocioł gazowy jest elementem inercyjnym I rzędu. Współczynnik wzmocnienia statycznego w tym elemencie określono z prawa bilansu strugi ciepła pomiędzy komorą paleniska a obwodem wody obiegowej kotła gazowego. Celem badań symulacyjnych układu regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego było: wyznaczenie przebiegów czasowych charakterystycznych wielkości fizycznych w poszczególnych obwodach kotła gazowego oraz układu sterowania w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego temperatury zadanej oraz w odpowiedzi na zakłócenia: wartości opałowej gazu, wartości strumienia objętości wody obiegowej, temperatury wody obiegowej na wlocie kotła gazowego.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych poszczególnych układów regulacji temperatury wody obiegowej kotła gazowego można wysnuć następujące wnioski: wybór struktury oraz dobór nastaw dla klasycznego regulatora temperatury wody obiegowej kotła gazowego (zarówno z zaworem liniowym, jak i stałoprocentowym) oparte na liniowym kryterium „symetrycznego optimum” według C. Kesslera nie zapewniło dobrej dynamiki przebiegu temperatury wody obiegowej w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego temperatury zadanej (wystąpił długi czas dochodzenia do temperatury zadanej). Dlatego wprowadzono nowe kryterium, które umożliwiło stosunkowo szybkie dochodzenie

układu regulacji do temperatury zadanej przy minimalnym przeregulowaniu. Kryterium „symetrycznego optimum” według C. Kesslera stanowi niejako pierwszy krok dla zaprezentowanej metody.

Nowe kryterium zakłada przyjęcie regulatora klasycznego temperatury wody obiegowej kotła gazowego o strukturze PI, zarówno dla zaworu liniowego, jak i stałoprocentowego. Parametry dla tej struktury dobiera się według następującej procedury: współczynnik wzmocnienia członu P obliczamy korzystając z kryterium „symetrycznego optimum” według C. Kesslera, czas zdwojenia członu I obliczamy również korzystając z kryterium „symetrycznego optimum” według C. Kesslera, a następnie krok po kroku zmniejszamy wartość czasu zdwojenia, aż osiągniemy maksymalnie szybkie dochodzenie układu regulacji do temperatury zadanej.

Regulator rozmyty, o strukturze funkcjonalnej typu PI temperatury wody obiegowej kotła gazowego, zarówno z zaworem liniowym, jak i stałoprocentowym, pozwolił uzyskać bardzo dobrą dynamikę przebiegu temperatury wody w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego temperatury zadanej. Porównując zachowanie się regulatora rozmytego w stosunku do regulatora klasycznego w kontekście odporności na zakłócenia zewnętrzne (zmiany przepływu wody obiegowej, zmiany temperatury wody obiegowej na wlocie kotła, zmiany wartości opałowej gazu), należy uznać, iż regulator rozmyty jest zdecydowanie bardziej odporny na zakłócenia zewnętrzne od regulatora klasycznego.

Parametry regulatora rozmytego są uzależnione od ilości funkcji przynależności dla przesłanek i wniosków w regulatorze rozmytym oraz od rodzaju zastosowanych funkcji przynależności dla przesłanek i wniosków w regulatorze rozmytym – funkcje przynależności typu: bella, Gaussa, trójkątne.

Najbardziej optymalne struktury regulatora rozmytego temperatury wody obiegowej kotła gazowego uzyskano posługując się funkcjami przynależności typu bella (krzywe dzwonowe), a najgorsze rezultaty uzyskano posługując się funkcjami przynależności typu trójkątnego. Pośrednie rezultaty uzyskano dla funkcji przynależności typu Gaussa.

## LITERATURA

1. Drankov D. i inni: *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1996.
2. Kalus M., Październik G., Skoczowski T.: *Regulacja adaptacyjna temperatury wody obiegowej kotła pracującego w sieci ciepłowniczej*, Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Zeszyt 200/99, Warszawa 1999.
3. Kalus M.: *Regulacja w logice rozmytej w zastosowaniu do systemów ciepłowniczych*, Opracowanie dla ISS<sup>2</sup>u, Nr etapu 956 7.1, Chorzów – marzec 2000.
4. Kessler C.: *Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise*, Regelungstechnik 12/54, 1/55, 2/55.
5. Lichtenberg M.: *Generierung Kennliniengleicher Fuzzy – Regler aus den Parametern Konventioneller PID – Regler*, atp 2/94.
6. Milecki A.: *Wykorzystanie logiki rozmytej w technice sterowania*, PAK 7/94.
7. Rutkowska D. i inni: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, PWN, Warszawa – Łódź 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Janusz Lewandowski