

621.365.5
681.51
510.6

Marian KALUS
Tadeusz SKOCZKOWSKI

REGULACJA W LOGICE ROZMYTEJ TEMPERATURY STALOWEJ RURY W PROCESIE WYŻARZANIA INDUKCYJNEGO

STRESZCZENIE *Przeprowadzono syntezę obwodu regulacji temperatury stalowej rury w procesie nagrzewania indukcyjnego, w oparciu o teorię sterowania rozmytego oraz w oparciu o klasyczną teorię sterowania. Przeprowadzono symulację komputerową obydwu metod sterowania i na podstawie uzyskanych wyników, dokonano (ich) analizy porównawczej, głównie w kontekście odporności na zakłócenia zewnętrzne (temperatury otoczenia oraz mocy zasilania falownika wyżarzarki indukcyjnej).*

Słowa kluczowe: *nagrzewanie indukcyjne, sterowanie rozmyte, kryterium Kesslera.*

dr inż. Marian KALUS
Instytut Systemów Sterowania w Katowicach

prof. dr hab. inż. Tadeusz SKOCZKOWSKI
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki
Instytut Elektrotechniki

1. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU GRZANIA INDUKCYJNEGO STALOWYCH RUR

1.1. Zagadnienia dotyczące pola temperaturowego

Stan dynamiczny pola temperaturowego wzdłuż promienia r nieskończenie długiej rury opisuje równanie różniczkowe cząstkowe postaci [5]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{w(r,t)^{*})}{\lambda} \quad (1)$$

Po wprowadzeniu następujących oznaczeń:

$$T(r_i, t) = T \quad ; \quad w(r_i, t) = w \quad (2)$$

oraz zastąpieniu pochodnych cząstkowych funkcji T względem r przez odpowiednie ilorazy różnicowe w równaniu postaci (1) otrzymujemy następujący układ $(n-1)$ równań różniczkowych zwyczajnych:

$$\frac{dT(r_i, t)}{dt} = \chi \cdot \frac{r_i - \frac{\Delta r}{2}}{r_i \cdot (\Delta r)^2} \cdot [T(r_{i-1}, t) - T(r_i, t)] + \chi \cdot \frac{r_i + \frac{\Delta r}{2}}{r_i \cdot (\Delta r)^2} \cdot [T(r_{i+1}, t) - T(r_i, t)] + \frac{\chi \cdot w(r_i, t)}{\lambda} \quad (3)$$

dla

$$i = 1, 2 \dots (n-1)$$

gdzie:

$$\Delta r = \frac{d}{n}$$

$$d = r_n - r_w$$

$$r_i = r_w + i \cdot \Delta r \quad \text{dla} \quad i = 0, 1 \dots n$$

*) Patrz: oznaczenia symboli w rozdziale 4.

stąd:

$$r_0 = r_w \quad ; \quad r_n = R$$

Rozpisując układ równań różnicowo-różniczkowych postaci (3) dla n - ilości warstw podziału otrzymujemy co następuje:

$$\frac{dT(r_1, t)}{dt} = \frac{\chi}{2 \cdot \Delta r^2} \cdot T(r_0, t) + \frac{3}{2} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_2, t) - \frac{2 \cdot \chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_1, t) + \frac{\chi \cdot w(r_1, t)}{\lambda}$$

$$\frac{dT(r_2, t)}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_1, t) + \frac{5}{4} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_3, t) - \frac{2 \cdot \chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_2, t) + \frac{\chi}{\lambda} \cdot w(r_2, t)$$

$$\frac{dT(r_2, t)}{dt} = \frac{5}{6} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_1, t) + \frac{7}{6} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_3, t) - \frac{2 \cdot \chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_2, t) + \frac{\chi}{\lambda} \cdot w(r_2, t)$$

.....

.....

$$\frac{dT(r_k, t)}{dt} = \frac{2 \cdot k - 1}{2 \cdot k} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_{k-1}, t) + \frac{2 \cdot k + 1}{2 \cdot k} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_{k+1}, t) - \frac{2 \cdot \chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_k, t) + \frac{\chi}{\lambda} \cdot w(r_k, t) \quad (4)$$

.....

.....

$$\frac{dT(r_{n-1}, t)}{dt} = \frac{2 \cdot (n-1) - 1}{2 \cdot (n-1)} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_{n-2}, t) + \frac{2 \cdot (n-1) + 1}{2 \cdot (n-1)} \cdot \frac{\chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_n, t) - \frac{2 \cdot \chi}{\Delta r^2} \cdot T(r_{n-1}, t) + \frac{\chi}{\lambda} \cdot w(r_{n-1}, t)$$

oraz dodatkowo dwa równania wynikające z przyjętych warunków brzegowych [13]:

- temperatura $T(r_0, t)$ w ścianie wewnętrznej rury określona jest prawem wymiany ciepła przez konwekcję:

$$-\left[\lambda \cdot \frac{T(r_0, t) - T(r_1, t)}{\Delta r} \right] = \alpha_1 (T(r_0, t)) \cdot T(r_0, t) \quad (5)$$

- temperatura na powierzchni rury określona jest prawem wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie:

$$-\lambda \cdot \left[\frac{T(r_n, t) - T(r_{n-1}, t)}{\Delta r} \right] = \varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T(r_n, t) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_2 \cdot [T(r_n, t) - T_o] \quad (6)$$

W zależnościach postaci (5) i (6) wprowadzono następujące oznaczenia:

- α_1 - współczynnik przewodnictwa wewnętrznego;
- α_2 - współczynnik przewodnictwa zewnętrznego;
- ε - emisyjność całkowita;
- C_o - stała promieniowania.

1.2. Określenie funkcji opisującej przestrzenny rozkład wewnętrznych źródeł ciepła

Głębokość wnikania fali elektromagnetycznej do metalu określa następująca zależność [19, 21]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_o \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (7)$$

Parametr Δ interpretuje się jako głębokość wnikania zastępczego prądu i definiuje jako głębokość, przy której wartość prądu wynosi 36,7% jego wartości na powierzchni wsadu. Aby więc wyznaczyć głębokość wnikania Δ należy pomierzyć częstotliwość prądu nagrzewającego f i określić przewodność elektryczną wsadu (żelaza) – γ oraz przenikalność magnetyczną względną μ na poszczególnych warstwach podziału wzdłuż promienia r nagrzewanej rury (walca). Przenikalność magnetyczna względna μ jest funkcją temperatury wsadu T oraz natężenia pola magnetycznego H ($\mu = f(T, H)$).

Zależność μ od H i T uwzględniona została dla stalowej rury w następujący sposób [17]:

$$\mu(H, T) = \mu(r_{i+1}) \cdot \Psi(T) \quad (8)$$

gdzie:

$$\mu(r_{i+1}) = \frac{\mu_e}{\left(1 - \frac{R - r_{i+1}}{x_1}\right)^2} - \text{wzór Nejmana} \quad (9)$$

oraz

$$\Psi(T) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } T < T_c \\ \frac{\left(1 - \frac{R - r_{i+1}}{x_1}\right)^2}{\mu_r} & \text{dla } T \geq T_c \end{cases} \quad (10)$$

dla $i = 0 \dots n-1$.

Przenikalność magnetyczna względna μ_r na powierzchni zostanie określona z uśrednionej charakterystyki magnesowania przy założeniu, że znana jest wartość natężenia pola magnetycznego H_e na powierzchni rury. Wartość natężenia pola magnetycznego H_e zostanie określona przez pomiar prądu wzbudnika.

Na podstawie literatury [18, 21] niezłe przybliżenie przenikalności magnetycznej względnej μ_r w funkcji natężenia pola magnetycznego H_e (z dokładnością do 3%) daje zależność aproksymująca postaci (11) lub (12), która obowiązuje dla pól silnych ($H_e > 4000 \text{ A/m}$):

$$\mu_r / \mu_o = 8130 \cdot H_e^{-0.894} \quad (11)$$

względnie

$$\mu_r = 506896 / H_e^{0.895} \quad (12)$$

W sytuacji, gdy górne warstwy w ścianie stalowej rury osiągają temperaturę wyższą od temperatury punktu Curie, tracą one własności ferromagnetyczne i tworzą materiał o własnościach paramagnetycznych ($\mu = 1$). Powstaje zatem problem: jak wyznaczyć przenikalność magnetyczną względną μ_k na granicy tych ośrodków. Zagadnienie to zostało rozwiązane w oparciu o teorię modelu dwuwarstwowego, na podstawie której stworzono algorytm wyznaczania przenikalności magnetycznej względnej na granicy dwóch ośrodków – o własnościach paramagnetycznych i ferromagnetycznych.

Reasumując, mając dane: częstotliwość prądu nagrzewającego f , przenikalność względną $\mu(H, T)$ i konduktywność żelaza $\gamma(T)$, można z zależności (7) oraz z równań (8) do (12), a także w oparciu o model dwuwarstwowy obliczyć głębokość wnikania $\Delta(r_{i+1})$ na poszczególnych warstwach podziału w ścianie stalowej rury i na ich podstawie wyznaczyć objętościowe gęstości mocy wewnętrznych źródeł ciepła $w(r_i, n)$.

Zależność prądu we wsadzie w funkcji promienia bieżącego rury określona jest równaniem:

$$I(r_i, n) = I(r_{i+1}, n) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta r}{\Delta(r_{i+1})}\right) \quad (13)$$

w którym przyjęto następujące oznaczenia:

$$\begin{aligned} \Delta r &= \frac{d}{n} && \text{– promień współśrodkowego pierścienia podziału;} \\ \Delta(r_{i+1}) &&& \text{– głębokość wnikania fali w warstwie } r_{i+1}. \end{aligned}$$

gdzie:

$$d = r_n - r_w$$

Podnosząc obustronnie do kwadratu równanie postaci (13) otrzymujemy co następuje:

$$I^2(r_i, n) = I^2(r_{i+1}, n) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \Delta r}{\Delta(r_{i+1})}\right) \quad (14)$$

Kwadrat prądu w warstwie r_i określony zależnością postaci (14) jest proporcjonalny do mocy objętościowej $w(r_i, n)$, wydzielonej na tej głębokości. Aby zagadnienie rozwiązać do końca należy wyznaczyć rezystancję i -tej warstwy:

$$R(r_i) = \rho(r_i) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{isr}}{\Delta r \cdot L} = \rho(r_i) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(r_i + \frac{\Delta r}{2}\right)}{\Delta r \cdot L} \quad (15)$$

dla $i = 0 \dots n-1$.

W równaniu (15) przyjęto następujące oznaczenia:

ρ – rezystywność żelaza;
 L – długość wzbudnika.

Dzieląc wyrażenie postaci (15) przez zależność wyrażającą objętość i -tej warstwy, uzyskano rezystancję i -tej warstwy przypadającą na jednostkę objętości:

$$R'(r_i) = \frac{R(r_i)}{V(r_i)} = \rho(r_i) \cdot \frac{2 \cdot \left(r_i + \frac{\Delta r}{2}\right)}{(r_{i+1}^2 - r_i^2) \cdot \Delta r \cdot L^2} \quad (16)$$

dla $i = 0 \dots n-1$.

Mnożąc zależność postaci (14) przez wyrażenie postaci (16) uzyskano poszukiwane objętościowe gęstości wewnętrznych źródeł ciepła:

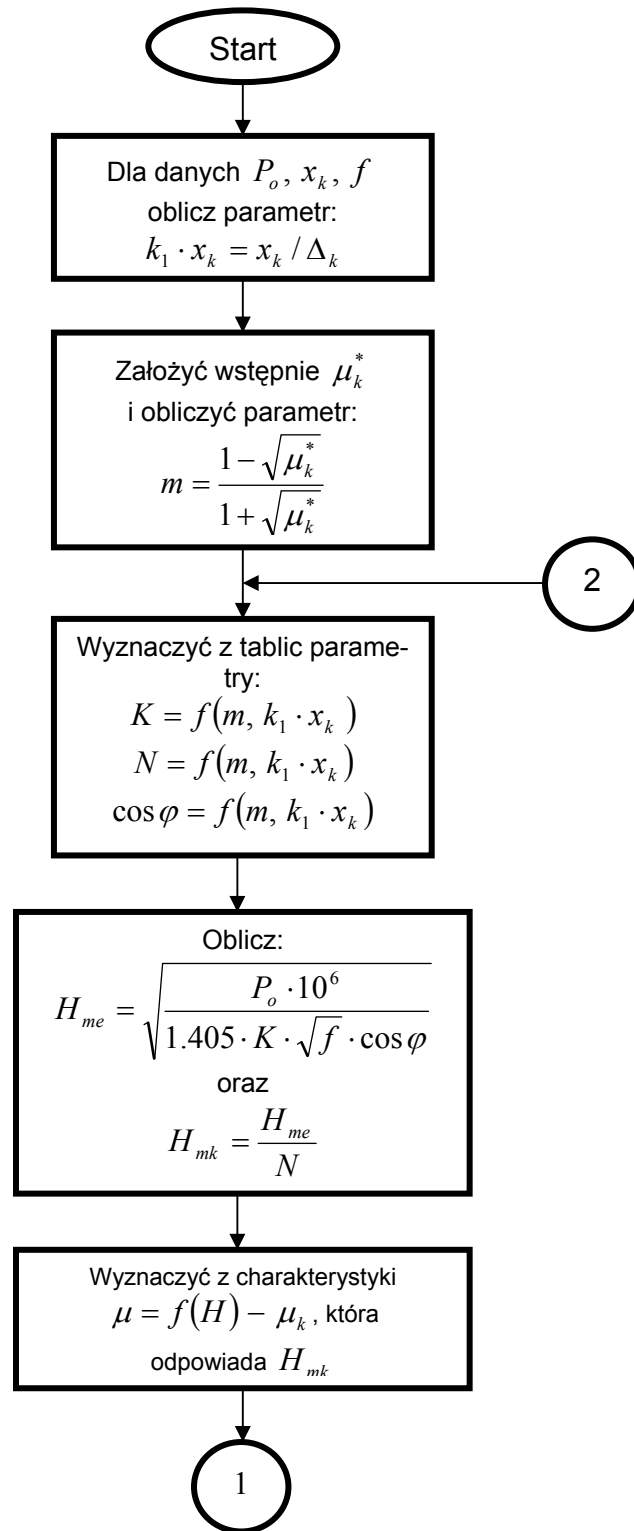
$$w(r_i, n) = I^2(r_i, n) \cdot R'(r_i) = I^2(r_{i+1}, n) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \Delta r}{\Delta(r_{i+1})}\right) \cdot \frac{2 \cdot \left(r_i + \frac{\Delta r}{2}\right)}{(r_{i+1}^2 - r_i^2) \cdot \Delta r \cdot L^2} \cdot \rho(r_i) \quad (17)$$

dla $i = 1 \dots n-1$.

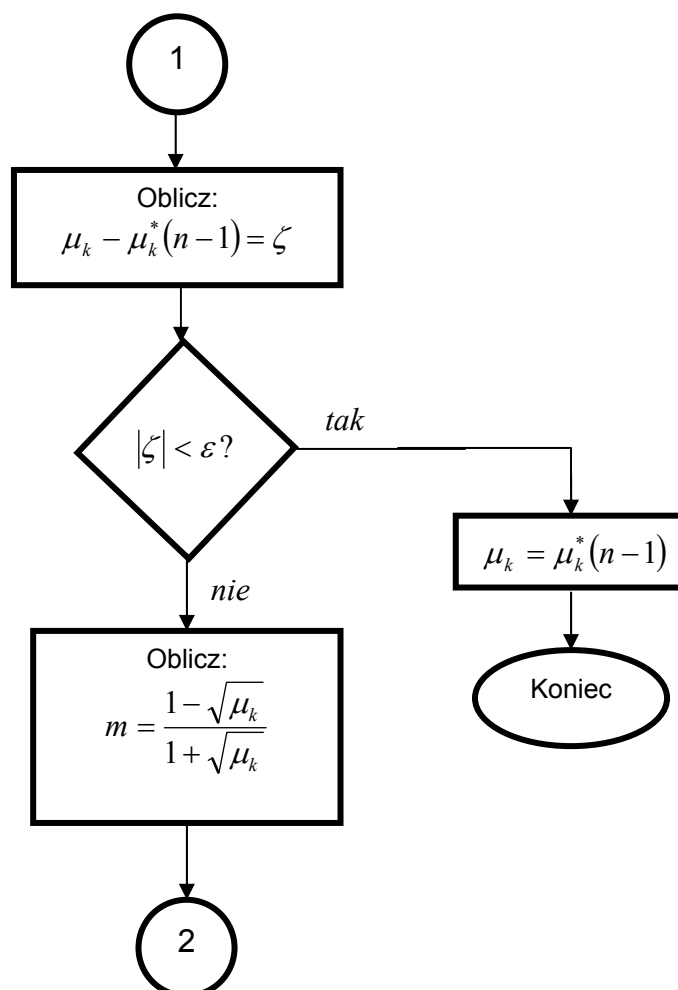
Rozpisując zależność postaci (17) na wszystkie warstwy podziału, otrzymujemy następujący układ równań:

$$\begin{aligned} w(r_{n-1}, n) &= I^2(r_n, n) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \Delta r}{\Delta(r_n)}\right) \cdot \frac{2 \cdot \left(r_{n-1} + \frac{\Delta r}{2}\right)}{(r_n^2 - r_{n-1}^2) \cdot \Delta r \cdot L^2} \cdot \rho(r_{n-1}) \\ w(r_{n-2}, n) &= I^2(r_{n-1}, n) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \Delta r}{\Delta(r_{n-1})}\right) \cdot \frac{2 \cdot \left(r_{n-2} + \frac{\Delta r}{2}\right)}{(r_{n-1}^2 - r_{n-2}^2) \cdot \Delta r \cdot L^2} \cdot \rho(r_{n-2}) \\ &\dots\dots\dots \\ w(r_k, n) &= I^2(r_{k+1}, n) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \Delta r}{\Delta(r_{k+1})}\right) \cdot \frac{2 \cdot \left(r_k + \frac{\Delta r}{2}\right)}{(r_{k+1}^2 - r_k^2) \cdot \Delta r \cdot L^2} \cdot \rho(r_k) \quad (18) \\ &\dots\dots\dots \\ w(r_1, n) &= I^2(r_2, n) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \Delta r}{\Delta(r_2)}\right) \cdot \frac{2 \cdot \left(r_1 + \frac{\Delta r}{2}\right)}{(r_2^2 - r_1^2) \cdot \Delta r \cdot L^2} \cdot \rho(r_1) \end{aligned}$$

Algorytm wyznaczania przenikalności magnetycznej względnej na granicy dwóch ośrodków w oparciu o teorię modelu dwuwarstwowego przedstawiono w formie schematu blokowego, który ilustruje rys.1.



Rys.1. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania przenikalności względnej μ_k na granicy dwóch ośrodków (c.d. na następnej stronie).



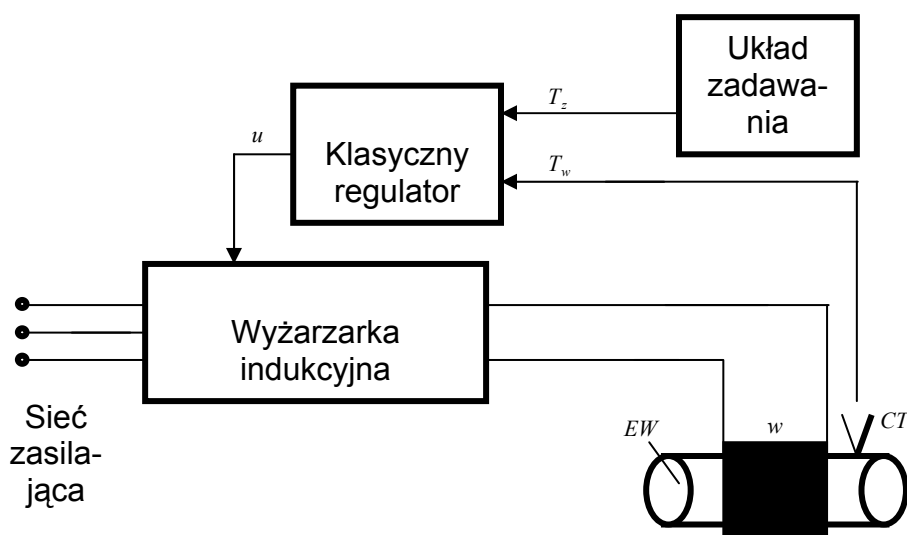
Rys.1. (c.d. z poprzedniej strony) Schemat blokowy algorytmu wyznaczania przenikalności względnej μ_k na granicy dwóch ośrodków.

Na rysunku 1 przyjęto następujące oznaczenia:

- $\mu_k^*(n-1)$ - wartość przenikalności względnej przyjętej wstępnie z poprzedniego cyklu obliczeniowego;
- P_o - jest zdefiniowany w następujący sposób $P_o = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot r_n \cdot L}$;
- x_k - jest zdefiniowany w następujący sposób $x_k = r_n - r_k$;
- r_k - oznacza promień najniższej warstwy, w której temperatura przekroczyła już punkt Curie T_c .

2. KONCEPCJA OBWODU REGULACJI TEMPERATURY STAŁOWEJ RURY W PROCESIE WYŻARZANIA INDUKCYJNEGO W OPARCIU O KLASYCZNĄ TEORIĘ STEROWANIA

Schemat ideowy obwodu regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego w oparciu o klasyczną teorię sterowania przedstawiono na rys.2. Zasada działania układu regulacji temperatury stalowej rury polega na sterowaniu wartością mocy dostarczanej z układu falownika napięciowego do obwodu wzбудnika. Sygnał u z wyjścia regulatora temperatury steruje wartością mocy dostarczanej do gałęzi obwodu wzbudnika wyżarzarki. Wyżarzany element (w rozpatrywanym przypadku stalowa rura) z punktu widzenia teorii sterowania, należałoby rozpatrywać w kategorii obiektów o stałych rozłożonych. Jednak ze względów praktycznych (by móc skorzystać z liniowego kryterium „Optimum wartości” według C. Kesslera [9, 11, 27]) wyżarzany wsad wraz z wyżarzarką potraktowano (nie popełniając większych błędów) jako element inercyjny I-go rzędu.



Rys.2. Schemat ideowy obwodu regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, w oparciu o klasyczną teorię sterowania.

Na rysunku 2 przyjęto następujące oznaczenia:

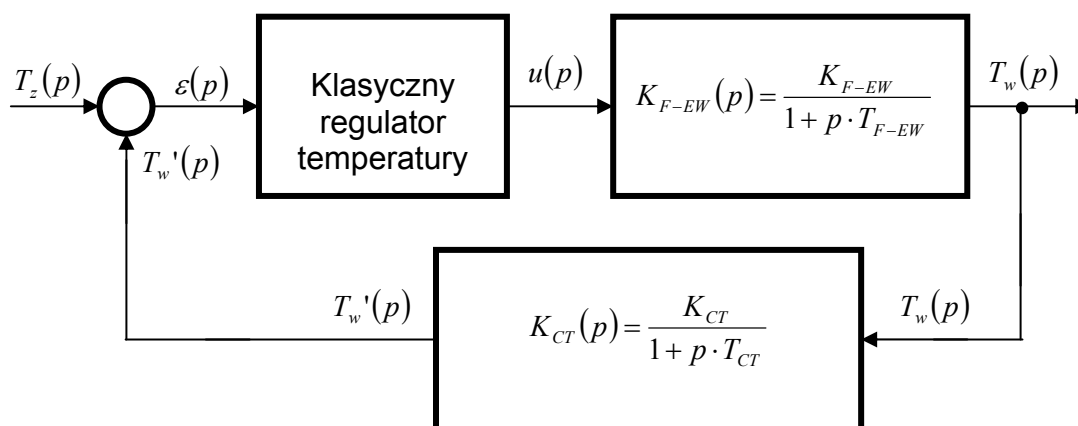
T_z - temperatura zadana [°C, deg];

T_z T_w - temperatura wyżarzania [°C, deg];

- u - sygnał wyjściowy (sterujący) z klasycznego regulatora temperatury [V];
- w - wzbudnik;
- EW - element wyżarzany (stalowa rura);
- CT - czujnik temperatury.

2.1. Obwód regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego

Schemat blokowy obwodu regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego przedstawiono na rys.3. Schemat ten zbudowano w oparciu o schemat ideowy obwodu regulacji z rys.2.



Rys.3. Schemat blokowy obwodu regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego.

Na rysunku 3 przyjęto następujące oznaczenia:

- $T_z(p)$ - temperatura zadana [V];
- $\varepsilon(p) = T_z(p) - T_w'(p)$ - błąd porównania [V];
- $u(p)$ - sygnał wyjściowy (sterujący) z regulatora temperatury [V];
- $K_{F-EW}(p) = \frac{T_w(p)}{u(p)}$ - transmitancja operatorowa wyżarzarki wraz z elementem wyżarzonym (stalową rurą) [deg/V];
- K_{F-EW} - transmitancja statyczna wyżarzarki wraz z elementem wyżarzonym [deg/V];

T_{F-EW}	- sumaryczna stała czasowa wyżarzarki i elementu wyżarzanego [s];
$K_{CT}(p) = \frac{T'_w(p)}{T_w(p)}$	- transmitancja operatorowa czujnika temperatury [V/deg];
K_{CT}	- transmitancja statyczna czujnika temperatury [V/deg];
T_{CT}	- stała czasowa czujnika temperatury [s].

2.2. Wybór struktury regulatora temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego oraz dobór parametrów do tej struktury

Syntezę układu regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, przeprowadzono w oparciu o kryterium „Optimum wartości” według C. Kesslera [9, 11, 27]. Punktem wyjścia do syntezy regulatora temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego jest transmitancja otwartego układu regulacji (bez regulatora), którą uzyskano w oparciu o schemat blokowy przedstawiony na rys.3:

$$K_o(p) = \frac{K_{F-EW} \cdot K_{CT}}{(1 + p \cdot T_{F-EW}) \cdot (1 + p \cdot T_{CT})} \quad (19)$$

W oparciu o kryterium „Optimum wartości” według C. Kesslera przyjęto regulator temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, o strukturze proporcjonalno-całkującej typu PI.

Parametry tej struktury opisują następujące zależności:

- czas zdwojenia członu I:

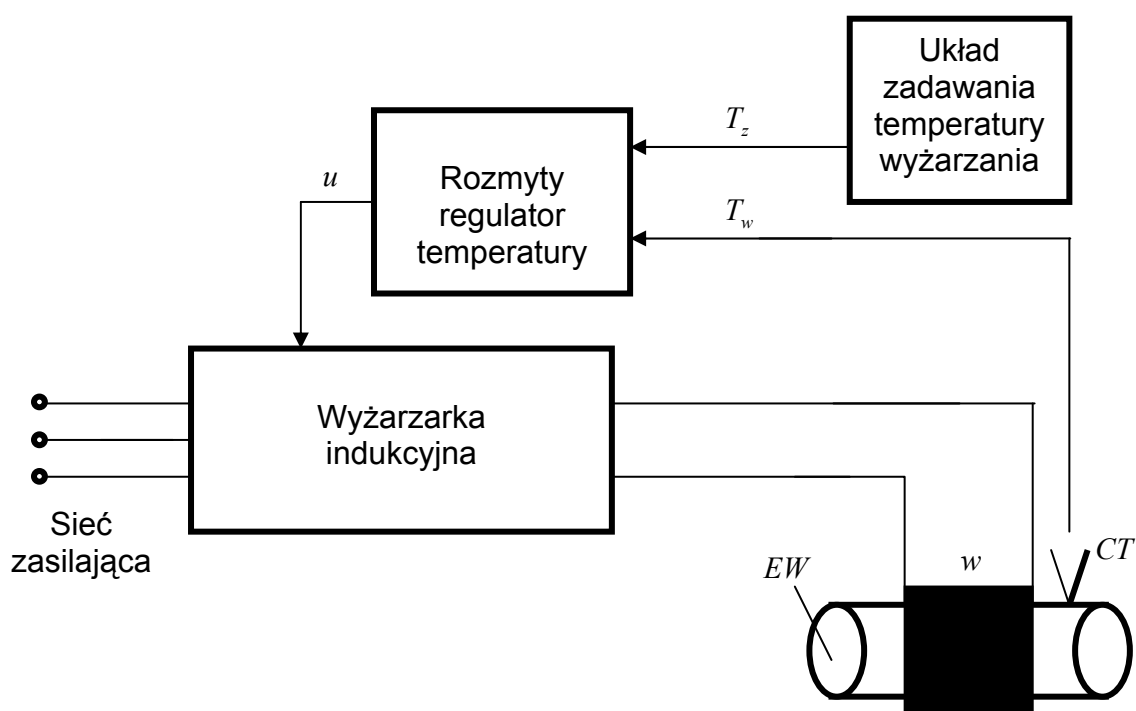
$$T_z = T_{F-EW} \quad (20)$$

- współczynnik wzmocnienia członu P:

$$V_P = \frac{T_{F-EW}}{2 \cdot K_{F-EW} \cdot K_{CT} \cdot T_{CT}} \quad (21)$$

3. KONCEPCJA OBWODU REGULACJI TEMPERATURY STALOWEJ RURY W PROCESIE WYŻARZANIA INDUKCYJNEGO W OPARCIU O TEORIĘ STEROWANIA ROZMYTEGO (FUZZY)

Schemat ideowy obwodu regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego w oparciu o teorię sterowania rozmytego (fuzzy) przedstawiono na rys.4. Zasada działania układu regulacji temperatury stalowej rury polega na sterowaniu wartością mocy dostarczanej z układu falownika napięciowego do obwodu wzbudnika wyżarzanego elementu. Sygnał u z wyjścia regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury, steruje wartością mocy dostarczanej do gałęzi obwodu wzbudnika wyżarzarki.



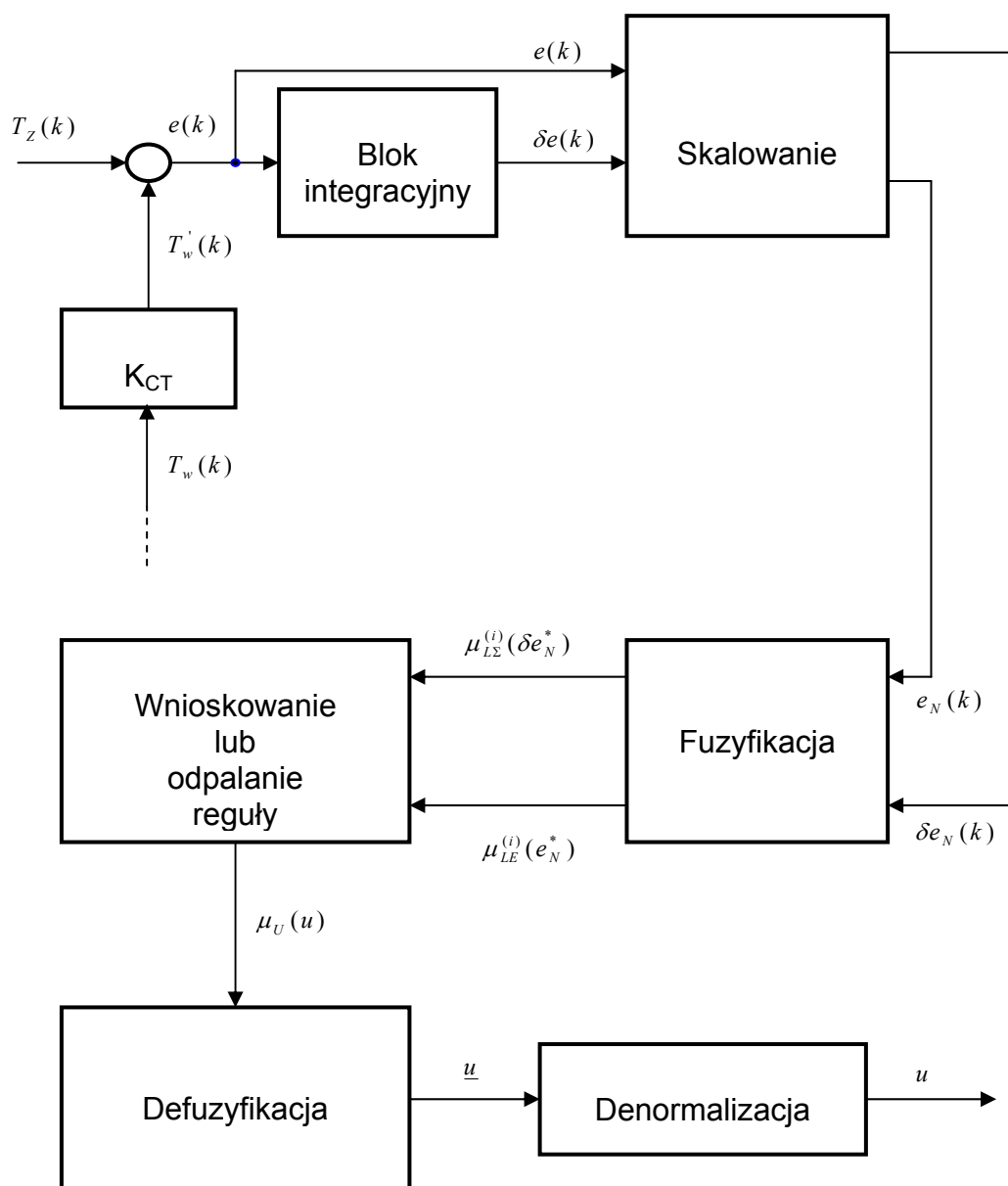
Rys.4. Schemat ideowy obwodu regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, w oparciu o teorię sterowania rozmytego (fuzzy).

Na rysunku 4 przyjęto następujące oznaczenia:

- T_z - temperatura zadana [$^{\circ}\text{C}$, deg];
- T_w - temperatura wyżarzania [$^{\circ}\text{C}$, deg];
- u - sygnał wyjściowy (sterujący) z regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury [V];

w - wzбудnik;
 EW - element wyżarzany (stalowa rura);
 CT - czujnik temperatury.

3.1. Struktura wewnętrzna regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego



Rys.5. Struktura obliczeniowa regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego.

Wstępnie przyjęto regulator rozmyty (fuzzy) o strukturze proporcjonalno-całkującej typu PI. Schemat wewnętrzny struktury obliczeniowej regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI, przedstawiono na rys.5 [1, 20].

Na rysunku 5 przyjęto następujące oznaczenia:

- $T_w(k)$ - temperatura wsadu w procesie wyżarzania indukcyjnego w k – tej chwili [$^{\circ}C, deg$];
- $T'_w(k)$ - sygnał napięciowy z przetwornika pomiarowego temperatury, proporcjonalny do temperatury rzeczywistej $T_w(k)$ w k – tej chwili [V];
- $K_{CT} = \frac{T'_w(k)}{T_w(k)} = \frac{T'_w(k)_{\max}}{T_w(k)_{\max}}$ - wzmacnienie przetwornika pomiarowego temperatury ry $\left[\frac{V}{^{\circ}C}, \frac{V}{deg} \right]$;
- $T_z(k)$ - temperatura zadana w k – tej chwili [V];
- $e(k)$ - błąd porównania w k – tej chwili [V];

$$e(k) = T_z(k) - T'_w(k) \quad (22)$$

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

$$\delta e(k) = \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \quad (23)$$

- $e_N(k)$ - błąd porównania w k – tej chwili po normalizacji [V];
- $\delta e_N(k)$ - suma błędów w k – tej chwili po normalizacji [V];
- δe_N^* - bieżąca wartość sumy błędów (w chwili pomiaru – odczytu) [V];
- e_N^* - 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 $i = 1 \dots 9$ [wielkość bezwymiarowa];
- $\mu_{LE}^{(i)}(e_N^*)$ - 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 $i = 1 \dots 9$ [wielkość bezwymiarowa];

$\mu_u(u_N)$	- funkcja przynależności odwzorowująca wartość ogólnego wyjścia sterującego [wielkość bezwymiarowa];
$\mu_{CLU}^{(i)}(u_N)$	- ściśnięta funkcja przynależności dla i – tej reguły, przy czym $i = 1 \dots 49$, lub $i = 1 \dots 25$, względnie $i = 1 \dots 9$ [wielkość bezwymiarowa];
$\underline{u}_N$	- 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].

3.1.1. Skalowanie (normalizacja)

Regulator rozmyty (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI, posiada dwie zmienne w poprzedniku reguły algorytmu regulatora. Są to błąd porównania w k – tej chwili $e(k)$ i suma błędów $\delta e(k)$ określone kolejno zależnościami (22) i (23).

W procedurze skalowania wejścia (normalizacji) rozpatrywane zmienne są normalizowane przy użyciu następującej zależności:

$$e_n = N_e \cdot e \quad (24)$$

gdzie:

$$N_e = \begin{bmatrix} N_{e(k)} & 0 \\ 0 & N_{\delta e(k)} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$e = [e(k) \quad \delta e(k)]^T \quad (26)$$

$$e_N = [e_N(k) \quad \delta e_N(k)]^T \quad (27)$$

przy czym:

- $N_{e(k)}, N_{\delta e(k)}$ - współczynniki normalizujące (korygujące) odpowiednio zmienne: błędu porównania $e(k)$ i sumy błędów porównania $\delta e(k)$;
- $e(k), \delta e(k)$ - błąd porównania i suma błędów porównania przed normalizacją;
- $e_N(k), \delta e_N(k)$ - błąd porównania i suma błędów porównania po normalizacji.

3.1.2. Fuzyfikacja

Regulator rozmyty (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI, w sensie ogólnym jest opisany przez następujący algorytm:

Jeżeli $e_N(k)$ jest <symbol własności> I $\delta e_N(k)$ jest <symbol własności>

TO u jest <symbol własności> (28)

3.1.3. Określenie bazy reguł regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI

$e_N(k)$	$\delta e_N(k)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Rys.6. Baza reguł regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI – dla przypadku 7-miu funkcji przynależności.

Bazę reguł regulatora rozmytego (fuzzy) typu PI określono w oparciu o algorytm postaci (28) oraz o ogólne równanie regulatora o strukturze proporcjonalno – całkującej postaci:

$$u_N(k) = e_N(k) + \delta e_n(k) \quad (29)$$

Bazę reguł regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wsadu w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI – dla przypadku 7-miu funkcji przynależności przedstawiono w formie tablicy, którą ilustruje rys.6.

Użyte na rys.6 funkcje przynależności zostały zdefiniowane w następujący sposób:

- NB – duży ujemny;
- NM – średni ujemny;
- NS – mały ujemny;
- ZO – zero;
- PS – mały dodatni;
- PM – średni dodatni;
- PB – duży dodatni.

3.1.4. Odpalanie reguły (wnioskowanie) regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI

Regulator rozmyty (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI jest opisany przez algorytm postaci (28) i o ogólne równanie regulatora o strukturze proporcjonalno – całkującej postaci (29), którego strukturę w formie bazy reguł przedstawia rys.6 – dla przypadku 7-miu funkcji przynależności.

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:

$$E = \Sigma = U = N \quad (30)$$

przy czym:

- $i = 1 \dots 49$ – dla przypadku 7-miu funkcji przynależności;
- $i = 1 \dots 25$ – dla przypadku 5-ciu funkcji przynależności;
- $i = 1 \dots 9$ – dla przypadku 3-ch funkcji przynależności.

Bieżący znormalizowany wektor wejściowy dla regulatora rozmytego (fuzzy) o strukturze PI przedstawia się następująco:

$$\mathbf{e}_N^* = \begin{bmatrix} e_N^* & \delta e_N^* \end{bmatrix} \quad (31)$$

Dla bieżącego znormalizowanego wektora wejściowego postaci (31) 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-miu funkcji przynależności;
- $i = 1 \dots 25$ – dla przypadku 5-ciu funkcji przynależności;
- $i = 1 \dots 9$ – dla przypadku 3-ch funkcji przynależności.

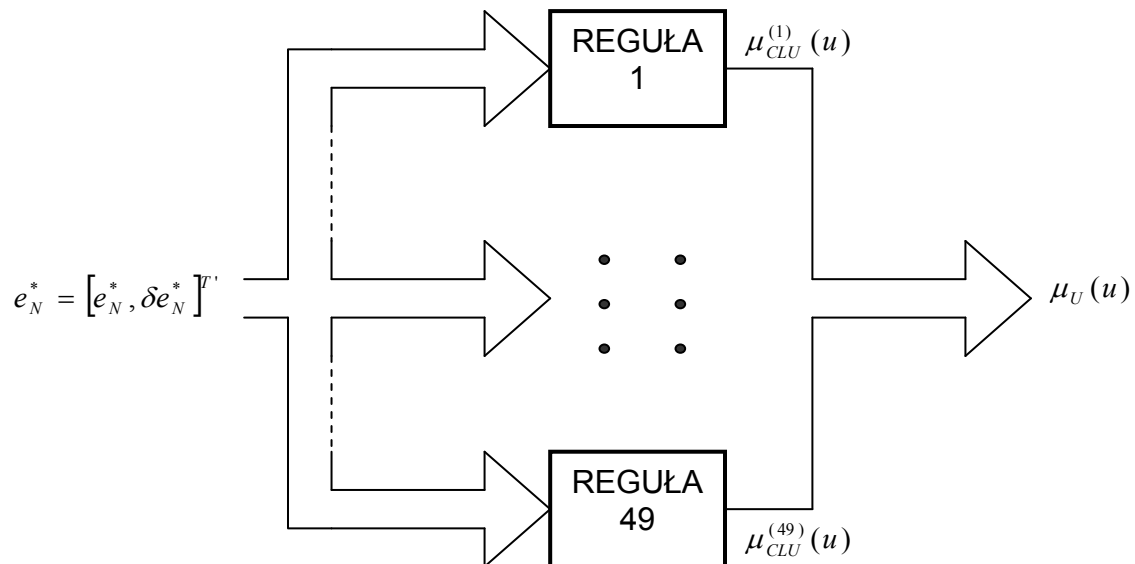
Wówczas funkcja przynależności $\mu_u(u)$ (dla przypadku 7-miu funkcji przynależności) odwzorowująca wartość ogólnego wyjścia sterującego, jest powiązana ze ściśniętymi funkcjami przynależności dla każdej reguły według następującej zależności:

$$\bigcap_u: \mu_u(u) = \max(\mu_{CLU}^{(1)}(u), \dots, \mu_{CLU}^{(49)}(u)) \quad (32)$$

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

$$\mu_{CLU}^{(i)}(u) = \min\{\min(\mu_{e_N}^{(i)}(e_N^*), \mu_{\delta}^{(i)}(\delta e_N^*)), \mu_u^{(i)}(u)\} \quad (33)$$

dla $i = 1 \dots 49$.



Rys.7. Schemat ideowy przedstawiający zasadę odpalania reguły (wnioskowania) regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI (dla 7-miu funkcji przynależności).

Schemat ideowy przedstawiający zasadę odpalania reguły (wnioskowania) regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI – dla przypadku 7-miu funkcji przynależności, ilustruje rys.7.

3.1.5. Defuzyfikacja

Proces defuzyfikacji regulatora rozmytego (fuzzy) temperatury wsadu w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI, przeprowadzono w oparciu o metodę środka obszaru (COA).

W przypadku dyskretnym ($u = \{u_1, \dots, u_l\}$) zależność ma postać:

$$\underline{u} = \frac{\sum_{k=1}^l u_k \cdot \mu_u(u_k)}{\sum_{k=1}^l \mu_u(u_k)} \quad (34)$$

W przypadku ciągłym otrzymujemy:

$$\underline{u} = \frac{\int u \cdot \mu_u(u) du}{\int_u \mu_u(u) du} \quad (35)$$

gdzie:

$\int$ - jest klasyczną całką.

3.1.6. Denormalizacja

Procedura denormalizacji w regulatorze rozmytym (fuzzy) temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego typu PI, określa następująca zależność:

$$u = K_u \cdot \underline{u} \quad (36)$$

w której współczynnik denormalizacji K_u jest zdefiniowany w następujący sposób:

$$K_u = \frac{u_{\max}}{\underline{u}_{\max}} \quad (37)$$

gdzie:

- $u_{\max}$ - oznacza maksymalną wartość sygnału sterującego w układzie sterowania wyżarzarki, przy której w gałęzi wzбудnika wydziela się maksymalna wartość mocy czynnej;
- $\underline{u}_{\max}$ - oznacza maksymalną wartość sterującą otrzymaną w procesie defuzyfikacji;

4. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADÓW REGULACJI TEMPERATURY STALOWEJ RURY W PROCESIE WYŻARZANIA INDUKCYJNEGO

Celem badań symulacyjnych układów regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego było:

- Wyznaczenie przebiegów czasowych charakterystycznych wielkości fizycznych w poszczególnych obwodach falownika wyżarzarki indukcyjnej, wsadu i wzбудnika oraz układu sterowania w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego temperatury zadanej.
- Wyznaczenie przebiegów czasowych charakterystycznych wielkości fizycznych w poszczególnych obwodach falownika wyżarzarki indukcyjnej, wsadu i wzбудnika oraz układu sterowania w odpowiedzi na wymuszenie w postaci trapezowej funkcji temperatury zadanej.
- Wyznaczenie przebiegów czasowych charakterystycznych wielkości fizycznych w poszczególnych obwodach falownika wyżarzarki indukcyjnej, wsadu i wzбудnika oraz układu sterowania w odpowiedzi na zakłócenia: temperatury otoczenia i mocy zasilania falownika wyżarzarki indukcyjnej.

Narzędziem wykorzystanym do budowy modeli układów regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego był pakiet SIMULINK wchodzący w skład programu „MATLAB-5.2” pracującego w środowisku WINDOWS [16, 28]. Do budowy regulatora rozmytego (fuzzy) wykorzystano blok „SIMULINK Fuzzy” wchodzący w skład narzędzi SIMULINKA zwanego

„Blocksets & Toolboxes”. Poszczególne układy regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, zbudowano z elementów statycznych i dynamicznych pochodzących z wbudowanych bibliotek SIMULINKA. Skorzystano również z możliwości definiowania własnych bloków poprzez łączenie i grupowanie elementów już istniejących (tworzenie podsystemów).

Badania symulacyjne poszczególnych układów regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, przeprowadzono dla następujących danych znamionowych:

- Dane stalowej rury:
 - promień zewnętrzny rury $r_s = 0.11$ m;
 - promień wewnętrzny rury $r_0 = 0.1$ m;
 - długość rury $l_z = 2.0$ m;
 - ilość warstw podziału $n = 5$;
 - współśrodkowy pierścień podziału $\Delta r = 2 \times 10^{-3}$ m;
 - współczynnik przewodności cieplnej $\lambda = 37.2 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ \text{K}}$;
 - gęstość masy (stali) $\gamma = 7800 \text{ kg/m}^3$;
 - ciepło właściwe $C = 674 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{K}}$;
 - współczynnik dyfuzji $\chi = \frac{\lambda}{C \cdot \gamma} = 7.1 \times 10^{-6} \frac{\text{W} \cdot \text{m}^2}{\text{J}}$;
 - współczynnik emisji promieniowania $\varepsilon = 0.78$;
 - stała promieniowania $C_o = 5.67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{K}^4}$;
 - współczynnik przewodnictwa wewnętrznego $\alpha_1 = 9.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{K}}$;
 - współczynnik przewodnictwa zewnętrznego $\alpha_2 = 9.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{K}}$;
 - przewodność właściwa (konduktywność) stali $\gamma = 7 \times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$;
 - rezystywność właściwa stali $\varsigma = 1.43 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$.
- Dane wzbudnika:
 - długość wzbudnika $L = 1$ m;
 - ilość zwojów wzbudnika $z = 30$.
- Dane falownika:
 - rodzaj falownika: napięciowy o podwyższonej częstotliwości;
 - nominalna moc falownika $P_n = 70$ kW;

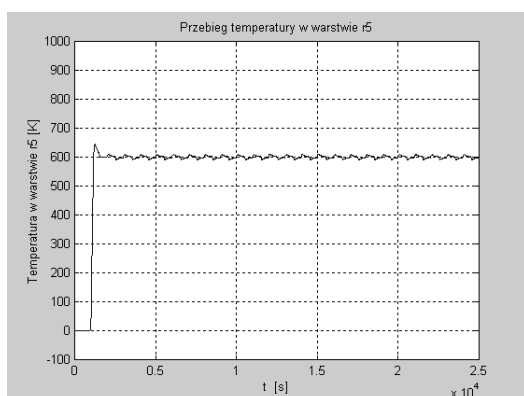
- nominalna wartość prądu wyjściowego, jaka odpowiada mocy nominalnej falownika $I_n(r5) = 1000 \text{ A}$;
 - nominalna wartość częstotliwości prądu wyjściowego, jaka odpowiada mocy nominalnej falownika $f_n = 1750 \text{ Hz}$.
- Parametry obiektu dynamicznego jaką stanowi „Wyżarzarka – element wyżarzany”:
 - współczynnik wzmocnienia statycznego „Wyżarzarka - element wyżarzany” $K_{F-EW} = 140 \frac{^{\circ}\text{K}}{\text{V}}$;
 - stała czasowa obiektu dynamicznego „Wyżarzarka – element wyżarzany” $T_{F-EW} = 383 \text{ s}$;
- Dane czujnika temperatury:
 - współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego czujnika temperatury $K_{CT} = 0.01 \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{K}}$;
 - stała czasowa czujnika temperatury $T_{CT} = 1 \text{ s}$.
- Parametry klasycznego regulatora temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, którego struktura i jej parametry dobrano w oparciu o kryterium „Optimum wartości” według C. Kesslera:
 - typ regulatora: proporcjonalno-całkujący PI;
 - czas zdwojenia regulatora $T_z = 383 \text{ s}$;
 - współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego $K_r = 137$;
- Parametry rozmytego regulatora temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego:
 - 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 (28) oraz o ogólne równanie regulatora o strukturze proporcjonalno – całkującej postaci (29).
- Odpalanie reguły (wnioskowanie) regulatora rozmytego (fuzzy):
 - zostało przeprowadzone w oparciu o zasadę Mamdaniego.
- Proces defuzyfikacji regulatora rozmytego (fuzzy):
 - został przeprowadzony metodą Środka obszaru (COA).

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

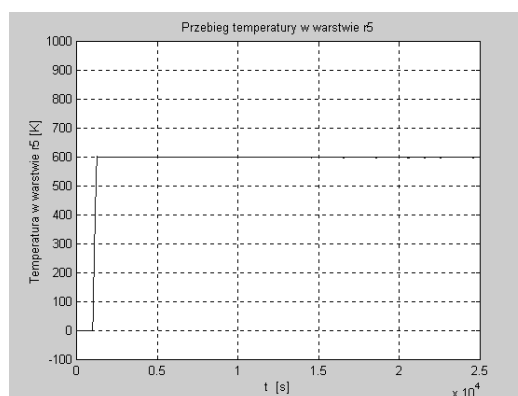
Symulacja komputerowa objęła następujące układy regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego:

- klasyczny układ regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego, którego strukturę i jej (struktury) parametry dobrano w oparciu o kryterium „Optimum wartości” według C. Kesslera;
- układ regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego z regulatorem rozmytym (fuzzy) typu PI, przy zastosowaniu liniowych funkcji przynależności typu trójkątnego Δ , L i Γ , zarówno dla przesłanek jak i wniosków rozpatrywanego regulatora;
- układ regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego z regulatorem rozmytym (fuzzy) typu PI, przy zastosowaniu nieliniowych funkcji przynależności typu Gaussa, zarówno dla przesłanek jak i wniosków rozpatrywanego regulatora;
- układ regulacji temperatury stalowej rury w procesie wyżarzania indukcyjnego z regulatorem rozmytym (fuzzy) typu PI, przy zastosowaniu nieliniowych funkcji przynależności typu bella (krzywe dzwonowe), zarówno dla przesłanek jak i wniosków rozpatrywanego regulatora.



Rys.8. Przebieg czasowy temperatury na powierzchni stalowej rury uzyskane w czasie symulacji klasycznego układu regulacji temperatury w procesie nagrzewania indukcyjnego, w odpowiedzi na zakłócenie współczynnika zmian tolerancji mocy P.

Rys.9. Przebieg czasowy temperatury na powierzchni stalowej rury uzyskane w czasie symulacji rozmytego układu regulacji temperatury w procesie nagrzewania indukcyjnego, w odpowiedzi na zakłócenie współczynnika zmian tolerancji mocy P.



6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych poszczególnych układów regulacji temperatury stalowej rury w procesie nagrzewania i wyżarzania indukcyjnego, można wysnuć następujące wnioski:

- wybór struktury oraz dobór nastaw dla klasycznego regulatora temperatury stalowej rury w procesie nagrzewania indukcyjnego, w oparciu o liniowe kryterium „Optimum wartości według C. Kesslera pozwoliło uzyskać dostatecznie dobrą dynamikę przebiegu temperatury na powierzchni zewnętrznej stalowej rury na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego oraz na wymuszenie funkcji trapezowej temperatury zadanej, a także zapewniało stabilną pracę falownika zasilającego obwód wzбудnika;

- regulator rozmyty (fuzzy) (o strukturze funkcjonalnej proporcjonalno – całkującej) temperatury stalowej rury w procesie indukcyjnego nagrzewania i wyżarzania, pozwolił uzyskać bardzo dobrą dynamikę przebiegu temperatury w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego i funkcji trapezowej temperatury zadanej. Porównując zachowanie się regulatora rozmytego w stosunku do regulatora klasycznego w kontekście odporności na zakłócenia zewnętrzne, to należy uznać, iż regulator rozmyty jest jednak bardziej odporny na zakłócenia zewnętrzne od regulatora klasycznego;
- najbardziej optymalne struktury rozmytego regulatora temperatury stalowej rury w procesie indukcyjnego nagrzewania i wyżarzania, 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;
- optymalna ilość funkcji przynależności, praktycznie dla wszystkich struktur zastosowanych regulatorów rozmytych (fuzzy) temperatury – zawiera się w granicach wartości liczbowej : 5 – 7;
- możliwości pakietu SIMULINK i bloku narzędziowego „SIMULINK Fuzzy” są wystarczające dla przeprowadzenia badań symulacyjnych zaprezentowanych układów regulacji temperatury stalowej rury w procesie indukcyjnego nagrzewania i wyżarzania i podobnego typu układów sterownia.

LITERATURA

1. D. Drankov i inni: „Wprowadzenie do sterowania rozmytego”, WNT, Warszawa 1996;
2. J. M. Douglas: „Dynamika i sterowanie procesów – Analiza układów dynamicznych”, WNT, Warszawa 1976;
3. J. M. Douglas: „Dynamika i sterowanie procesów – Synteza układów dynamicznych”, WNT, Warszawa 1977;
4. J. Gutenbaum: „Problemy teorii regulatorów”, WNT, Warszawa 1975;
5. M. Hering: „Termokinetika dla elektryków”, WNT, Warszawa 1970;
6. T. Kaczorek: „Teoria sterowania. Układy liniowe ciągłe i dyskretne” PWN, Warszawa 1977;
7. T. Kaczorek: „Teoria sterowania. Układy nieliniowe, procesy stochastyczne oraz optymalizacja statyczna i dynamiczna”, PWN, Warszawa 1981;
8. T. Kaczorek: „Teoria układów regulacji automatycznej”, WNT, Warszawa 1974;
9. C. Kessler: „Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise, Regelungstechnik 12/54, 1/55, 2/55;

10. M. G. Kogan: „Niestacjonarna ciepłowodność pri nagriewie mietalłow w eliektromagnitnom polie“, Fizika i Chimija obrabotki matieriałow, nr 11, 1967;
11. Praca zbiorowa pod redakcją Z. Kuczewskiego: „Poradnik do projektowania układów napędowych, Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1971;
12. M. Lichtenberg: „Generierung Kennliniengleicher Fuzzy – Regler aus den Parametern Konventioneller PID – Regler, atp 2/94;
13. A. W. Łykow: „Tieoria ciepłoprowodnosti“, Wyszszaja Szkoła, Moskwa 1967;
14. W. A. Makowskij: „Empiriczieskije formuły dla wyrażenija tiemperaturnoj zawisimosti ciepłofiziczieskich swojstw stali“, Stal, nr 1, 1972;
15. A. Milecki: „Wykorzystanie logiki rozmytej w technice sterowania“, PAK 7/94;
16. B. Mrozek, Z. Mrozek: „MATLAB 5.x, SIMULINK 2.x – poradnik użytkownika“, Wydawnictwo PLJ, Warszawa 1998;
17. L. P. Nejman: „Powierchnostnyj efekt w fierromagnitnych tielach“, Gosenergoizdat, Moskwa – Leningrad 1949;
18. W. S. Niemkow, B. S. Poliewodow: „Matiematiczeskoje modelirowanije na EWM ustrojstw wysokocziestnogo nagriewa“, Maszynostrojenije, Leningrad 1980;
19. N. A. Pawłow: „Inżyniernyje ciepłownyje razczioty indukcionnych nagriewatieliej“, Energija, Moskwa 1978;
20. D. Rutkowska i inni: „Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte“, PWN, Warszawa – Łódź 1999;
21. G. W. Samochwałow, G. J. Cziernysz: „Eliektriczieskije pieczy cziernoj mietalłurgii“, Mietalłurgia, Moskwa 1984;
22. T. Schwartz: „Termokinytika układów elektrotermicznych“, WNT, Warszawa 1966;
23. A. E. Słuchockij, S. E. Ryskin: „Induktory dla indukcionnogo nagriewa“, Energija, Leningrad 1974;
24. M. Szymkat, J. Werewka: „Projektowanie układów sterowania z wykorzystaniem SIMULINK – RTW“, PAK 7/1997;
25. J. Tou: „Nowoczesna teoria sterowania“, WNT, Warszawa 1968;
26. J. Turowski: „Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych“, WNT, Warszawa 1982;
27. H. Tunia, M. Kazimierkowski: „Automatyka napędu przekształtnikowego“, PWN, Warszawa 1987;
28. A. Zalewski, R. Cegiela: „Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowania“ Wydawnictwo Nakon, Poznań 1996.

Rękopis dostarczono, dnia 20.05.2002 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk

FUZZY LOGIC TEMPERATURE CONTROL IN THE PROCESS OF STEEL PIPE INDUCTION HEATING ANNEALING

M. Kalus, T. Skoczkowski

SUMMARY *The synthesis of temperature control system for the process of induction heating annealing of steel pipe has been described. Two different approaches, namely, fuzzy logic and classical control theory have been considered. Computer simulation of the annealing process with the two control systems has been carried out. The two methods have been compared, mainly from the point of view of immunity to external noises e.g. ambient temperature variations, changes of supply power of the induction heater inverter.*



Dr inż. Marian Kalus – adiunkt w Instytucie Systemów Sterowania w Katowicach. Urodzony w roku 1949. Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w roku 1976, w roku 1986 uzyskał na tym wydziale tytuł doktora nauk technicznych. Specjalista w zakresie sterowania urządzeń przemysłowych. Współautor ok. trzydziestu publikacji naukowych, dziesięciu patentów i zgłoszeń patentowych. Ma również w swoim dorobku wiele wdrożeń przemysłowych m. in. w zakresie napędów elektrycznych i nagrzewnic indukcyjnych.

Obszar zainteresowań zawodowych obejmuje przekształtniki statyczne do grzejnictwa indukcyjnego, sterowanie napędów prądu przemiennego i stałego oraz problematykę klasycznej teorii sterowania i sterowania rozmytego.

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Skoczkowski urodzony w roku 1953. Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w roku 1977, w roku 1985 uzyskał na tym wydziale tytuł doktora nauk technicznych a w 1991 doktora habilitowanego. Specjalista w zakresie elektrotermii przemysłowej i energoelektroniki. Współautor ok. sześćdziesięciu publikacji naukowych, dziesięciu patentów i zgłoszeń patentowych.

Obszar zainteresowań zawodowych obejmuje teorię pola, modelowanie numeryczne pól sprzężonych oraz przekształtniki statyczne stosowane w elektrotermii i napędzie elektrycznym.

