

6. WYZNACZANIE PARAMETRÓW ELEKTRYCZNO-CIEPLNYCH OPOROWYCH PRZEWODÓW I SKRĘTEK GRZEJNYCH, PRACUJĄCYCH W UKŁADZIE ODNIESIENIA

6.1. Cel ćwiczenia:

- zapoznanie się ze sposobami określania parametrów elektryczno-cieplnych różnych przewodów grzejnych,
- zapoznanie się z parametrami wpływającymi na intensywność oddawania ciepła przez przewody grzejne różnych kształtów, pracujących w spokojnym ośrodku płynnym,
- wyznaczanie relacji pomiędzy mocą cieplną oddawaną przez przewody grzejne na drodze radiacji i na drodze przewodzenia, a temperaturą ich powierzchni.

6.2. Wiadomości podstawowe

Obliczenie właściwych parametrów elektryczno-cieplnych przewodu grzejnego polega na wyznaczeniu albo wartości napięcia, którym można zasilić dany przewód grzejny, albo wymiarów geometrycznych przewodu grzejnego dla napięcia o zadanej wartości. Wykorzystuje się w tym celu dwie podstawowe zależności wiążące parametry elektryczne przewodu:

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{\rho_1 l_1}{s_1} \quad (2)$$

oraz zależność:

$$q_1 = \frac{P_1}{S_1} = f(t_1) \quad (3)$$

wiązącą jego parametry elektryczne i cieplne, przy czym:

P_1 – elektryczna moc czynna (moc grzejna, strumień cieplny) wydzielana w przewodzie [W]; U_1 – napięcie [V]; R_1 – rezystancja przewodu [Ω]; ρ_1 – rezystywność materiału przewodu [$\Omega \cdot m$]; l_1 – długość przewodu [m]; s_1 – pole powierzchni przekroju przewodu [m^2]; q_1 – obciążenie powierzchniowe przewodu [W/m^2]; S_1 – pole powierzchni zewnętrznej przewodu [m^2]; t_1 – temperatura przewodu grzejnego [$^{\circ}C$].

Po przekształceniu wzorów: (1), (2) i (3) otrzymuje się, dla przewodów o przekroju kołowym (średnica d_1 [m]), następujące końcowe wzory obliczeniowe:

$$d_1 = 0,74 \sqrt[3]{\left(\frac{P_1}{U_1}\right)^2 \frac{\rho_1}{q_1}} \quad (4)$$

$$l_1 = 0,785 \frac{U_1^2 d_1^2}{P_1 \rho_1} \quad (5)$$

Wydzielony strumień cieplny musi równać się zapotrzebowanej mocy, a wartość temperatury t_1 , jaką uzyskuje pracujący przewód grzejny przy obciążeniu powierzchniowym q_1 (zob. (3)), nie może przekraczać jego temperatury dopuszczalnej, przy czym przez dopuszczalną temperaturę rozumie się zwykle maksymalną roboczą temperaturę przewodów grzejnych podawaną przez producentów przewodów; dla przewodów o dostatecznie dużych wymiarach przekrojów poprzecznych jej wartości są uzależnione głównie od rodzaju otoczenia (np. gazu), z którym styka się powierzchnia przewodu.

Uzyskanie odpowiedniej wartości mocy cieplnej jest proste, jeżeli można dobrać wartość rezystancji przewodu grzejnego dla zadanego napięcia lub wartość napięcia dla zadanej rezystancji (prawo Joule'a, wzory (1) i (2)). Ze względu jednak na dopuszczalne wartości temperatury pracy przewodów grzejnych właściwe obliczenie ich parametrów elektryczno-cieplnych znacznie się komplikuje. Z termodynamiki wiadomo, że temperatura, jaką osiągnie przewód grzejny pracujący w urządzeniu oporowym, jest zależna nie tylko od elektrycznej mocy czynnej, lecz także od wartości pola powierzchni zewnętrznej przewodu, kształtu przewodu i jego wymiarów, rodzaju i jakości powierzchni przewodu, temperatury, rodzajów i wzajemnego usytuowania powierzchni otaczających przewód, temperatury i rodzaju płynu oraz sposobu ruchu płynu otaczającego przewód.

W związku z wielką liczbą zmiennych, które mają wpływ na wartość temperatury pracującego przewodu grzejnego, w praktyce obliczeniowej wprowadza się znaczne uproszczenia, które pozwalają oszacować temperaturę przewodu grzejnego. Metody projektowe oporowych przewodów grzejnych opierają się częściowo lub w całości na bilansie cieplnym przewodu grzejnego, pracującego w najprostszym i łatwo odtwarzalnym układzie termokinetycznym, zwanym układem odniesienia.

Ciepły układ odniesienia to stacjonarny układ jednoczesnej wymiany ciepła pomiędzy typowo ukształtowanym przewodem grzejnym (przewód wyprostowany, skrętka, węzownica) ułożonym najczęściej poziomo a:

- spokojnym (nieruchomym) gazem diatermicznym o ciśnieniu atmosferycznym i o temperaturze t_{f2} ,
- niezwiérciadlanymi i odległymi od przewodu powierzchniami o temperaturze t_{f2} , ograniczającymi przestrzeń wypełnioną tym gazem.

W ciepłych układach odniesienia moce cieplne są wymieniane jednocześnie (równolegle) na dwóch niezależnych od siebie – a zjawiskowo całkiem odmiennych – drogach przyjmowania (wymiany) ciepła: przez konwekcję i przez radiację, więc na gęstość strumienia cieplnego q_1 przewodu (na obciążenie powierzchniowe przewodu) składają się gęstości powierzchniowe mocy wymieniane na drodze konwekcji (q_k) i radiacji (q_r), tzn. (zob (3)):

$$q_1 = \frac{P_1}{S_1} = q_k + q_r = \frac{P_k}{S_1} + \frac{P_r}{S_1} = f(t_1) \quad (6)$$

Średnią gęstość powierzchniową strumienia cieplnego q_k (w W/m^2) wymienianego na drodze przyjmowania opisuje wzór Newtona:

$$q_k = \frac{P_k}{S} = \alpha_k (t_1 - t_{f2}) \quad (7)$$

gdzie α_k (w $W/(m^2 \cdot K)$) jest konwekcyjnym współczynnikiem przyjmowania ciepła (współczynnikiem przyjmowania ciepła przez konwekcję).

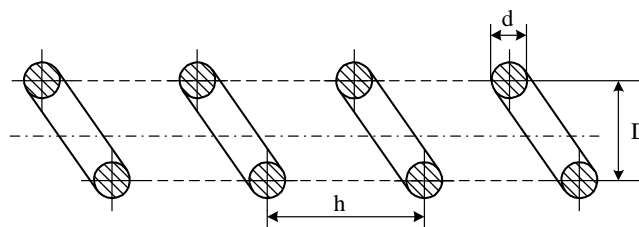
Wartość α_k , zależne od bardzo wielu zmiennych, wyznacza się dla konwekcji swobodnej z równania kryterialnego o postaci:

$$Nu \approx f(Gr \cdot Pr) \quad (8)$$

to znaczy:

$$\frac{\alpha_k l}{\lambda_f} = f\left(\frac{\beta_f g l^3 \Delta t}{\nu_f^2} \frac{c_f \mu_f}{\lambda_f}\right) \quad (9)$$

gdzie: Nu – liczba Nusselta, Gr – liczba Grashofa, Pr – liczba Prandtla, α_k – współczynnik przyjmowania ciepła przez konwekcję (w $W/(m^2 \cdot K)$), l – wymiar liniowy równy np.: średnicy przewodu, wysokości ściany lub średnicy rury (w m), λ_f – przewodność cieplna właściwa płynu (w $W/(m \cdot K)$), β_f – współczynnik rozszerzalności objętościowej płynu ($\beta_f = 2/(T_1 + T_{f2})$) (w $1/K$), g – przyspieszenie ziemskie (w m/s^2), t_1 , T_1 – temperatura powierzchni granicznej (w $^{\circ}C$ lub w K), t_{f2} , T_{f2} – temperatura płynu poza warstwą przyścienną (w $^{\circ}C$ lub w K), ν_f – lepkość kinematyczna płynu (w m^2/s), c_f – ciepło właściwe płynu (w $W \cdot s/(kg \cdot K)$), μ_f – lepkość dynamiczna płynu (w $N \cdot s/m^2$).



Rys. 6.1. Wymiary skrętki grzejnej

Przyjmując, że dla wyprostowanego drutu wielkość wymiaru liniowego l (zob. (9)) jest równa jego średnicy d, a dla skrętki grzejnej wielkość l jest równa średnicy ekwiwalentnej skrętki D_e równej (rys. 6.1):

$$D_e = d + \frac{1}{w} (\pi D - d) = d \left(1 + \frac{\pi s - 1}{w}\right) \quad (10)$$



gdzie $w=h/d$ jest współczynnikiem wyciągnięcia skrętki, natomiast $s=D/d$ – współczynnikiem skręcenia skrętki, wartość konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła dla drutu (α_{kd}) i dla skrętki (α_{ks}) można wyznaczyć ze wzorów:

$$\alpha_{kd} = \frac{\lambda_f}{d_1} A_d \quad (11)$$

$$\alpha_{ks} = \frac{\lambda_f w}{\pi d s} A_{d=De} \quad (12)$$

gdzie A_d (równe $A_{d=De}$) wyniosą:

– dla zakresu $10^{-6} < Gr_d Pr < 10^4$:

$$A_d = \left[1,325 + 0,03428 \lg(Gr_d Pr) + 0,00288 \lg^2(Gr_d Pr) - 0,00003 \lg^4(Gr_d Pr) \right]^{-\lg(Gr_d Pr)} \quad (13)$$

– dla zakresu $10^4 < Gr_d Pr < 10^9$:

$$A_d = \left[1,322 + 0,03917 \cdot \lg(Gr_d Pr) + 0,00156 \lg^2(Gr_d Pr) - 0,00021 \lg^3(Gr_d Pr) \right]^{-\lg(Gr_d Pr)} \quad (14)$$

Gęstość strumienia ciepłego wymianianego w układzie odniesienia na drodze radiacji jest równa:

– dla wyprostowanego drutu grzejnego

$$q_{rd12} = \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_{r2}^4) \quad (15)$$

– dla skrętki grzejnej

$$q_{rs12} = \frac{\varphi_{s12} \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_{r2}^4)}{\varepsilon_1 + \varphi_{s12} - \varepsilon_1 \varphi_{s12}} \quad (16)$$

przy czym: ε_1 – współczynnik emisyjności powierzchni drutu; σ – stała Stefana ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), φ_{s12} – współczynnik konfiguracji skrętki równy

$$\varphi_{s12} = 0,221 + 0,1904 w - 0,01666 w^2 \quad (17)$$

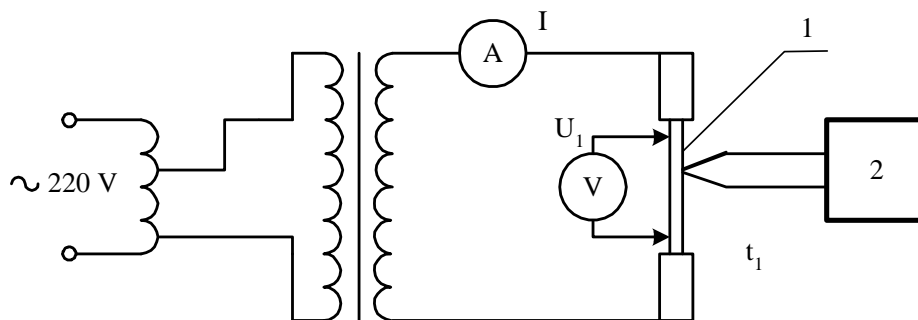
Relacje pomiędzy obciążeniami powierzchniowymi drutu (q_{1d}) i skrętki grzejnej (q_{1s}) a temperaturami powierzchni przewodów odpowiednio: t_{1d} i t_{1s} można wyznaczać w sposób teoretyczny, wykorzystując dostępny program komputerowy, napisany z wykorzystaniem zależności (6) ÷ (17).

6.3. Program ćwiczenia

W ćwiczeniu należy mierzyć temperatury, napięcia i prądy wyprostowanego oporowego przewodu grzejnego oraz skrętki grzejnej, nagrzewanych stopniowo do coraz wyższych temperatur. Temperatury (do około 800°C) należy mierzyć z wykorzystaniem termoelementów NiCr-NiAl.

6.4. Przebieg ćwiczenia

- połączyć badany wyprostowany przewód grzejny i skrętkę grzejną zgodnie z rysunkiem 6.2 i mierzyć każdorazowo wartości U_1 oraz I dla około pięciu nastawionych różnych wartości temperatury t_1 z zakresu $100^\circ\text{C} \ll t_1 \ll 800^\circ\text{C}$ dla każdego z badanych elementów grzejnych,
- pomierzyć wartości średnicy drutu i charakterystyczne wymiary geometryczne skrętki (skok s , średnicę D), oraz długości: l_d przewodu wyprostowanego oraz l_{ds} przewodu skrętki, na których mierzono napięcia U_1 ,
- wyliczyć wartości powierzchni zewnętrznej przewodu wyprostowanego (S_d) i przewodu skrętki (S_{ds}) oraz wartości ich obciążeń powierzchniowych q_d i q_{ds} równych: $q=P/S=UI/S$,
- skorzystać z programu komputerowego i określić w sposób obliczeniowy relacje pomiędzy wartościami obciążenia powierzchniowego q i temperatury t_1 powierzchni przewodu wyprostowanego i przewodu skrętki.



Rys. 6.2. . Układ pomiarowy: 1 – wyprostowany przewód grzejny lub skrętka grzejna, 2 – miliwoltomierz o dużej rezystancji wewnętrznej

6.5. Zawartość sprawozdania

- schemat oraz zwięzły opis badanych układów,
- zestawienie wszystkich pomiarów i obliczeń,
- wykreślenie dla badanych przewodów przebiegów $q_{1d}=f(t_{1d})$ i $q_{1s}=f(t_{1s})$ uzyskanych metodą eksperymentalną i metodą obliczeniową,
- analiza uzyskanych wyników,
- ocena badanych układów.

Literatura

1. Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej. Wyd. Pol. Poznańskiej, 2006.
2. Hauser J.: Praca oporowych przewodów grzejnych w wybranych układach termokinetycznych. Wyd. Pol. Poznańskiej, 1998.
3. Hering M.: Podstawy elektrotermii. Cz. 1. WNT, Warszawa 1992.