

Stanisław Kopeć, Jerzy Widenka, Wiesław Smulski

UKŁAD AUTOMATYCZNEJ REGULACJI TEMPERATURY KAPIELI CYNKOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny pieca cynkowniczego z górnym nagrzewem. Uwzględniając materiały uzyskane z doświadczeń i z rozważań matematycznych przedstawiono dwa układy automatycznej regulacji temperatury w kąpieli. Przedyskutowano obydwa układy opierając się na materiałach uzyskanych z elektrycznej maszyny analogowej, na której zamodelowano rozpatrywane układy automatycznej regulacji.

1. Wstęp

W pracy przedstawiono wyniki badań modelu analogowego układu regulacji temperatury kąpieli w piecu cynkowniczym. Rozpatrzono dwie koncepcje układu automatycznej regulacji temperatury kąpieli:

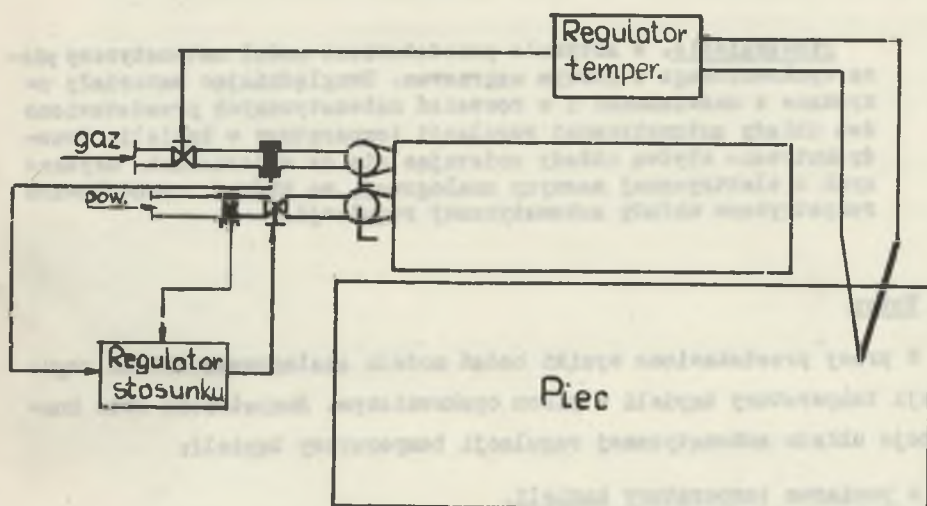
- a) z pomiarem temperatury kąpieli,
- b) z pomiarem temperatury kąpieli i pomiarem strumienia ciepłego przejmowanego przez kąpiel w układzie regulacji kaskadowej.

Wyniki modelowania i wnioski przedstawiono w dalszej części pracy.

2. Piec do cynkowania drutu jako obiekt regulacji temperatury

Na rys. 1 przedstawiono schemat pieca do cynkowania drutu wraz z układem regulacji temperatury. Cynkowany drut z określoną szybkością, zależną od jego średnicy przechodzi przez całą długość wanny w kąpieli. Nad kąpielą umieszczona jest kopuła pieca z baterią palników gazowych. Nagrzewanie kąpieli cynkowej zachodzi głównie drogą wymiany ciepła przez promieniowanie między wymurówką kopuły i powierzchnią kąpieli. Zakłóceniami, które naruszają stan ustalony pieca są:

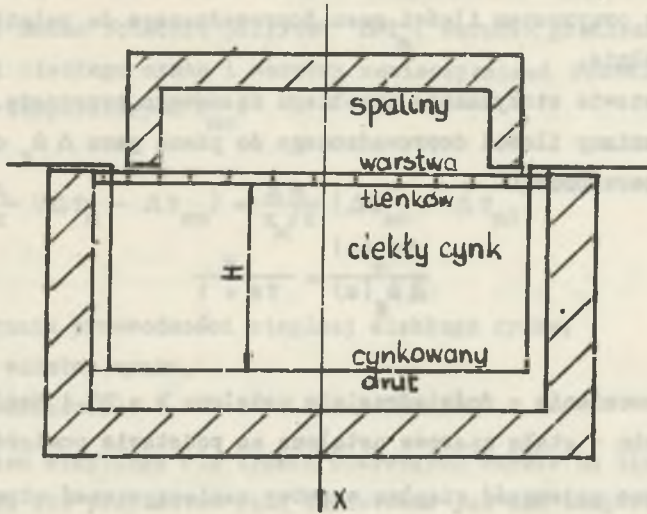
- a) zmiana ilości lub średnicy cynkowanych drutów,
- b) podniesienie kopuły (co powoduje zwiększenie szczeliny między jej bocznymi ściankami a brzegiem wanny),
- c) zmiana grubości warstwy tlenku cynku na powierzchni kąpiel (zmniejszenie strumienia ciepłego \dot{q}_m przejmowanego przez kąpiel).



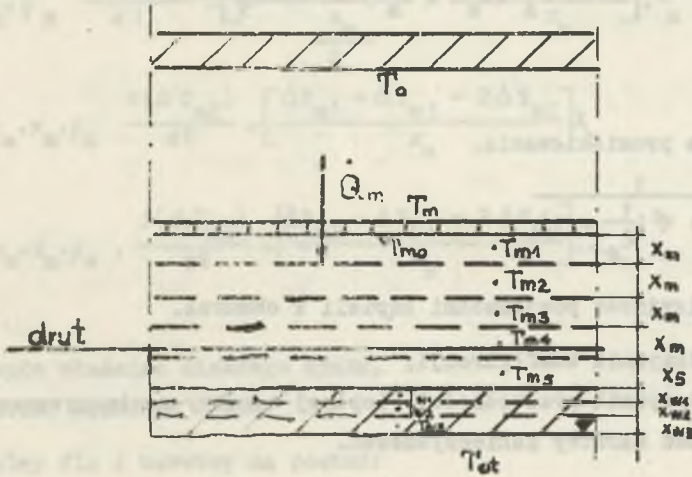
Rys. 1. Schemat pieca cynkowniczego wraz z układem regulacji temperatury

Do dalszych badań przyjęto jednowymiarowy model przepływu ciepła (w kierunku dna wanny). W celu zastąpienia cząstkowych równań różniczkowych (opis wymiany ciepła przez przewodzenie) przez układ równań różniczkowych podzielono kąpiel cynkową oraz obmurze na warstwy.

Na podstawie badań modelowych ustalono, że podział kąpeli na 5 warstw oraz obmurza na 3 warstwy jest zupełnie wystarczający. Dalsze zagęszczenie podziału nie poprawia w istotny sposób dokładności, a wymaga większej ilości wzmacniaczy operacyjnych potrzebnych do rozwiązania większej ilości równań.



Rys. 2. Model kąpieli cynkowniczej



Rys. 2a. Podział kąpieli i obmurza na warstwy

Założono, że źródłem ciepła dla kąpieli jest ogrzewana przez spalinę przepona (rys. 2). Zależność między przyrostem temperatury przepony ΔT_o z przyrostem ilości gazu doprowadzanego do palników ustalono doświadczalnie.

Na podstawie otrzymanego przebiegu czasowego przyrostu $\Delta T_o(\tau)$ dla skokowej zmiany ilości doprowadzonego do pieca gazu $\Delta \dot{m}_g$ określono zależność operatorową:

$$\frac{\Delta T_o(s)}{\Delta \dot{m}_g(s)} = \frac{k}{Ts + 1} \quad (1)$$

gdzie

k - wzmacnienie - doświadczalnie ustalono $k = 21,4 \text{ deg/kg/h}$,

$T = 7 \text{ min}$ - stała czasowa ustalona na podstawie pomiarów.

Pomijając pojemność cieplną warstwy zanieczyszczeń otrzymuje się podane poniżej równanie bilansu cieplnego tej warstwy:

$$\sigma \cdot \epsilon_z \cdot (T_o^4 - T_m^4) = \frac{\lambda \cdot (T_m - T_{mo})}{x} \quad (2)$$

gdzie

σ - stała promieniowania,

$$\epsilon_z = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \varphi \left(\frac{1}{\epsilon_o} - 1 \right)}$$

ϵ_m, ϵ_o - emisyjność powierzchni kąpieli i obmurza,

φ - współczynnik konfiguracji,

λ - współczynnik przewodności cieplnej warstwy zanieczyszczeń,

x - grubość warstwy zanieczyszczeń.

Linearyzując równanie (2) dla małych przyrostów temperatur ΔT_o i ΔT_m otrzymuje się:

$$4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_z \cdot (\bar{T}_o^3 \cdot \Delta T_o - \bar{T}_m^3 \cdot \Delta T_m) = \frac{\lambda}{x} (\Delta T_m - \Delta T_{mo}) \quad (4)$$

gdzie

\bar{T}_o , \bar{T}_m - temperatura obmurza i powierzchni kąpieli w stanie ustalonym.

Z równania (4) można obliczyć przyrost ΔT_m . Warunek graniczny na styku powierzchni ciekłego cynku i warstwy zanieczyszczeń pozwala określić przyrost temperatury ΔT_{m0} .

$$\frac{\lambda}{x} (\Delta T_m - \Delta T_{m0}) = \frac{\lambda_m}{x_m/2} (\Delta T_{m0} - \Delta T_{m1}) \quad (5)$$

gdzie

λ_m - współczynnik przewodności cieplnej ciekłego cynku,

x_m - grubość warstwy cynku,

λ, x - jak we wzorze (2).

Równania bilansu cieplnego dla trzech pierwszych warstw są liniowe i dlatego równania dla przyrostów będą takie same jak dla temperatury bezwzględnej.

$$c_m \cdot x_m \cdot \rho_m \frac{d(\Delta T_{m1})}{dt} = \left[\frac{\Delta T_{m0} - \Delta T_{m1}}{\frac{x_m}{2}} - \frac{\Delta T_{m1} - \Delta T_{m2}}{x_m} \right] \cdot \lambda_m \quad (6)$$

$$c_m \cdot x_m \cdot \rho_m \frac{d(\Delta T_{m2})}{dt} = \left[\frac{\Delta T_{m1} + \Delta T_{m3} - 2\Delta T_{m2}}{x_m} \right] \lambda_m \quad (7)$$

$$c_m \cdot x_m \cdot \rho_m \cdot \frac{d(\Delta T_{m3})}{dt} = \left[\frac{\Delta T_{m2} + \Delta T_{m4} - 2\Delta T_{m3}}{x_m} \right] \cdot \lambda_m \quad (8)$$

gdzie

c_m - ciepło właściwe ciekłego cynku,

ρ_m - gęstość właściwa cynku.

Bilans cieplny dla 4 warstwy ma postać:

$$F_m \cdot c_m \cdot x_m \cdot \rho_m \frac{dT_{m4}}{dt} = F_m \frac{T_{m3} + T_{m5} - 2T_{m4}}{x_m} \lambda_m \cdot \dot{M}_d \cdot c_d (T_{m4} - T_{dp}) \quad (9)$$

przy czym:

\dot{M}_d - strumień masy cynkowanych drutów,

c_d - ciepło właściwe drutów,

T_{dp} - początkowa temperatura drutów,

F_m - powierzchnia ogrzewanej kąpieli.

Ponieważ ostatni składnik równania (9) jest nieliniowy, należy go zlinearyzować:

$$F_m \cdot c_m \cdot x_m \cdot \rho_m \frac{d(\Delta T_{m4})}{d\tau} = F_m \frac{\Delta T_{m3} + \Delta T_{m5} - 2\Delta T_{m4}}{x_m} \lambda_m - \bar{M}_d \cdot c_d \cdot \Delta T_{m4} - \bar{T}_{m4} \cdot c_d \cdot \Delta \dot{M}_d \quad (10)$$

Równania bilansu pozostałych warstw mają postać:

$$c_m \cdot x_m \cdot \rho_m \frac{d(\Delta T_{m5})}{d\tau} = -\frac{\Delta T_{m4} - \Delta T_{m5}}{x_m} \lambda_m - \frac{\Delta T_{m5} - \Delta T_{w1}}{\frac{x_m}{2\lambda_m} + \frac{x_{w1}}{2\lambda_w}} \quad (11)$$

$$x_{w1} \cdot c_w \cdot \rho_w \frac{d(\Delta T_{w1})}{d\tau} = \frac{\Delta T_{m5} - \Delta T_{w1}}{\frac{x_m}{2\lambda_m} + \frac{x_{w1}}{2\lambda_w}} - \frac{\Delta T_{w1} - \Delta T_{w2}}{\lambda_w} \quad (12)$$

$$x_{w2} \cdot c_w \cdot \rho_w \frac{d(\Delta T_{w2})}{d\tau} = \left[\frac{\Delta T_{w1} - \Delta T_{w2}}{x_{w1} + x_{w2}} - \frac{T_{w2} - T_{w3}}{x_{w2} + x_{w3}} \right] 2\lambda_w \quad (13)$$

$$x_{w3} \cdot c_w \cdot \rho_w \frac{d(\Delta T_{w3})}{d\tau} = \frac{\Delta T_{w2} - \Delta T_{w3}}{x_{w2} + x_{w3}} \lambda_w - \frac{\Delta T_{w3}}{\frac{x_{w3}}{2\lambda_w} + \frac{1}{k}} \quad (14)$$

gdzie

x_{w1}, x_{w2}, x_{w3} - grubości warstwy obmurza,

λ_w - współczynnik przewodności cieplnej obmurza,

k - współczynnik przenikania ciepła od obmurza do fundamentu.

Układ równań (1), (4) - (8), (10) - (14) zamodelowano przy pomocy maszyny analogowej ELWAT-1.

W celu określenia wpływu grubości warstwy zanieczyszczeń na właściwości dynamiczne pieca zamodelowano 2 przypadki, dla grubości warstwy $x = 0$ oraz $x = 2$ cm.

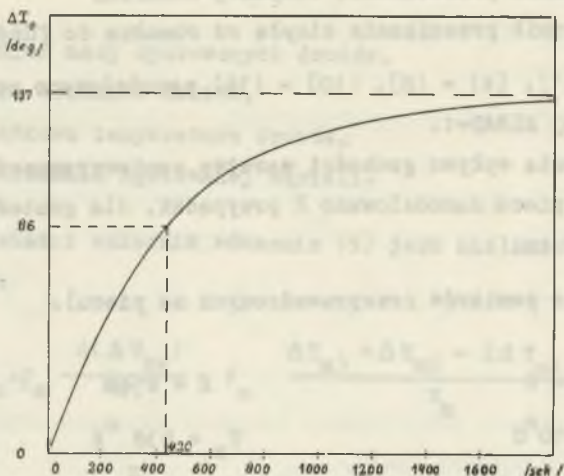
Dane (na podstawie pomiarów przeprowadzonych na piecu).

$x = 0$	$x = 2$ cm
$T_o = 910^\circ\text{C}$	$T_o = 938^\circ\text{K}$
$T_m = T_{mo} = 760^\circ\text{K}$	$T_m = 832^\circ\text{K}$
	$T_{mo} = 760^\circ\text{K}$

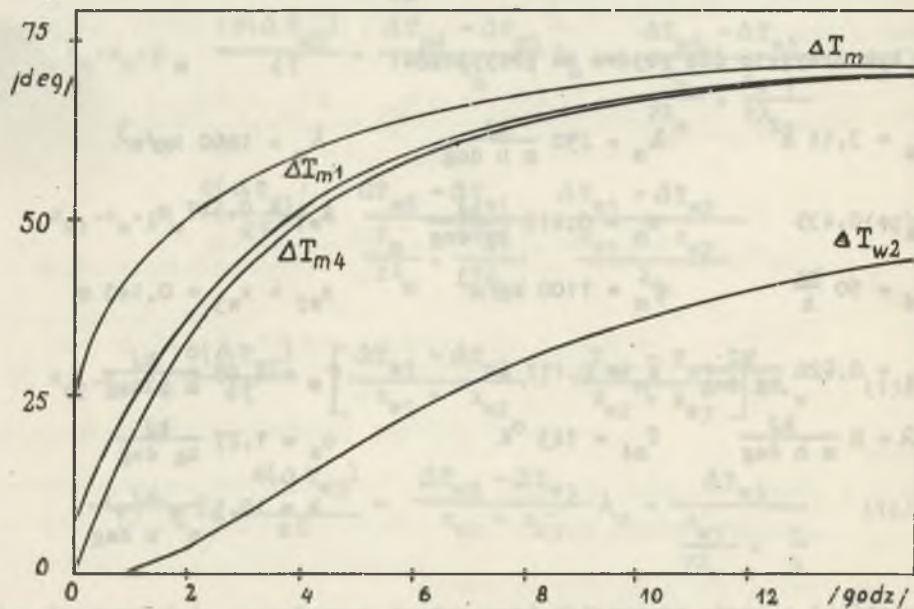
Poza tym przyjęto dla obydwu ww przypadków:

$F_m = 3,14 \text{ m}^2$	$\lambda_m = 250 \frac{\text{kJ}}{\text{m h deg}}$	$\lambda_w = 1860 \text{ kg/m}^3$
$\epsilon_z = 0,435$	$c_m = 0,419 \frac{\text{kJ}}{\text{kg deg}}$	$x_{w1} = 0,117 \text{ m}$
$\dot{M}_d = 50 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$	$\rho_m = 7100 \text{ kg/m}^3$	$x_{w2} = x_{w3} = 0,143 \text{ m}$
$c_d = 0,628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg deg}}$	$x_m = 0,117 \text{ m}$	$\rho_w = 4,85 \frac{\text{kJ}}{\text{m h deg}}$
$\lambda = 8 \frac{\text{kJ}}{\text{m h deg}}$	$T_{m4} = 743^\circ\text{K}$	$c_w = 1,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg deg}}$
		$k = 10,5 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{ h deg}}$

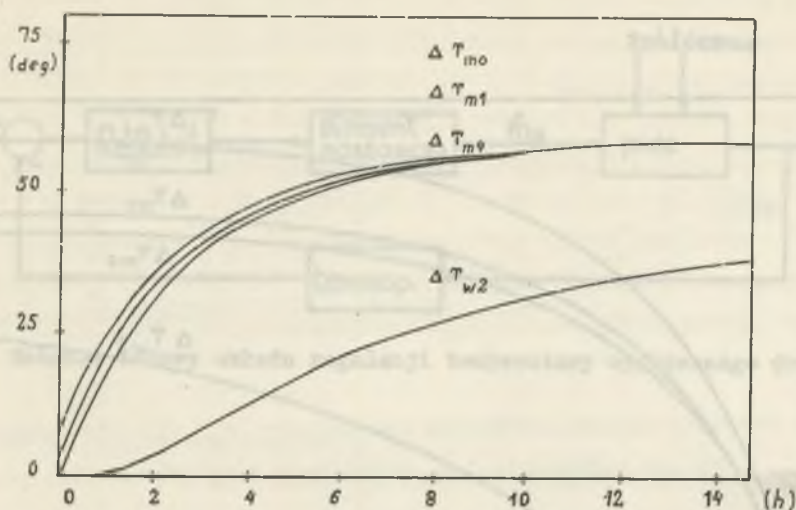
Przebiegi czasowe przyrostów temperatury spowodowane skokowymi zmianami ilości gazu (charakterystyka nastawcza) oraz strumienia masy cynkowanego drutu przedstawiono na rys. 3-6.



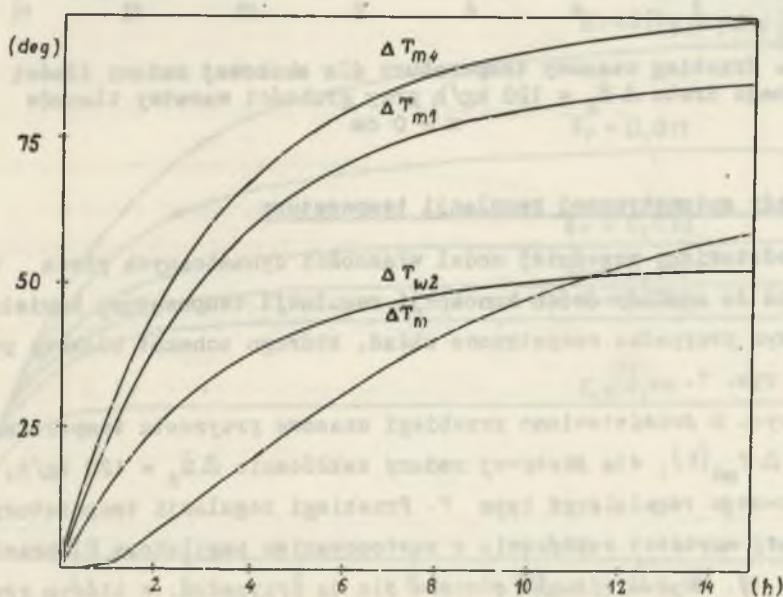
Rys. 3. Przebieg czasowy przyrostu temperatury $T(\tau)$ dla skokowej zmiany ilości gazu $\Delta \dot{M}_g = 6,4 \text{ kg/h}$



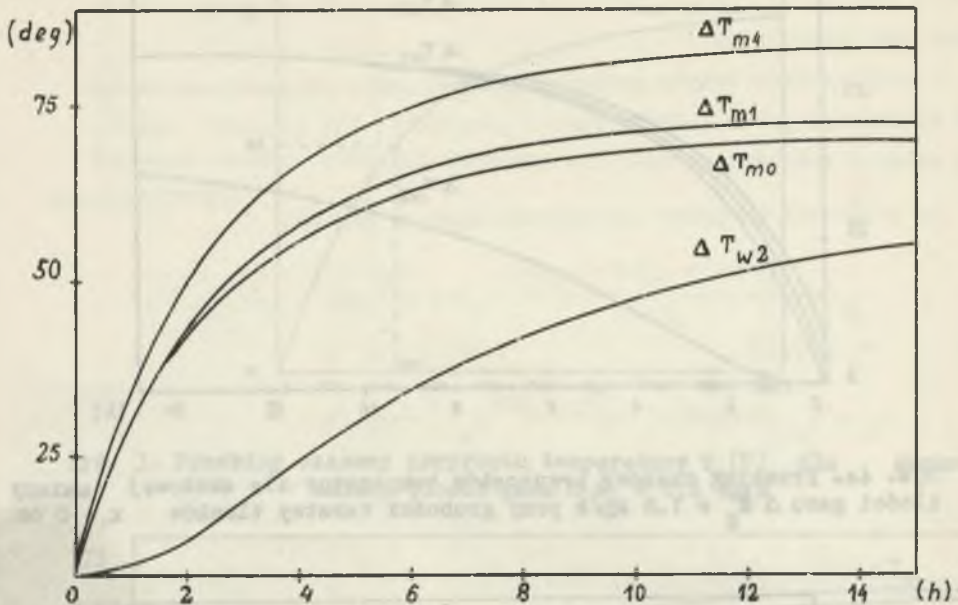
Rys. 4. Przebieg czasowy przyrostów temperatur dla skokowej zmiany ilości gazu $\Delta \dot{M}_g = 2,3 \text{ kg/h}$ przy grubości warstwy tlenków $x = 2 \text{ cm}$



Rys. 4a. Przebieg czasowy przyrostów temperatur dla skokowej zmiany ilości gazu $\Delta \dot{M}_g = 1,8 \text{ kg/h}$ przy grubości warstwy tlenków $x = 0 \text{ cm}$



Rys. 5. Przebieg czasowy przyrostów temperatur dla skokowej zmiany cynkowanego drutu $\Delta \dot{M}_d = 120 \text{ kg/h}$ przy grubości warstwy tlenków $x = 2 \text{ cm}$

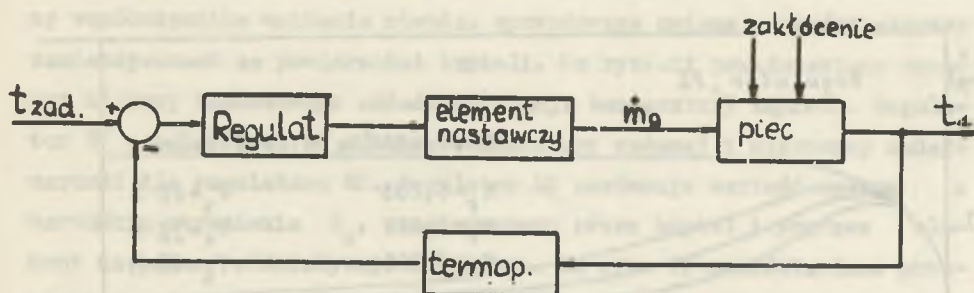


Rys. 6. Przebieg czasowy temperatury dla skokowej zmiany ilości cynkowanego drutu $\Delta \dot{M}_d = 120 \text{ kg/h}$ przy grubości warstwy tlenków $x = 0 \text{ cm}$

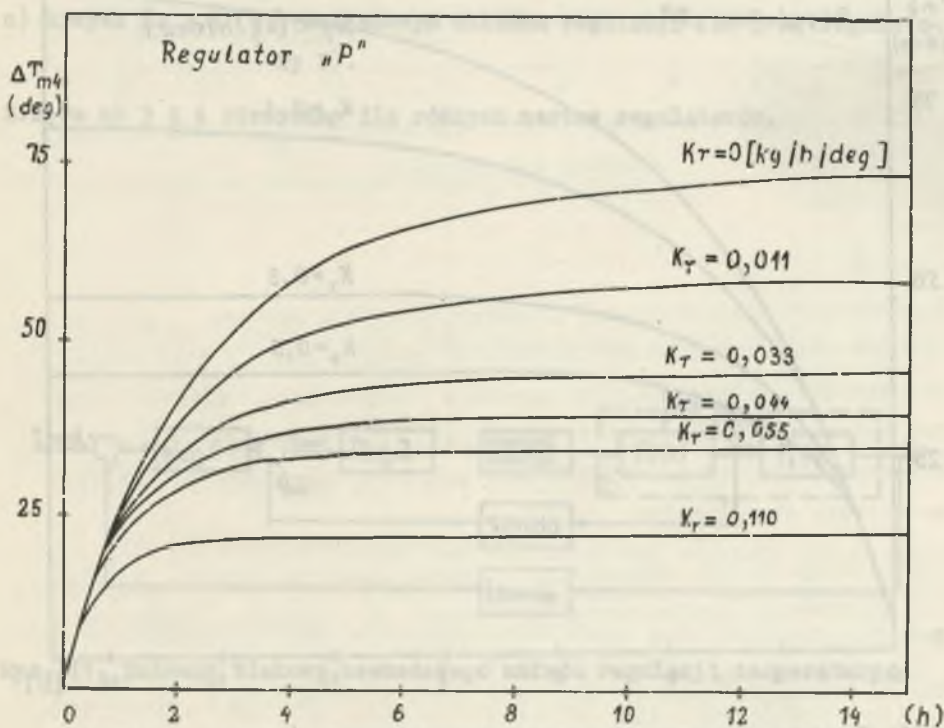
3. Układy automatycznej regulacji temperatury

Przedstawiony wcześniej model własności dynamicznych pieca wykorzystano do analizy dwóch koncepcji regulacji temperatury kąpieli. W pierwszym przypadku rozpatrzono układ, którego schemat blokowy przedstawia rys. 7.

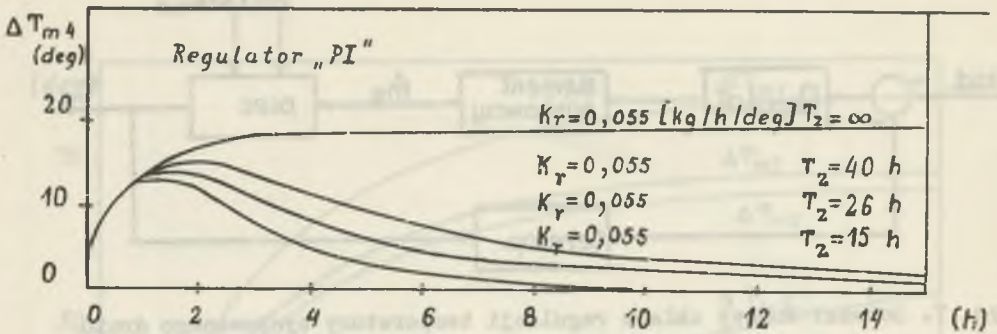
Na rys. 8 przedstawiono przebiegi czasowe przyrostu temperatury kąpieli $\Delta T_{m4}(\tau)$, dla skokowej zmiany zakłócenia $\Delta \dot{M}_d = 120 \text{ kg/h}$, przy zastosowaniu regulatorze typu P. Przebiegi regulacji temperatury dla tej samej wartości zakłócenia z zastosowaniem regulatora PI przedstawia rys. 9. Obydwa rysunki odnoszą się do przypadku, w którym grubość warstwy zanieczyszczeń $x = 0$. Przebiegi regulacji temperatury kąpieli dla grubości warstwy $x = 2 \text{ cm}$ z zastosowaniem regulatora P przed-



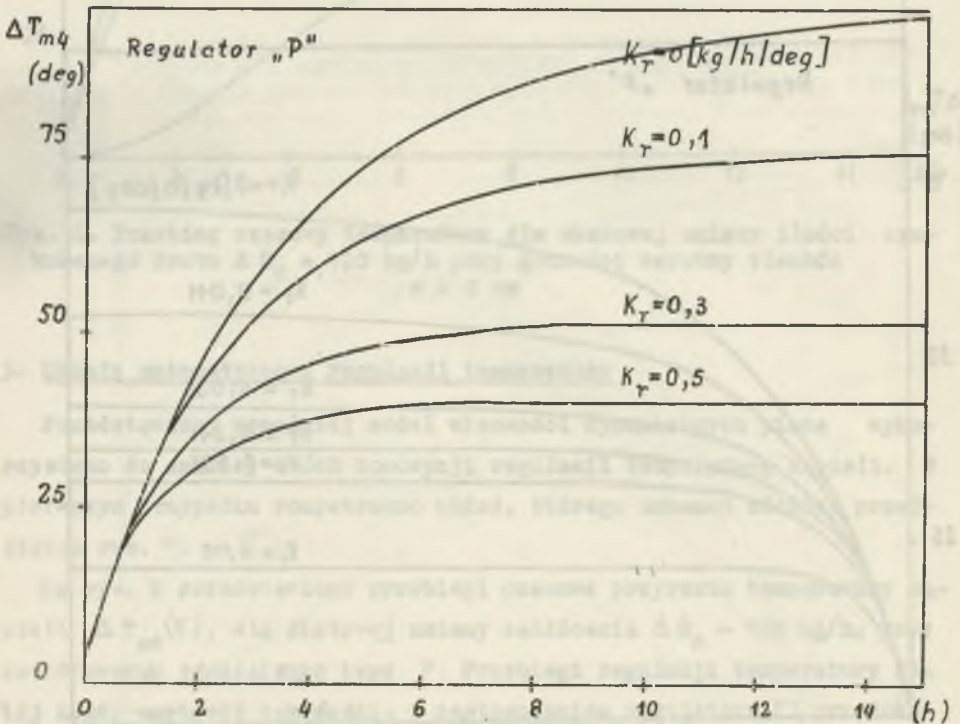
Rys. 7. Schemat budowy układu regulacji temperatury cynkowanego drutu



Rys. 8. Przebieg czasowy temperatury T_{m4} dla skokowej zmiany zakłócenia $\Delta \dot{M}_d = 120$ kg/h przy $x = 0$ cm



Rys. 9. Przebieg czasowy przyrostu temperatury T_{m4} (°C) dla skokowej zmiany zakłócenia $\Delta \dot{M}_d = 120 \text{ kg/h}$ przy $x = 0 \text{ cm}$

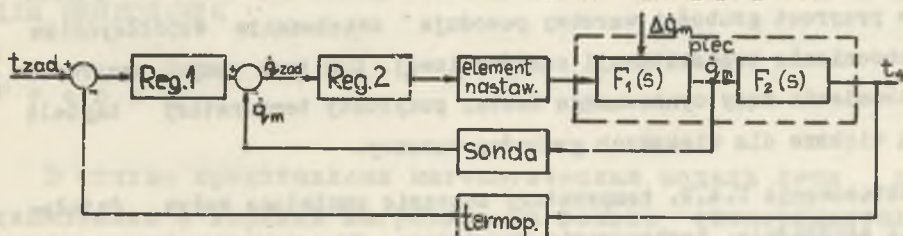


Rys. 10. Przebieg czasowy przyrostu temperatury ΔT_{m4} (°C) dla skokowej zmiany zakłócenia $\Delta \dot{M}_d = 120 \text{ kg/h}$ przy $x = 2 \text{ cm}$

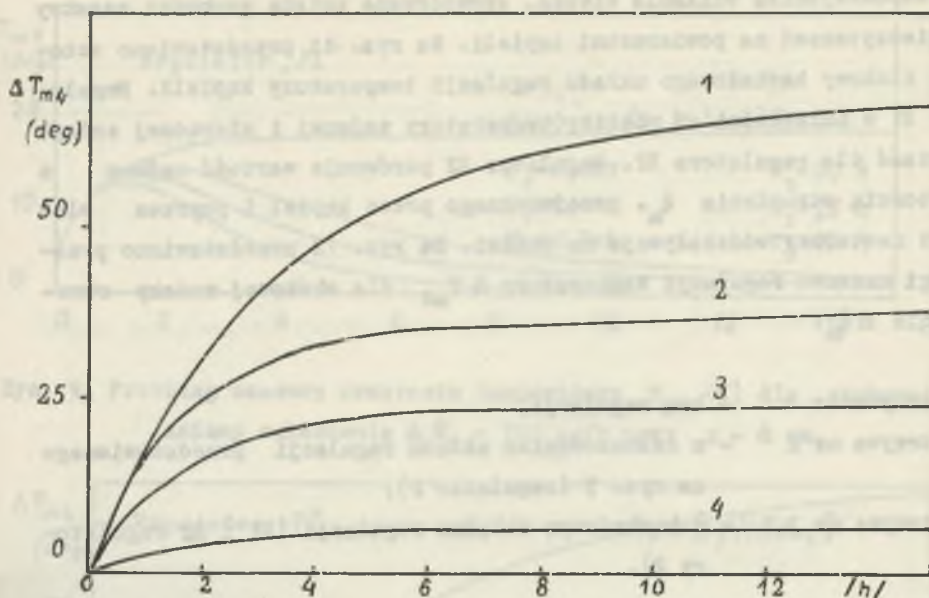
stawia rysunek 10. Rozpatrzony układ regulacji wolno reaguje na zmiany współczynnika wnikania ciepła, spowodowane zmianą grubości warstwy zanieczyszczeń na powierzchni kąpieli. Na rys. 11 przedstawiono schemat blokowy kaskadowego układu regulacji temperatury kąpieli. Regulator R1 w zależności od różnicy temperatury zadanej i mierzonej zadaje wartość dla regulatora R2. Regulator R2 porównuje wartość zadaną z wartością strumienia \dot{q}_m , przejmowanego przez kapiel i poprzez element nastawczy oddziałuje na obiekt. Na rys. 12 przedstawiono przebiegi czasowe regulacji temperatury ΔT_{m4} dla skokowej zmiany strumienia $\Delta \dot{q}_m$:

- a) krzywa nr 1 - bez regulacji,
- b) krzywa nr 2 - z zastosowaniem układu regulacji przedstawionego na rys. 7 (regulator P);
- c) krzywa nr 3,4 - z kaskadowym układem regulacji (R1 i R2 regulatory P).

Krzywe nr 3 i 4 otrzymano dla różnych nastaw regulatorów.



Rys. 11. Schemat blokowy kaskadowego układu regulacji temperatury.



Rys. 12. Przebiegi czasowe przyrostu temperatury ΔT_{m4} (T) dla skokowej zmiany strumienia \dot{q}_m

4. Wnioski

- a) Z porównania charakterystyk zakłóceńowych dla różnych grubości warstwy zanieczyszczeń na powierzchni kąpieli (rys. 5 i 6) wynika, że przyrost grubości warstwy powoduje zwiększenie współczynnika wzmocnienia transmitancji zakłóceńowej. Dla tych samych przyrostów strumienia masy cynkowanego drutu, przyrosty temperatury kąpieli są większe dla większych grubości warstwy.
- b) Zastosowanie U.A.R. temperatury znacznie zmniejsza wpływ działania zakłócenia. Zastosowanie regulatora PI zupełnie kompensuje wpływ zakłócenia (w stanie ustalonym $\Delta T_{m4} = 0$); wiąże się to jednak ze znacznymi zmianami dopływów gazów w porównaniu z regulatorem proporcjonalnym. Może to być przyczyną "przegrzania" pieca, a nawet doprowadzić do zniszczenia przepony.

- c) Układ regulacji kaskadowej szybciej reaguje na zmiany strumienia przejmowanego przez kąpiel, jednak wymaga zastosowania dwóch regulatorów oraz większych kwalifikacji od obsługi pieca przy doborze nastaw regulatorów

LITERATURA

- [1] Findeisen W. - Technika regulacji automatycznej, PWN, Warszawa, 1965.
- [2] Węgrzyn S. - Podstawy automatyki, PWN, Warszawa 1963.
- [3] Nowacki P., Szklarski L., Górecki H. - Podstawy teorii regulacji automatycznej, Komitet Elektrot. Pol. Akad. Nauk, PWN, Warszawa 1970.
- [4] Kopec St., Widenka J., Smulski W. - Identyfikacja pieców do cynkowania drutów z górnym nagrzewem, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej - Energetyka 1974.

Praca wpłynęła do Redakcji w grudniu 1973 roku.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАННЫ
ДЛЯ ЦИНКОВАНИЯ

Р е з ю м е

В статье представлена математическая модель печи для цинкования с верхним нагревом. На основе экспериментальных и теоретических исследований даны две системы автоматического регулирования температуры ванны для цинкования. Исследуемые системы автоматического регулирования замоделированы на аналоговой вычислительной машине.

THE TEMPERATURE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE ZINC BATH

Summary

There has been presented a mathematical model of the zinc plating with the upper heating. On the basis of experiment and mathematical considerations there have been developed two temperature automatic control systems of the zinc bath. Both of them were subjected to further investigation by means of electronic analog computer.

4. Initial