

## Termoanemometr – wzorcowanie sondy. Pomiar rozkładu prędkości termoanemometrem.

### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych właściwości metrologicznych termoanemometru stałotemperaturowego, sposobu jego wzorcowania oraz podstaw interpretacji sygnałów napięciowych otrzymywanych na wyjściu z mostka termoanemometru.

### 2. Podstawy teoretyczne

Termoanemometr jest przyrządem do pomiaru chwilowych wartości prędkości płynu w polu przepływu turbulентnego. Może być także wykorzystywany do pomiaru zmiennego pola temperatury, gęstości, wilgotności czy też składu fizycznego płynu. Podstawowym elementem termoanemometru jest czujnik wykonany z drutu oporowego o średnicy  $1\div 5 \mu\text{m}$  rozciągniętego pomiędzy dwoma wspornikami. Materiał, z którego wykonane jest włókno czujnika musi charakteryzować się dużą zmiennością oporu z temperaturą (np. wolfram, platyna lub platynoiryd).

W przypadku przepływu izotermicznego jednorodnego płynu strumień cieplny, odprowadzany od elektrycznie grzanego elementu oporowego czujnika do otaczającego płynu, zależy od prędkości przepływu oraz geometrii i wymiarów czujnika. Zależność ta leży u podstaw zasady działania przyrządów do wyznaczania chwilowego wektora prędkości w polu przepływu turbulентnego tj. termoanemometrów. Właściwe wykorzystanie termoanemometru i interpretacja sygnałów elektrycznych na wyjściu przyrządu pomiarowego wymaga znajomości podstawowych praw wymiany ciepła między czujnikiem a otaczającym płynem.

Wymiana ciepła w układzie element oporowy - płyn zachodzi na drodze konwekcji swobodnej, konwekcji wymuszonej i promieniowania cieplnego. Czujnik prędkości przepływu powinien być tak dobrany, aby dominującą rolę

w wymianie ciepła odgrywała konwekcja wymuszona przy ograniczeniu wpływu pozostałych czynników. Jeśli płyn jest w spoczynku lub prędkość przepływu jest bardzo mała to w procesie wymiany ciepła dominuje konwekcja swobodna. W miarę wzrostu prędkości przepływu coraz więcej ciepła od elementu oporowego do otoczenia odprowadzane jest drogą konwekcji wymuszonej. Wpływ promieniowania cieplnego minimalizuje się przez dobór odpowiednio niskiej temperatury pracy czujnika (poniżej  $200^{\circ}\text{C}$ ). Dla włókna oporowego o skończonej długości należy dodatkowo uwzględnić odpływ ciepła drogą przewodzenia do wsporników, których temperatura jest równa temperaturze płynu omywającego czujnik.

Strumień ciepła przejmowany przez płyn od elementu oporowego drogą konwekcji wymuszonej wynosi:

$$q_k = \alpha \pi d L (T_w - T_a) \quad (1)$$

gdzie:

- $\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła (zależny od własności fizycznych płynu, parametrów stanu płynu, rodzaju przepływu (laminarny, turbulентny), kształtu, wymiarów oraz stanu powierzchni ciała stałego),
- $d, L$  - średnica i długość włókna oporowego,
- $T_w$  - temperatura włókna,
- $T_a$  - temperatura otoczenia.

Równowaga (choćby chwilowa) wymaga, aby ilość energii przekazywanej przez czujnik do otoczenia była równa energii dostarczonej przez płynący przez czujnik prąd elektryczny

$$q_k = \frac{E^2}{R_w}, \quad (2)$$

gdzie:

- $E$  - napięcie prądu płynącego przez czujnik,
- $R_w$  - opór elektryczny włókna pomiarowego.

W umiarkowanym zakresie temperatur opór włókna jest liniową funkcją temperatury

$$R_w = R_a [1 + b (T_w - T_a)], \quad (3)$$

gdzie:  $b$  - temperaturowy współczynnik oporu.

Porównując zależność (1) z (2), otrzymamy po uwzględnieniu (3)

$$\frac{E^2}{R_w} = \frac{\alpha\pi dL}{b} \left( \frac{R_w}{R_a} - 1 \right). \quad (4)$$

Jak wspomniano wcześniej, dla włókna oporowego o skończonej długości należy uwzględnić odpływ ciepła drogą przewodzenia do wsporników sondy, których temperatura jest równa temperaturze płynu  $T_w$ . Ten strumień ciepła opisany jest prawem Fouriera.

$$q_p = -\lambda \frac{dT_w}{dx}, \quad (4a)$$

gdzie przewodność cieplna  $\lambda$  jest własnością fizyczną materiału włókna.

Ponieważ dokładne wyznaczenie zależności między  $\dot{q}_k$  a  $\dot{q}_p$  drogą teoretyczną nie jest możliwe (z uwagi na mnogość parametrów na nie wpływających) konieczne jest indywidualne wzorcowanie każdego czujnika. Generalnie biorąc, odpowiedź układu pomiarowego na zmianę prędkości przepływu można wyrazić zależnością:

$$\frac{E_w^2}{R_w} = (A' + B' V^n) (T_w - T_a), \quad (5)$$

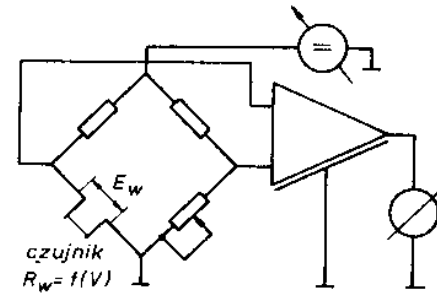
gdzie:  $E_w$  - spadek napięcia na rezystancji czujnika,

$A'$ ,  $B'$ ,  $n$  - stałe.

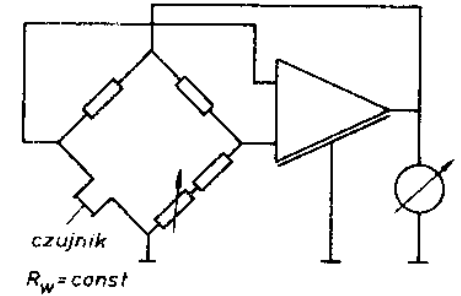
Współczesne termooanemometry budowane są w dwóch podstawowych układach: termooanemometr stałoprądowy ( $I_w = \text{const}$ ) - rys. 1 i termooanemometr stałotemperaturowy - rys. 2, dla którego ( $T_w = \text{const}$ ), a zatem zgodnie z (3)  $R_w = \text{const}$ .

W układzie  $I_w = \text{const}$  włókno czujnika podgrzewane jest prądem elektrycznym o stałym natężeniu, niezależnym od prędkości przepływu. Spadek napięcia  $E_w$  na rezystancji czujnika określa strumień doprowadzonej energii elektrycznej, stanowi więc zgodnie z zależnością (5) miarę prędkości przepływu. Zmiany prędkości  $V$  wywołują zmiany temperatury  $T_w$  czujnika a tym samym i oporności  $R_w$  (czasami ze względu na pojemność cieplną

włókna zmiany te mogą nie nadążać za szybkimi zmianami prędkości chwilowych).



Rys. 1 Schemat elektryczny termooanemometru stałoprądowego



Rys. 2 Schemat elektryczny termooanemometru stałotemperaturowego

## 2.1. Termooanemometr stałotemperaturowy

W układzie  $T_w = \text{const}$  (rys. 2) temperatura włókna sondy utrzymywana jest na prawie stałym poziomie niezależnym od prędkości  $V$ , co uzyskuje się przez zastosowanie w obwodzie elektrycznym ujemnego sprzężenia zwrotnego równoważającego straty ciepła czujnika na rzecz otoczenia. Termooanemometr pracujący w układzie stałotemperaturowym ma nieco mniejszą czułość ale bezwładność cieplna włókna sondy nie odgrywa istotnej roli, pozwalając osiągnąć pasmo przenoszenia do 100 kHz. Dla tego typu termooanemometru zależność (4.5) przybiera postać zwaną zależnością Kinga:

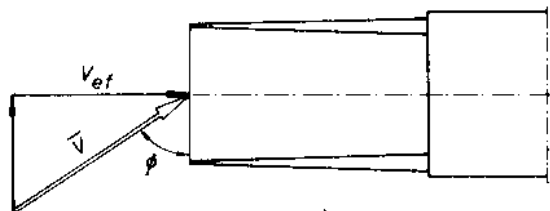
$$E^2 = A^2 + B V_{ef}^n. \quad (6)$$

Współczynniki  $A$ ,  $B$  i  $n$  dla umiarkowanego zakresu prędkości można traktować jako stałe i wyznaczyć drogą wzorcowania. Prędkość efektywna  $V_{ef}$  jest to prędkość, która decyduje o ilości ciepła odbieranego przez płyn od czujnika i dla drutu prostego określona jest równaniem

$$V_{ef}^2 = V^2 (\sin^2 \phi + k \cos^2 \phi), \quad (7)$$

gdzie:  $\phi$  - kąt pomiędzy wektorem prędkości  $\vec{V}$  a osią włókna.

Dla czujników, dla których  $\frac{L}{d} > 200$  zachodzi  $k = 0,2$ , można więc z przybliżeniem przyjąć, że  $V_{ef}$  jest to składowa wektora prędkości prostopadła do włókna sondy (rys. 3).



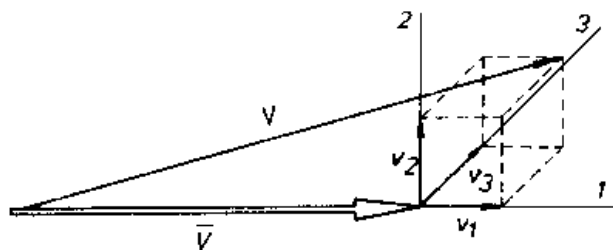
Rys. 3 Trójkąt prędkości przy skośnym opływie sondy

Sygnał napięciowy na zaciskach mostka stałotemperaturowego, będący odpowiedzią układu elektrycznego na zmiany warunków wymiany ciepła (w naszym przypadku na zmiany prędkości chwilowych  $\vec{V}$ ) ma postać

$$E = \bar{E} + e, \quad (8)$$

gdzie:  $\bar{E}$  - oznacza średnią w czasie wartość napięcia,  
 $e$  - chwilowe odchylenie od wartości średniej.

Właściwa interpretacja wymaga zapoznania się ze sposobem opisu wektora prędkości w przepływie turbulentnym. Prędkość chwilowa jest sumą wektorową prędkości średniej i prędkości fluktuacji (rys. 4)



Rys. 4 Prędkość chwilowa i prędkość średnia

$$\vec{V} = \bar{V} + \vec{v} \quad (9)$$

a moduł prędkości chwilowej wynosi

$$V = \sqrt{(\bar{V} + v_1)^2 + v_2^2 + v_3^2} \quad (10)$$

Prędkość średnia  $\bar{V}$  definiowana jest następująco

$$\bar{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} V dt, \quad \text{gdzie: } \Delta t = t_2 - t_1. \quad (11)$$

Jako miarę wielkości pulsacji, wobec

$$\bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} (V - \bar{V}) dt = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} V dt - \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \bar{V} dt \equiv 0 \quad (12)$$

przyjmujemy wariancję funkcji  $v(t)$

$$\bar{v}^2 = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} (V - \bar{V})^2 dt = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} v^2 dt, \quad (13)$$

albo wartość skuteczną pulsacji (odchylenie standardowe RMS)

$$v_{RMS} = v' = \sqrt{\bar{v}^2}. \quad (14)$$

## 2.2. Charakterystyka prędkościowa

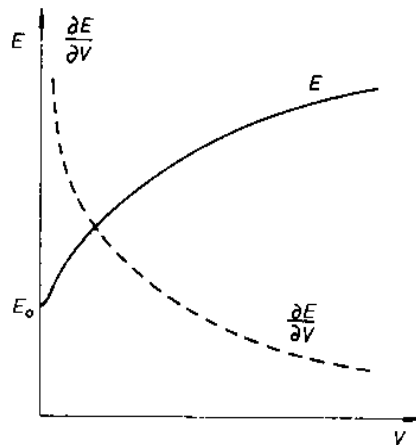
Przykładowy przebieg zależności  $E(V)$  przedstawia rys. 5. Pochodna

$\frac{\partial E}{\partial V}$  nazywana jest czułością prędkościową termooanemometru. Jeśli funkcja

$E(V)$  spełnia zależność Kinga (6) to

$$\frac{\partial E}{\partial V} = \frac{B n V^{n-1}}{2 E}. \quad (15)$$

Zależność  $\frac{\partial E}{\partial V}$  jest także przedstawiona na rys. 5.



Rys..5 Charakterystyka prędkościowa termooanemometru

Wykorzystanie analitycznej postaci funkcji  $E(V)$ , np. do bezpośredniego wyznaczania wartości prędkości przy użyciu komputera, wymaga wyznaczenia wartości współczynników  $A$ ,  $B$  oraz  $n$ . Jak wspomniano wcześniej, współczynniki te mogą być traktowane jako stałe tylko w ograniczonym zakresie prędkości, a więc wzorcowanie termooanemometru powinno być przeprowadzone dla zakresu prędkości zbliżonego do zakresu prędkości mierzonych.

Przedstawienie zależności (6) w układzie logarytmicznym

$$\log(E^2 - A^2) = \log B + n \log V, \quad (16)$$

pozwala zastosować procedurę regresji liniowej do wyznaczania współczynników  $B$  i  $n$ . Jako stałą  $A$  przyjmujemy zwykle  $A = E_0$ , tzn. wartość napięcia wyjściowego z mostka dla  $V = 0$  (dla pomiarów w zakresie prędkości do 5 m/s lepiej jest przyjąć  $A = 0,96 E_0$ ).

Mamy więc

$$n = \frac{\sum_{l=1}^N \log V \log(E^2 - A^2) - \frac{\sum_{l=1}^N \log V \sum_{l=1}^N \log(E^2 - A^2)}{N}}{\sum_{l=1}^N (\log V)^2 - \frac{\left(\sum_{l=1}^N \log V\right)^2}{N}}, \quad (17)$$

gdzie  $N$  - ilość punktów pomiarowych wziętych do wzorcowania. Po wyznaczeniu  $n$  stałą  $B$  wyznaczamy z zależności

$$\log B = \frac{\sum_{l=1}^N \log(E^2 - A^2)}{N} - n \frac{\sum_{l=1}^N \log V}{N}. \quad (18)$$

Z mniejszą dokładnością stałe  $B$  i  $n$  można wyznaczyć graficznie sporządzając wykres

$$\log(E^2 - A^2) = f(\log V) \quad (19)$$

a następnie odczytując  $n$  jako współczynnik nachylenia prostej a  $B$  jako rzędną początkową wykresu.

### 2.3. Charakterystyka kątowna

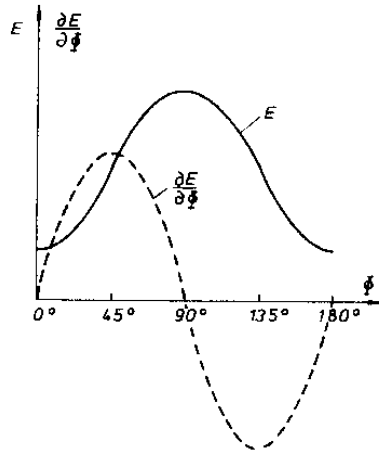
Przykładowy przebieg zależności  $E(\phi)$  i czułości układu pomiarowego

$\frac{\partial E}{\partial \phi}$  na odchylenia wektora prędkości pokazano na rys. 6.

Analitycznie  $E(\phi)$  można opisać równaniem

$$E(\Phi) = a_1 \sin^2 \phi + a_2 \cos \phi + a_3 \phi \sin \phi, \quad (20)$$

gdzie:  $a_1, a_2, a_3$  współczynniki wielomianu aproksymacyjnego.



Rys. 6 Charakterystyka kątowa sondy termooanemometru

Należy zaznaczyć, że obie czułości, tzn. prędkościowa i kątowa zależą od prędkości  $V$ .

Charakterystyki prędkościowe i kątowe pozwalają określić wpływ zmian wielkości i kierunku wektora prędkości na zmiany sygnału napięciowego

$$dE = \frac{\partial E}{\partial V} dV + \frac{\partial E}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial E}{\partial t} dt. \quad (21)$$

Dokonując odpowiedniego uśrednienia po czasie i zastępując różniczki skończonymi przyrostami zależność (21) przybierze postać:

$$\Delta E = e = \left( \frac{\partial E}{\partial V} \right) \Delta V + \left( \frac{\partial E}{\partial \phi} \right) \Delta \phi. \quad (22)$$

#### 2.4. Pomiar prędkości średniej

Średnią prędkość przepływu  $\bar{V}$  obliczamy ze wzoru

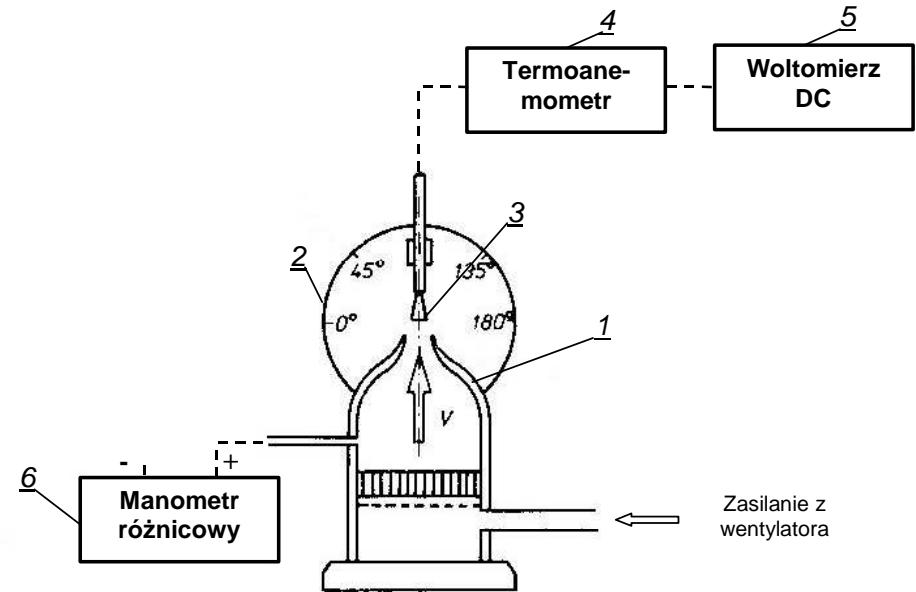
$$V = n \sqrt{\frac{E^2 - A^2}{B}} \quad (23)$$

w którym stałe  $A$ ,  $B$  i  $n$  wyznaczamy korzystając z uprzednio wykonanej krzywej kalibracji  $E(V)$ . Średnią wartość napięcia wyjściowego z mostka  $E$

mierzmy woltmierzem prądu stałego z odpowiednio dobraną stałą czasową lub stosując w układzie pomiarowym integrator analogowy lub cyfrowy.

#### 3. Stanowisko pomiarowe i wykonanie ćwiczenia

Stanowisko pomiarowe przedstawiono schematycznie na rys. 7. Składa się ono z następujących elementów:



- 1 - dysza o średnicy 15 mm do wzorcowania sond termooanemometru w strumieniu swobodnym
- 2 - obrotowy uchwyt sondy z kątomierzem
- 3 - badana sonda
- 4 - termooanemometr
- 5 - woltmierz prądu stałego
- 6 - manometr różnicowy

Prędkość wzorcową  $V_{wz}$  na wylocie dyszy zbieżnej określamy na podstawie zależności (23) mierząc manometrem różnicowym  $\underline{6}$  nadciśnienie w komorze przed dyszą zbieżną:

$$V_{wz} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (24)$$

gdzie:  $\Delta p$  – nadciśnienie w komorze przed dyszą wylotową,

$\rho = \frac{P}{RT}$  - gęstość powietrza na wylocie z dyszy (równa gęstości

powietrza atmosferycznego),

$p$  – ciśnienie powietrza na wylocie dyszy (równe atmosferycznemu  $p_a$ ),

$R$  - stała gazowa (dla powietrza  $R = 287 \text{ m}^2 / (\text{s}^2 \text{ K} )$ ),

$T$  – temperatura powietrza na wylocie dyszy (równa temperaturze otoczenia  $T_a$ ).

### 3.1 Charakterystyka prędkościowa

1. Zanotować ciśnienie atmosferyczne i temperaturę otoczenia.
2. Wykonać około 15 pomiarów napięcia  $\bar{E}$  w funkcji prędkości powietrza wypływającego z dyszy przy ustawieniu sondy tak, aby włókno było prostopadłe do wektora prędkości wylotowej ( $\phi = 90^\circ$ ).
3. Wykonać wykres krzywej Kinga  $E = f(V_{wz})$
4. Wykonać wykres  $\log(E^2 - E_o^2) = f(\log V_{wz})$  i z tego wykresu wyznaczyć stałe  $n$  i  $B$ .
5. (opcjonalnie) Obliczyć wartości stałych  $n$  i  $B$  metodą regresji liniowej na podstawie wzorów (17) i (18) i porównać je z wartościami wyznaczonymi w punkcie 4.
6. Dla każdej wartości napięcia  $E$  obliczyć prędkość wskazywaną przez termomanometr ze wzoru (23)

$$V_{term} = n \sqrt{\frac{E^2 - E_o^2}{B}}$$

Wykonać wykres  $V_{term} = f(V_{wz})$ .

7. Obliczyć wartości błędów według wzoru

$$Blq_l = \frac{|V_{term} - V_{wz}|}{V_{wz}} \cdot 100\%$$

oraz wykonać wykres  $Bład = f(V_{wz})$ .

### 3.2 Charakterystyka kierunkowa

1. Dla wybranej prędkości przepływu  $V_{wz}$  dokonać pomiaru charakterystyki kątovej  $E_\phi = f(\phi)$  zmieniając kąt  $\phi$  w zakresie  $\phi = 0 \div 180^\circ$ .  
Wykonać wykres  $E_\phi = f(\phi)$ .
2. Dla każdej wartości  $E_\phi$  obliczyć prędkość wskazywaną przez termomanometr

$$V_{term \phi} = n \sqrt{\frac{E_\phi^2 - E_o^2}{B}}$$

Wykonać wykres  $V_{term \phi} = f(\phi)$ .

3. Obliczyć wartości błędów według wzoru

$$Blq_l_\phi = \frac{|V_{term \phi} - V_{term 0st}|}{V_{term 0st}} \cdot 100\%$$

Wykonać wykres  $Bład_{\phi} = f(\phi)$ .