

**TOMASZ TEODORCZYK, JERZY ZGRAJA**

**Politechnika Łódzka  
Instytut Elektroenergetyki**

## **ESTYMACJA WSPÓŁCZYNNIKA KONWEKCJI DLA WSADU WALCOWEGO NAGRZEWANEGO INDUKCYJNIE**

*Streszczenie – W pracy przedstawiono metodę pozwalającą oszacować wartość współczynnika konwekcji dla nagrzewanego indukcyjnie wsadu walcowego. Podano zależność współczynnika konwekcji od temperatury powierzchni zewnętrznej nagrzewanego wsadu.*

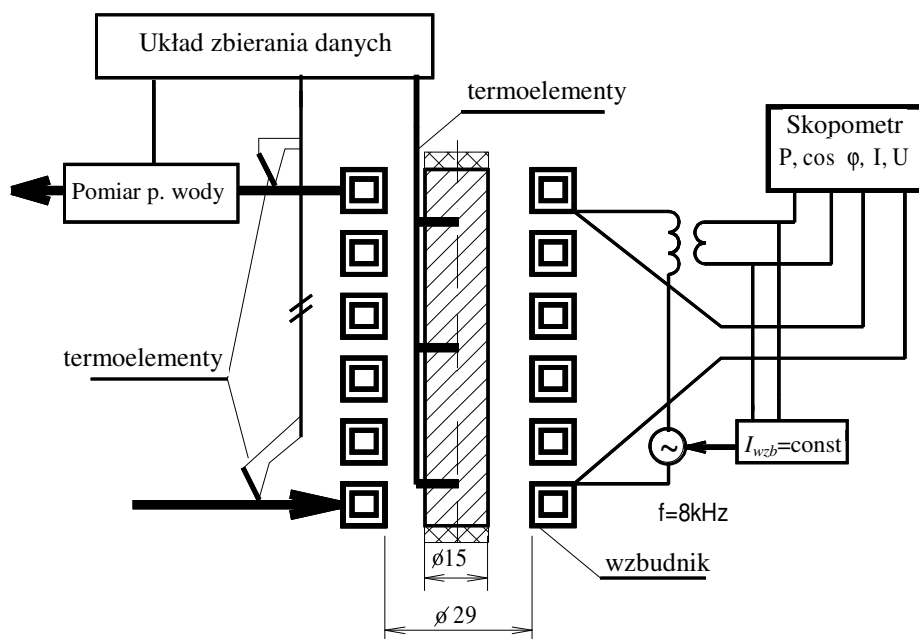
### **1. WPROWADZENIE**

Rozwiązywanie różnych zagadnień w dziedzinie nagrzewania indukcyjnego wymaga bardzo często znajomości pola temperatury w analizowanym wsadzie. Realizacja tego celu oznacza, że znane są podstawowe parametry materiałowe wsadu takie jak np.: przewodność cieplna właściwa  $\lambda$ , ciepło właściwe  $c$ , rezystywność  $\rho$ . Istotna jest zależność tych wielkości od temperatury, a więc znajomość następujących funkcji:  $\lambda(\vartheta)$ ,  $c(\vartheta)$ ,  $\rho(\vartheta)$ . Aby oszacować wartości tych funkcji na drodze symulacji komputerowej i pomiarów weryfikujących niezbędne staje się określenie warunków wymiany ciepła z otoczeniem na powierzchni zewnętrznej wsadu czyli wyznaczenie między innymi wartości współczynnika konwekcji  $\alpha_k$  w funkcji temperatury powierzchni zewnętrznej nagrzewanego wsadu. Estymacji funkcji  $\alpha_k = f(\vartheta)$  można dokonać metodą doświadczalno-obliczeniową.

### **2. ESTYMACJA WSPÓŁCZYNNIKA KONWEKCJI**

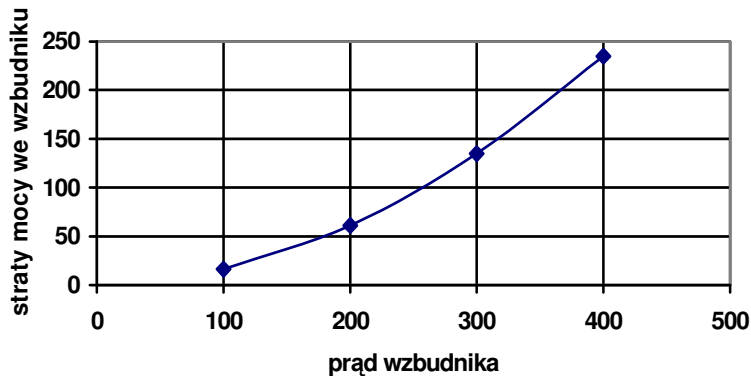
Eksperyment pozwalający na wyznaczenie zależności  $\alpha_k = f(\vartheta)$  przeprowadzony został na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Użyty do prób wsad miał następujące wymiary: średnica  $d = 15$  mm, wysokość  $h = 51,5$  mm.

Wsad nagrzewany był we wzbudniku cylindrycznym o średnicy wewnętrznej  $D = 29$  mm i wysokości równej wysokości wsadu. Materiałem wsadu była stal niemagnetyczna.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do wyznaczania współczynnika konwekcji

Badanie wymaga przeprowadzenia dwóch niezależnych etapów. W etapie pierwszym wyznacza się straty mocy we wzbudniku w funkcji wartości skutecznej prądu wzbudnika  $P_{strat} = f(I_{wzb})$ . Pomiary przeprowadzone zostały dla kilku różnych wartości skutecznych prądu wzbudnika tak, aby dla wartości maksymalnej prądu temperatura wsadu była rzędu 800-900°C. W trakcie wykonywania tych pomiarów wsad był izolowany cieplnie. Postępowanie takie pozwalało na założenie, że przy relatywnie „szybkim” pomiarze brak jest oddziaływania cieplnego (głównie wymiana radiacyjna) nagrzewającego się wsadu na wzbudnik. Można więc z pewnym przybliżeniem przyjąć, że straty mocy we wzbudniku są równe mocy odprowadzanej przez wodę w obiegu chłodzącym.  $P_{strat}$  pomierzone zostało metodą kalorymetryczną. Do pomiaru temperatury wody wlotowej i wylotowej wykorzystano termoelementy płaszczone typu K z izolowaną spoiną  $\Phi$  1 mm, zaś do pomiaru przepływu wody przepływomierz turbinkowy (do 5 l/min). Do pomiarów wielkości elektrycznych stosowano głównie skopometr oraz mierniki tablicowe. Wszystkie mierzone wielkości były rejestrowane przez układ zbierania danych (UZD). Uzyskany przebieg zależności  $P_{strat} = f(I_{wzb})$  pokazany został na rys. 2.

Rys. 2. Przebieg zależności  $P_{strat} = f(I_{wzb})$ 

W drugim etapie badań wyznaczono moc dostarczaną do układu wzбудnik-wsad (UWW)  $P_{uww}$  dla kilku różnych wartości prądu wzbudnika  $I_{wzb}$  oraz rozkład temperatury w warstwie przypowierzchniowej wzdłuż tworzącej wsadu dla stanu cieplnie ustalonego (trzy punkty pomiarowe). Prąd wzbudnika dobierano tak, by maksymalna temperatura wsadu była rzędu 800-900°C. Wsad był nieizolowany cieplnie, co oznacza, że na jego powierzchni wystąpiły straty ciepła przez konwekcję i radiację. Zarówno wzbudnik jak i wsad miały czernione powierzchnie. Punkty pomiarowe temperatury rozmieszczono we wsadzie następująco: połowa wysokości wsadu ( $h = 51,5$  mm) i 7,5 mm od obu powierzchni czołowych wsadu.

Trzy termoelementy płaszczonego typu K z izolowaną spoiną  $\Phi$  0,5 mm umieszczone zostały w jednym otworze. Zarówno moc  $P_{uww}$  jak i temperatury były rejestrowane przez UZD.

Znając zależności  $P_{strat} = f(I_{wzb})$  oraz  $P_{uww} = f(I_{wzb})$  można już określić moc wydzielaną we wsadzie z równania:

$$P_{wsad} = P_{uww} - P_{strat} \quad (1)$$

gdzie:  $P_{wsad}$  – moc wydzielana we wsadzie,

$P_{uww}$  – moc dostarczana do UWW,

$P_{strat}$  – straty mocy we wzbudniku.

Drugi etap eksperymentu prowadzony był w stanach cieplnie ustalonych UWW, więc obowiązuje zależność:

$$P_{wsad} = P_k + P_r \quad (2)$$

gdzie:  $P_k$  – moc strat wsadu przez konwekcję,

$P_r$  – moc strat wsadu przez radiację.

Jeżeli powierzchnie zewnętrzne wsadu oraz wzbudnika były czernione i ponadto zakłada się, że temperatura otoczenia równa jest średniej temperaturze wody chłodzącej, to wówczas moc strat radiacyjnych można określić [1], [2]:

$$P_r = \varepsilon * C_0 * \left[ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] * S \quad (3)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – misyjność całkowita wsadu,

$$C_0 = 5,6697 \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]},$$

$T_w$  – średnia temperatura powierzchni wsadu (skala Kelvina),

$T_o$  – temperatura otoczenia (skala Kelvina),

$S$  – powierzchnia oddawania ciepła wsadu.

Wartość emisyjności całkowitej wsadu oszacowano, wykorzystując w tym celu pirometr radiacyjny z nastawianą wartością  $\varepsilon$ . Jako średnią temperaturę powierzchni wsadu przyjęto średnią arytmetyczną pomiarów przypowierzchniowych temperatury przeprowadzonych w drugim etapie eksperymentu. Znając wartości  $P_{wsad}$  oraz  $P_r$ , można współczynnik konwekcji wyznaczyć z zależności:

$$\alpha_k = \frac{P_k}{(\vartheta_w - \vartheta_o) * S} \quad (4)$$

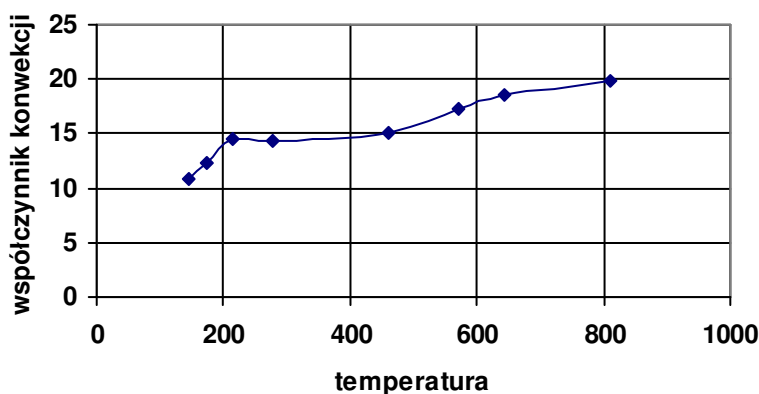
gdzie:  $\alpha_k$  – współczynnik konwekcji,

$\vartheta_w$  – średnia temperatura powierzchni wsadu,

$\vartheta_o$  – temperatura otoczenia,

$S$  – powierzchnia oddawania ciepła wsadu.

Dla przebadanego wsadu przebieg poszukiwanej funkcji  $\alpha_k = f(\vartheta)$  pokazany został na rys. 3.



Rys. 3. Przebieg zależności  $\alpha_k = f(\vartheta)$

### **3. PODSUMOWANIE**

Przedstawiona metoda doświadczalno-obliczeniowa estymacji współczynnika konwekcji dla walcowych wsadów nagrzewanych indukcyjnie pozwala uniknąć dość kłopotliwego korzystania z liczb podobieństwa oraz równań kryterialnych. Wprowadzone liczne założenia upraszczające rzutują oczywiście na dokładność uzyskanych rezultatów, choć z technicznego punktu widzenia uznać je można za możliwe do akceptacji.

### **LITERATURA**

- [1] Hering M.: Termokinetyka dla elektryków. WNT, Warszawa 1980.
- [2] Hauser J.: Podstawy elektrotermicznego przetwarzania energii. Zakład Wydawniczy K. Domke, Poznań 1996.

## **ESTIMATION OF CONVECTION COEFFICIENT OF INDUCTION HEATED CYLINDRICAL CHARGE**

### **Summary**

In the paper the method allows to estimation of convection coefficient of induction heated cylindrical charge has been presented. A dependence of the convection coefficient on the temperature of induction heated charge has been given.

Keywords: induction heating, optimization.