

Mieczysław Metzger  
Instytut Automatyki Przemysłowej i Pomiarów

ANALIZA UPROSZCZONEGO MODELU MATEMATYCZNEGO  
PIECA OBROTOWEGO DO WYPALANIA KLINKIERU

**Streszczenie.** W artykule przedstawiona jest analiza uproszczonego modelu matematycznego pieca obrotowego do wypalania klinkieru. Piec obrotowy potraktowany został tu jako pewien przypadek przeciuprądowego wymiennika ciepła o stałych rozłożonych. Identyfikacji współczynników równań takiego modelu można dokonać, mając do dyspozycji konkretny wykres rozkładu temperatur w stanie ustalonym. Dla tak określonych liczbowych współczynników równań modelu przedstawione są charakterystyki amplitudowo-fazowe, policzone numerycznie przy pomocy maszyny cyfrowej. Następnie zaproponowany jest pewien prosty sposób modelowania pieca obrotowego na maszynie analogowej, dający wyniki zbliżone do otrzymanych drogą rozwiązania układu R.R. cząstkowych modelu, traktującego piec jako element o stałych rozłożonych.

1. Wstęp

Jednym z najważniejszych etapów, wchodzących w skład produkcji cementu obok procesu odpowiedniego dozowania składników i homogenizacji szlamu, jest proces wypalania klinkieru prowadzony w piecach obrotowych, od pracy których w znacznej mierze zależy jakość cementu.

Piec obrotowy jest, z punktu widzenia automatyki, bardzo złożonym obiektem ze względu na: różnorodność jednocześnie zachodzących procesów fizycznych i chemicznych, charakter continuum na długości, znaczną ilość niemierzalnych zakłóceń oraz na małą liczbę zmiennych, które mogą być wielkościami sterującymi.

Dotychczas brak konkretnych danych o rzeczywistych korzyściach, jakie dałoby automatyczne prowadzenie wypału klinkieru według jakiegoś wskaźnika jakości, aczkolwiek istnieją i poprawnie działają układy stabilizacji pewnych parametrów, mających istotne znaczenie dla pracy pieca. Niemniej jednak istnieją przesłanki wprowadzenia automatycznego sterowania procesem wypału klinkieru według wskaźnika jakości, co objawia się szeregiem prób uzyskania modelu matematycznego pieca obrotowego oraz próbami wprowadzenia automatycznego sterowania pieców obrotowych. Ze względu na trudności w zbadaniu dynamiki pieca obrotowego na drodze pomiarowej oraz bardzo złożoną postać modelu matematycznego, uwzględniającego podział procesu wypału klinkieru na strefy [1], istnieje uzasadniona przesłanka do po-

szukiwać takiego uproszczenia modelu matematycznego, aby na jego podstawie w prosty sposób można było określić przybliżoną dynamikę pieca obrotowego. Jednocześnie model uproszczony wymagać będzie znikomej ilości parametrów do identyfikacji, co nie jest bez znaczenia, biorąc pod uwagę trudności pomiarowe.

W artykule przedstawiona jest analiza uproszczonego modelu matematycznego, zaproponowanego przez R. Krzyżanowskiego [2]. Identyfikacji takiego modelu można dokonać na podstawie wykresu rozkładu temperatur w stanie ustalonym wzdłuż długości pieca. Podobne ujęcie problemu przedstawił do rozwiązania W. Stümmer [3], uwzględniając pojemność cieplną wymurówki, nie podając jednak żadnych danych liczbowych odnośnie współczynników równań modelu.

Analiza modelu uproszczonego może być traktowana jako pomoc przy zorganizowaniu pomiarów rzeczywistej dynamiki pieca lub jako wstęp do dalszych prac w kierunku uzyskania i rozwiązania dokładniejszego modelu matematycznego. Niemniej analiza ta daje taką postać dynamiki, którą można uznać za zbliżoną do rzeczywistej dynamiki pieca, ponieważ ma ona swoje fizyczne uzasadnienie.

## 2. Określenie równań uproszczonego modelu matematycznego pieca obrotowego

Piec obrotowy jest stalową rurą (długość około 150 m i średnica  $3\frac{1}{2}$  m) włożoną wewnątrz wymurówką z materiału ogniotrwałego i obracającą się wokół osi. Dzięki obrotom pieca szlam, podawany z jednego końca, przesypując się, przemieszcza się wzdłuż pieca. Jednocześnie szlam podgrzewany jest gazami spalnymi o znacznej temperaturze, płynącymi w przeciwnym kierunku.

Na rys. 1 przedstawiony jest schematycznie piec obrotowy oraz rozkład temperatur spalin i klinkieru w stanie ustalonym wzdłuż długości pieca.

Na wykresie rozkładu temperatur uwidocznił się fakt podziału procesu wypalania klinkieru na szereg stref [4]. Licząc od strony wejścia szlamu są to: a. strefa suszenia, b. strefa podgrzewania, c. strefa kalcynacji, d. strefa reakcji egzotermicznych, e. strefa spiekania f. strefa ochłodzenia.

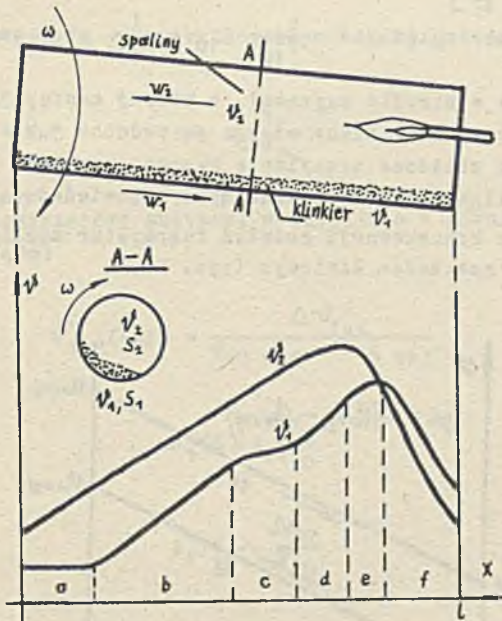
W oparciu o dane literaturowe i wypowiedzi technologów można wysnuć wniosek, że na jakość klinkieru, oprócz zagadnienia zapewnienia odpowiedniego składu chemicznego i homogenizacji szlamu, decydujące znaczenie ma temperatura klinkieru w strefie spiekania. Dlatego rozpatrywać będziemy pewien odcinek regulacyjny pieca obrotowego, przyjmując początek modelu pieca w punkcie wprowadzania szlamu do pieca, natomiast koniec modelu pieca w tym punkcie strefy spiekania, w którym klinkier powinien osiągać maksymalną temperaturę. Ta właśnie temperatura będzie interesującą nas najbardziej wielkością wyjściową. Korzystając z faktu, że reakcje chemiczne w wypalanych klinkierze nie dają wielkich efektów cieplnych i ciężciowo



się znoszą (jedne są endotermiczne, inne egzotermiczne) uwzględniamy tylko efekty wymiany ciepła, traktując piec jako pewien typ przeciuprądowego wymiennika ciepła o stałych rozłożonych. Pominiemy również wpływ zmian akumulowanego ciepła w wymurówce, gdyż sprawę tę trudno ująć ilościowo. Jeżeli założymy, że współczynnik wnikania ciepła, gęstości, prędkości, ciepła właściwie dla spalin i klinkieru są niezależne od położenia w piecu (są to niekiedy nawet dość grube przybliżenia), jeśli pominiemy wpływ reakcji chemicznych, to możemy w oparciu o bilans energetyczny w elementarnym wycinku  $dx$ , położonym w odległości  $x$  od początku pieca, przy uwzględnieniu dodatkowo założeń dla wymienników ciepła [5] [6], otrzymać następujące równania:

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial z} + \frac{w_1}{w_{10}} \frac{\partial \psi_1}{\partial y} + \frac{F \alpha}{S_1 \rho_1 \sigma_1 w_{10}} (\psi_1 - \psi_2) = 0 \quad (1)$$

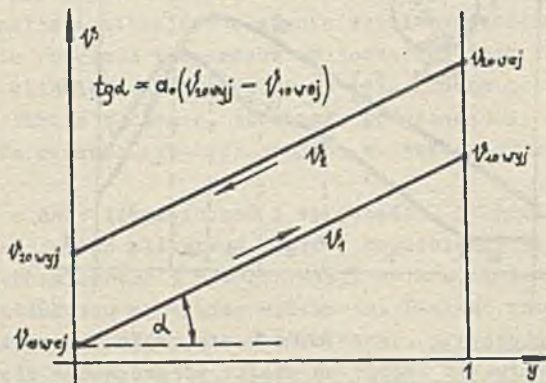
$$r \frac{\partial \psi_2}{\partial z} - \frac{w_2}{w_{20}} \frac{\partial \psi_2}{\partial y} + \frac{F \alpha}{S_2 \rho_2 \sigma_2 w_{20}} (\psi_2 - \psi_1) = 0$$



Rys. 1

- $\vartheta_{1,2}(\tau, y)$  - temperatury materiału i spalin [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $w_{1,2}(\tau)$  - prędkości przepływu materiału i spalin [m/s]  
 $r$  - stosunek średnich prędkości materiału i spalin w stanie ustalonym  $r = \frac{w_{10}}{w_{20}}$   
 $\alpha$  - współczynnik (zastępczy) wnikania ciepła ze spalin do materiału [ $\text{J}/\text{m}^2\text{s deg}$ ]  
 $S_{1,2}$  - powierzchnie przekroju poprzecznego pieca zajmowane przez materiał i spaliny [ $\text{m}^2$ ]  
 $\rho_{1,2}$  - gęstości materiału i spalin [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $c_{1,2}$  - ciepła właściwe (zastępcze) dla klinkieru i spalin [ $\text{J}/\text{kg deg}$ ]  
 $F$  - całkowita powierzchnia wymiany rozpatrywanego wycinka pieca [ $\text{m}^2$ ]  
 $y$  - zmienna bezwymiarowa odległości  $y = \frac{x}{l}$   
 $l$  - całkowita długość rozpatrywanego regulacyjnego wycinka pieca [m]  
 $\tau$  - czas względny  $\tau = \frac{t}{T_{10}}$ ;  $T_{10} = \frac{l}{w_{10}}$   $t$  - czas [s]

Jeżeli założymy, że w strefie suszącej, w której następuje zmiana wilgotności materiału, warunki wymiany ciepła są podobne jak w strefie podgrzewania (sugeruje to zbliżone nachylenie krzywej rozkładu temperatury spalin), to zmianę wilgotności można zastąpić odpowiadającą jej umowną zmianą temperatury i w konsekwencji rozkład temperatur spalin i klinkieru możemy aproksymować rozkładem liniowym (rys. 2).



Rys. 2



Z przyjęcia rozkładu liniowego wypływa bardzo istotna zależność:

$$\frac{F\alpha_0}{S_1\varrho_1\sigma_1 w_{10}} = \frac{F\alpha_0}{S_2\varrho_2\sigma_2 w_{20}} = \frac{\psi_{10} w_{yj} - \psi_{10} w_{ej}}{\psi_{20} w_{ej} - \psi_{10} w_{yj}} = a_0 \quad (2)$$

przy czym indeks "0" odnosi się do stanu ustalonego.

Jeśli teraz zlinearyzować równania (1) dla małych przyrostów uwzględniając konsekwencje przyjęcia liniowej aproksymacji rozkładu temperatur oraz uwzględniając zależność współczynnika wnikania  $\alpha$  tylko od zmian prędkości przepływu gazów spalinowych  $w_2$  (jest to dobre przybliżenie, bo  $x \ll 1$ ), to otrzymamy następujący układ zlinearyzowanych równań różniczkowych:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi'_1}{\partial z} + \frac{\partial \psi'_1}{\partial y} + a_0 [\psi'_1 - \psi'_2] &= -w'_1 + m w'_2 \\ x \frac{\partial \psi'_2}{\partial z} - \frac{\partial \psi'_2}{\partial y} + a_0 [\psi'_2 - \psi'_1] &= (1-m)w'_2, \end{aligned} \quad (3)$$

przy czym współczynnik  $m$  jest wykładnikiem znanej zależności [7]:

$$\alpha = \alpha_0 \left( \frac{w_2}{w_{20}} \right)^m \quad (4)$$

natomiast nowe bezwymiarowe zmienne, występujące w równaniach (3) określone są następująco:

$$\psi'_{1,2}(z, y) = \frac{\Delta \psi'_{1,2}}{\psi_{10} w_{yj} - \psi_{10} w_{ej}}$$

$$w'_1(z) = \frac{\Delta w_1}{w_{10}}$$

$$w'_2(z) = \frac{\Delta w_2}{w_{20}}$$

Rozwiązując układ równań różniczkowych zlinearyzowanych dla małych przyrostów wokół punktu pracy (3) możemy otrzymać transmitancje interesujących nas kanałów.

3. Wyznaczenie dynamiki pieca obrotowego na podstawie rozwiązania równań modelu uproszczonego

Dokonując transformacji Laplace'a-Carsona równań (3), przy zerowych warunkach początkowych, względem czasu i przechodząc na zapis macierzowy, otrzymujemy, co następuje:

$$\frac{d \underline{v}'(p, y)}{dy} = \mathbf{A}(p) \underline{v}'(p, y) + \mathbf{B}(p) \underline{w}'(p), \quad (5)$$

gdzie macierze:

$$\mathbf{A}(p) = \begin{bmatrix} -a_0 - p & a_0 \\ -a_0 & a_0 + rp \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}(p) = \begin{bmatrix} -1 & m \\ 0 & -(1-m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

oraz wektory:

$$\underline{v}'(p, y) = \begin{bmatrix} v'_1(p, y) \\ v'_2(p, y) \end{bmatrix} \quad \underline{w}'(p) = \begin{bmatrix} w'_1(p) \\ w'_2(p) \end{bmatrix} \quad (6a)$$

Równanie macierzowe (5) można rozwiązać ogólnie [8], przy następujących warunkach brzegowych:

$$\begin{aligned} v'_1(p, 0) &= v'_1 \text{ wej}(p) & \text{dla } y = 0 \\ v'_2(p, 0) &= v'_2 \text{ wyj}(p) \\ v'_1(p, 1) &= v'_1 \text{ wyj}(p) & \text{dla } y = 1 \\ v'_2(p, 1) &= v'_2 \text{ wej}(p) \end{aligned} \quad (7)$$

otrzymując równanie transmitancyjne o postaci:

$$\underline{v}'_{\text{wyj}}(p) = \mathbf{F}_v(p) \underline{v}'_{\text{wej}}(p) + \mathbf{F}_w(p) \underline{w}'(p), \quad (8)$$



gdzie:

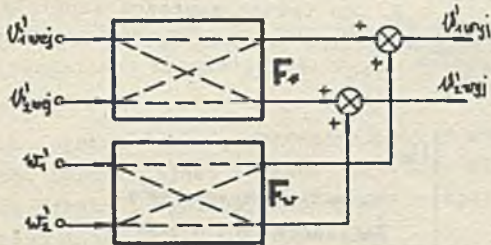
$$\underline{y}_{wyj}(p) = \begin{bmatrix} \psi_1^{wyj}(p) \\ \psi_2^{wyj}(p) \end{bmatrix} \quad \underline{z}_{wej}(p) = \begin{bmatrix} \psi_1^{wej}(p) \\ \psi_2^{wej}(p) \end{bmatrix}$$

$$F_{\psi}(p) = \begin{bmatrix} F_{11\psi}(p) & F_{12\psi}(p) \\ F_{21\psi}(p) & F_{22\psi}(p) \end{bmatrix} \quad F_w(p) = \begin{bmatrix} F_{11w}(p) & F_{12w}(p) \\ F_{21w}(p) & F_{22w}(p) \end{bmatrix}$$

$F_{\psi}(p)$  - macierz transmitancji przy oddziaływaniu zmianami temperatur wejściowych

$F_w(p)$  - macierz transmitancji przy oddziaływaniu zmianami przepływów

Równanie (8) można przedstawić za pomocą schematu blokowego przedstawionego na rys. 3.



Rys. 3

Postać macierzy transmitancyjnych jest następująca:

$$F_{\psi} = \Phi_b \Phi_a^{-1} \quad F_w = [\Psi_b - F_{\psi} \Psi_a] B \quad (9)$$

gdzie klejono:

$$\Phi_a = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(p,0) & \Phi_{12}(p,0) \\ \Phi_{21}(p,1) & \Phi_{22}(p,1) \end{bmatrix} \quad \Psi_a = \begin{bmatrix} \Psi_{11}(p,0) & \Psi_{12}(p,0) \\ \Psi_{21}(p,1) & \Psi_{22}(p,1) \end{bmatrix}$$

$$\Phi_b = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(p,1) & \Phi_{12}(p,1) \\ \Phi_{21}(p,0) & \Phi_{22}(p,0) \end{bmatrix} \quad \Psi_b = \begin{bmatrix} \Psi_{11}(p,1) & \Psi_{12}(p,1) \\ \Psi_{21}(p,0) & \Psi_{22}(p,0) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Phi(p, y) = L^{-1}\{V(p, s)\} \quad (\text{odwrotna transformacja L-C} \quad (11)$$

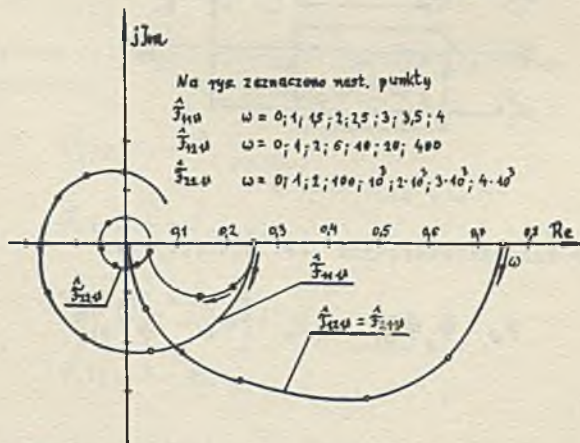
$$\Psi(p, y) = L^{-1}\{V_z(p, s)\} \quad (\text{względem zmiennej } s)$$

$$V(p, s) = [1s - A(p)]^{-1} s$$

$$V_z(p, s) = [1s - A(p)]^{-1} \quad (12)$$

Mając dane macierze  $A(p)$  i  $B(p)$  oraz pamiętając o warunkach odwracalności macierzy, problem znalezienia macierzy transmitancyjnych  $F_D(p)$  i  $F_W(p)$  sprowadza się do prostych operacji na macierzach, jednak postać w ten sposób obliczonych transmitancji jest bardzo złożona [9]. Wstawiając  $p = j\omega$  i korzystając z maszyny cyfrowej, otrzymuje się charakterystyki amplitudowo-fazowe poszczególnych transmitancji.

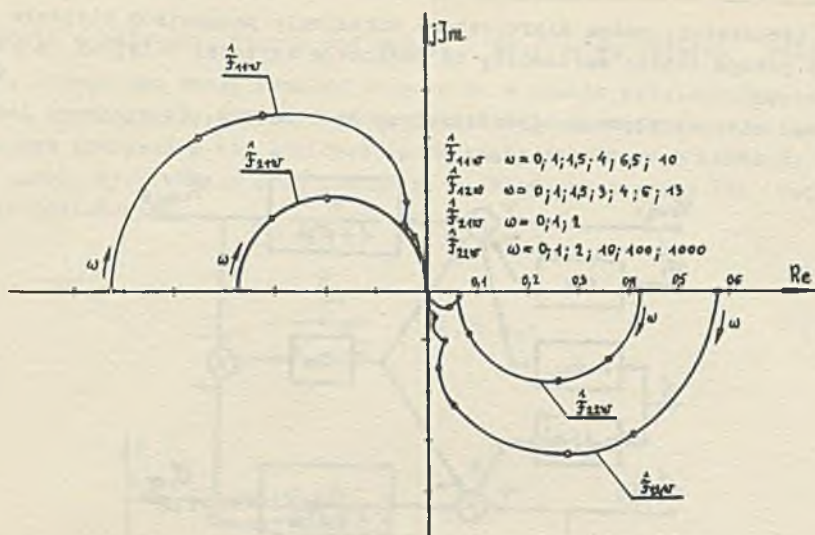
Biorąc pod uwagę liniową aproksymację znanego rozkładu temperatur (rys. 2) oraz średnie wartości przepływów  $w_{10}$  i  $w_{20}$ , dla większości współczesnych konstrukcji pieców, otrzymujemy  $a_0 \cong 3$  i  $r \cong 0,001$ . Na podstawie danych literaturowych  $m = 0,8$ . Dla takich wartości współczynników  $a_0$ ,  $r$ ,  $m$  charakterystyki amplitudowo-fazowe poszczególnych transmitancji przedstawione są na rys. 4 i 5.



Rys. 4

Warto przy okazji zwrócić uwagę na fakt, że pulsacja  $\omega$  jest pulsacją bezwymiarową, odniesioną do pulsacji charakterystycznej, odpowiadającej okresowi przelotu klinkieru przez piec  $T_{10}$ . Postać dynamiki, określona otrzymanymi charakterystykami częstotliwościowymi, można dla poszczególnych transmitancji, uzasadnić wychodząc z uproszczonych procesów fizykal-





Rys. 5

nych zachodzących w piecu [9]. Przykładowo, oiekawy przebieg charakterystyki częstotliwościowej transmitancji  $F_{22}(s)$ , można, w dużym skrócie, uzasadnić następująco:

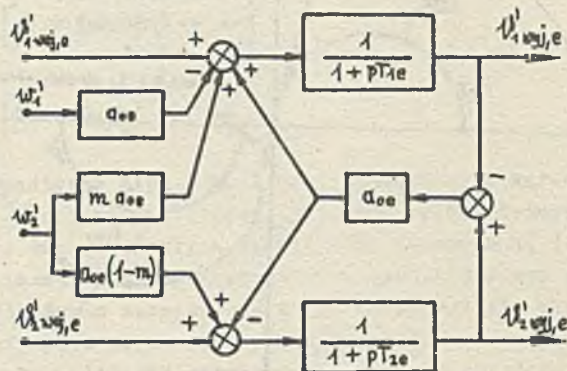
- a - dla niskich częstotliwości, porównywalnych z częstotliwością charakterystyczną, odpowiadającą okresowi przelotu klinkieru przez piec, dominujące są zjawiska wymiany ciepła między spalinami a klinkierem i dynamika tego kanału ma postać inercji.
- b - dla wysokich częstotliwości, porównywalnych z częstotliwością charakterystyczną, odpowiadającą okresowi przelotu spalin przez piec  $T_{20} = 0,001 T_{10}$ , oddziaływanie zmiany temperatury wejściowej spalin na zmianę ich temperatury wyjściowej ma charakter opóźnienia, co związane jest z transportem gazów spalinowych. Dodać można, że wartość tego opóźnienia ściśle odpowiada okresowi przelotu spalin przez piec.

4. Problem zamodelowania uproszczonego modelu matematycznego pieca obrotowego na maszynie analogowej oraz próba uwzględnienia pewnych nieliniowości statycznego rozkładu temperatur

Aby zamodelować układ o stałych rozłożonych na maszynie analogowej, należy podzielić obiekt na  $n$  części, przy czym części te traktowane są jako elementy o stałych skupionych. Wartości parametrów elementu określa się zazwyczaj w sposób wynikający bezpośrednio z podziału, np. całą pojemność cieplną dzieli się  $n$ -krotnie. Mając jednak do dyspozycji statyczny roz-

kład temperatur, można zaproponować określenie parametrów elementu sposobem w pewnym sensie sztucznym, na podstawie wartości wziętych z rozkładu temperatur.

Schemat blokowy elementu przedstawiony jest na rys. 6.



Rys. 6

$v'_{1,e}$  - bezwymiarowa zmienna przyrostu temperatury materiału ponad stan ustalony

$$v'_{1,e} = \frac{\Delta v'_{1,e}}{v'_{20,e,wyj} - v'_{10,e,wyj}}$$

$v'_{2,e}$  - bezwymiarowa zmienna przyrostu temperatury spalin ponad stan ustalony

$$v'_{2,e} = \frac{\Delta v'_{2,e}}{v'_{20,e,wyj} - v'_{10,e,wyj}}$$

$$a_{oe} = \frac{\alpha_o F_e}{S_1 q_1 \sigma_1 w_{10}} = \frac{\alpha_o F_e}{S_2 q_2 \sigma_2 w_{20}}$$

$F_e$  - całkowita powierzchnia wymiany w elemencie

$T_{1e}$  - okres przelotu materiału przez element w stanie ustalonym

$$T_{1e} = \frac{l_e}{w_{10}}$$

$T_{2e}$  - okres przelotu spalin przez element w stanie ustalonym

$$T_{2e} = r T_{1e} = 0,001 T_{1e}$$

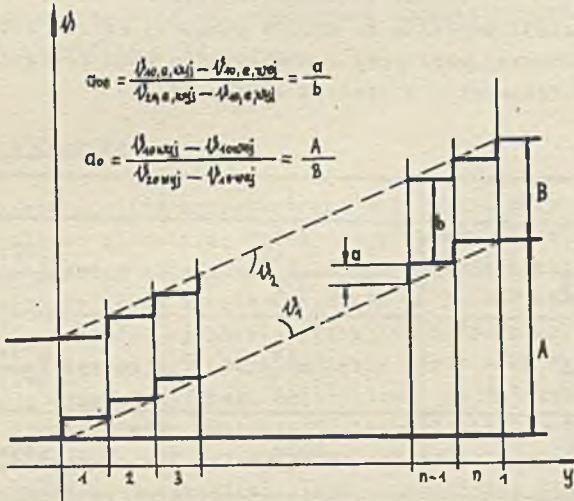
Inne parametry i zmienne określone jak poprzednio.

Ponieważ zidentyfikowaliśmy współczynnik  $a_o$  dla modelu o stałych rozłożonych, to, aby porównać wyniki, otrzymane z modelowania, z wynikami otrzymanymi na drodze rozwiązania równań różniczkowych (3) musimy modelowanie przeprowadzić dla takiej samej wartości współczynnika  $a_o$ , a więc musimy znaleźć relację wiążącą współczynnik  $a_{oe}$  z współczynnikiem  $a_o$ .



Bezpośrednio z podziału, biorąc pod uwagę, że  $F_e = \frac{F}{n}$ , wynika relacja  $a_{oe} = \frac{a_0}{n}$ . Biorąc pod uwagę rozkład temperatur w stanie ustalonym oraz jego liniową aproksymację (rys. 7) można przedstawić następującą relację, gwarantującą pokrywanie się liniowej aproksymaty schodkowego rozkładu temperatur modelu dyskretnego oraz liniowego rozkładu temperatur dla modelu o stałych rozłożonych.

$$a_{oe} = \frac{\frac{a_0}{n}}{1 - \frac{a_0}{n}} \quad n > a_0 \quad (13)$$



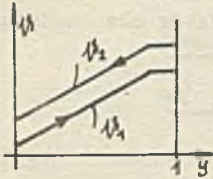
Rys. 7

Odnosząc zmienną czasu do okresu przelotu klinkieru przez cały piec oraz uwzględniając przy opracowywaniu wyników odniesienie zmian temperatur do innych wartości, modelowanie przeprowadzono dla:  $a_0 = 3$ ,  $r = 0,001$ ,  $m = 0,8$ ,  $n = 6$ . Przy łączeniu elementów uwzględniono przeciwprąd, czyli relację:

$$\begin{aligned} v'_{1,1,w,yj} &= v'_{1,1-1,w,yj} \\ v'_{2,1,w,yj} &= v'_{2,1+1,w,yj} \end{aligned} \quad (14)$$

Jednocześnie zamodelowano układ uwzględniający dziesięciokrotne zmniejszenie nachylenia rozkładu temperatur w ostatnim elemencie, czyli układ, od-

powiadający rozkładowi temperatur przedstawionemu na rys. 8. Układ taki jest próbą uwzględnienia spłaszczenia rozkładu temperatur w strefie spiekania.



Rys. 8

W tabelicy 1 zestawione są następujące pozycje:

- 1 - Transmitancja
- 2 - Postać transmitancji uzyskana na drodze przybliżonej aproksymacji charakterystyk amplitudowo-fazowych, otrzymanych drogą rozwiązania równań różniczkowych cząstkowych modelu o stałych założonych.
- 3 - Postać transmitancji uzyskana na drodze czasowej aproksymacji przebiegu odpowiedzi skokowej, uzyskanej z modelowania.
4. Postać transmitancji uzyskana na drodze czasowej aproksymacji przebiegu odpowiedzi skokowej, uzyskanej z modelowania uwzględniającego spłaszczenie rozkładu temperatur w strefie spiekania.

Tabela 1

1	2	3	4
$F_{11} \psi$	$0,25 \frac{e^{-p}}{1+0,5p}$	$0,247 \frac{e^{-0,42p}}{1+p}$	$0,258 \frac{e^{-0,42p}}{1+p}$
$F_{12} \psi$	$\frac{0,75}{1+0,3p}$	$\frac{0,65}{1+0,3p}$	$0,631 \frac{e^{-0,05p}}{1+0,5p}$
$F_{21} \psi$	$\frac{0,75}{1+0,3p}$	$\frac{0,65}{1+0,3p}$	$\frac{0,629}{1+0,3p}$
$F_{22} \psi$	$0,05 e^{-0,001p} + \frac{0,2}{1+0,5p}$	$0,03 + \frac{0,23}{1+0,55p}$	$0,032 + \frac{0,26}{1+0,5p}$
$-F_{11w}$	$\frac{0,625}{1+0,7p}$	$\frac{0,66}{1+0,7p}$	$0,54 \frac{e^{-0,08p}}{1+p}$
$F_{12w}$	$\frac{0,575}{1+0,7p}$	$\frac{0,655}{1+0,73p}$	$0,53 \frac{e^{-0,08p}}{1+p}$
$-F_{21w}$	$\frac{0,375}{1+0,5p}$	$\frac{0,55}{1+0,53p}$	$\frac{0,45}{1+0,5p}$
$F_{22w}$	$\frac{0,06}{1+0,0003p} + \frac{0,36}{1+0,5p}$	$0,04 + \frac{0,56}{1+0,58p}$	$0,05 + \frac{0,44}{1+0,51p}$



Analiza transmitacji zestawionych w tablicy 1 pozwala stwierdzić, że zamodelowanie pieca obrotowego, przy podziale na sześć części, traktowanych jako elementy o stałych skupionych, daje wyniki (rubryka 3) bardzo zbliżone do otrzymanych drogą potraktowania pieca jako elementu o stałych rozłożonych (rubryka 2). Niewielkie rozbieżności można tłumaczyć małą ilością części podziałowych. Jednocześnie dziesięciokrotne zmniejszenie nachylenia rozkładu temperatur w ostatnim elemencie (rubryka 4) również daje bardzo małe zmiany dynamiki, w stosunku do dynamiki określonej dla liniowego rozkładu temperatur (rubryka 3). Jednocześnie małe zmiany charakteru przepustowości, po uwzględnieniu dziesięciokrotnej zmiany nachylenia statycznego rozkładu temperatur w jednej ze stref pieca, potwierdzają aproksymację rzeczywistego rozkładu temperatur w piecu rozkładem liniowym. Natomiast prosty sposób uwzględnienia nieliniowości rozkładu temperatur przy modelowaniu na maszynie analogowej pozwala zorientować się w charakterze zmian transmitacji.

##### 5. Komentarz końcowy

Na podstawie analizy uproszczonego modelu matematycznego pieca obrotowego do wypalania klinkieru, można wysnuć pewne sugestie odnośnie możliwości automatycznego sterowania procesem wypalania klinkieru. W oparciu o dane literaturowe można wywnioskować, że na jakość cementu, oprócz decydującej o poprawności wypalania klinkieru temperatury klinkieru w strefie spiekania, decydujący wpływ ma także odpowiedni skład chemiczny oraz homogenizacja szlamu, będącego materiałem wejściowym procesu wypalania klinkieru. Istnieje więc konieczność zapewnienia odpowiedniego składu chemicznego i homogenizacji szlamu przez dobrze działające układy regulacji. Istotnym zagadnieniem, umożliwiającym automatyczne sterowanie procesu wypalania klinkieru, jest również problem dobrze działających układów stabilizacji przepływów i ciśnień. Dopiero przy zapewnieniu powyższych warunków można analizować możliwości sterowania procesem wypalania klinkieru w funkcji wskaźnika poprawności wypału klinkieru, czyli jego temperatury w strefie spiekania (temperatury wyjściowej klinkieru dla modelu uproszczonego).

Ponieważ sterowanie wielkością temperatury wyjściowej klinkieru, przez zmianę temperatur wejściowych gazów bądź też materiału, jest, z przyczyn technologicznych, bardzo utrudnione, sterować można przepływami, czyli oddziaływać na zmianę przepływu gazów lub na zmianę przepływu materiału (zmiana obrotów pieca z jednoczesną zmianą podawy szlamu).

Na podstawie przeprowadzonej analizy uproszczonego modelu pieca można stwierdzić, że dynamika obu tych kanałów  $F_{11w}$  i  $F_{12w}$  niewiele się różni. Biorąc pod uwagę rzeczywiste zjawiska fizyczne, zachodzące w trakcie procesu wypalania klinkieru w piecu, jak np. nierównomierność prędkości prze-

sypywania się materiału, można spodziewać się, że oddziaływanie zmianą prędkości materiału może mieć nieco gorsze własności dynamiczne. Niemniej można jednak przypuszczać, że oba te kanały mają zbliżoną i korzystną dla potrzeb regulacji dynamikę. Tym ohyba należy tłumaczyć fakt występowania obu typów rozwiązań sterowania wypałem klinkieru.

Ostateczne rozstrzygnięcie na korzyść oddziaływania zmianą przepływu gazów lub na korzyść oddziaływania zmianą przepływu materiału, powinno zależeć od konkretnej budowy pieca obrotowego, istniejących zakłóceń oraz możliwości technologicznych.

#### LITERATURA

1. A. Gościński, E. Nawarecki, E. Łazarski - Model analityczny pieca obrotowego do wypalania klinkieru. Prace V Krajowej Konferencji Automatyki Zeszyt 6. Gdańsk 1971.
2. R. Krzyżanowski, J. Kuźnik, S. Świtalski - Sprawozdanie z wykonania pracy zleczonej pt. "Opracowanie niezbędnych danych dla właściwego projektowania układów automatyki dla przemysłu cementowego" (niepublikowane).
3. W. Stürmer - Möglichkeiten der konventionellen Regelung eines Lepolofens. Hartmann-Braun Mess- und Regeltechnik. Einzelbericht L 3372 zu H-B - messwerte (1969).
4. I. Ahrends, W. Cieśliński - Technologia cementu. Warszawa 1956.
5. P. Profos - Vektorielle Regeltheorie Zürich, Leemann 1943.
6. Y. Takahashi - Analiza pieriedatoczonej funkcji processa ciepłobmienna. Awtom. Regulirovanije. I.I.L. Moskwa 1954.
7. P. Harriott - Regulacja procesów chemioznych. WNT Warszawa 1967.
8. R. Krzyżanowski - Własności regulacyjne przeciwprądowych wymienników ciepła. Seminarium Urządzeń i Układów Automatyki - Referat Nr 35, tom III.
9. M. Metzger - Analiza uproszczonego modelu matematycznego pieca obrotowego do wypalania klinkieru i jego modelowania na maszynie analogowej. Praca dyplomowa. Gliwice 1971.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 15.XI.1971 r.



АНАЛИЗ УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ  
ДЛЯ ОБЖИГА КЛИНКЕРА

## Р е з ю м е

В статье показано анализ упрощенной математической модели вращающейся печи для обжига клинкера. Вращающаяся печь рассматривается как некоторый противоточный теплообменник. Коэффициенты уравнений модели можно определить на базе графика температур в установившемся режиме. Затем дано некоторое предложение моделирования печи на аналоговой вычислительной машине.

## ANALYSIS OF A SIMPLIFICATION MATHEMATICAL MODEL OF A CEMENT ROTARY KILN

## S u m m a r y

The paper describes analysis of a simplification mathematical model of a cement rotary kiln. The rotary kiln is treat like a certain kind of a counterflow heat exchanger of distributed parameters. Identification of parameters of this model can be done on basis of a temperature distribution in steady-state regime. There is given a certain suggestion concerning of a matter a simulation of the kiln on an analogue computer, next.