

Ćw. 10. Termoanemometr. Pomiar prędkości i pulsacji prędkości w swobodnym strumieniu powietrza.

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych właściwości termoanemometru stałotemperaturowego oraz pomiar rozkładów prędkości i pulsacji prędkości w swobodnym strumieniu powietrza.

2. Podstawy teoretyczne

Termoanemometr jest przyrządem do pomiaru średnich i chwilowych wartości prędkości płynu w polu przepływu turbulentnego. 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 platynoird). 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 chwilowej wartości wektora prędkości w polu przepływu turbulentnego tj. termoanemometrów.

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°C).

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

$$\dot{q}_k = \alpha \pi d L (T_w - T_a) \quad (1)$$

gdzie: α - współczynnik przejmowania ciepła, zależny od własności fizycznych płynu, parametrów stanu płynu, rodzaju przepływu, kształtu, wymiarów oraz stanu powierzchni ciała stałego, d , L - średnica i długość włókna oporowego, T_w - temperatura włókna, T_a - temperatura otoczenia.

Dla włókna oporowego o skończonej długości należy dodatkowo uwzględnić odpływ ciepła drogą przewodzenia do wsporników, których temperatura jest równa temperaturze płynu omywającego czujnik.

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

$$\dot{q}_k = \frac{E^2}{R_w}, \quad (2)$$

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.

Wykorzystując zależności (1) i (2), otrzymamy po uwzględnieniu (3)

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

Ponieważ dokładne wyznaczenie zależności między \dot{q}_k a odpływem ciepła drogą przewodzenia do wsporników sondy nie jest możliwe na drodze

teoretycznej (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:

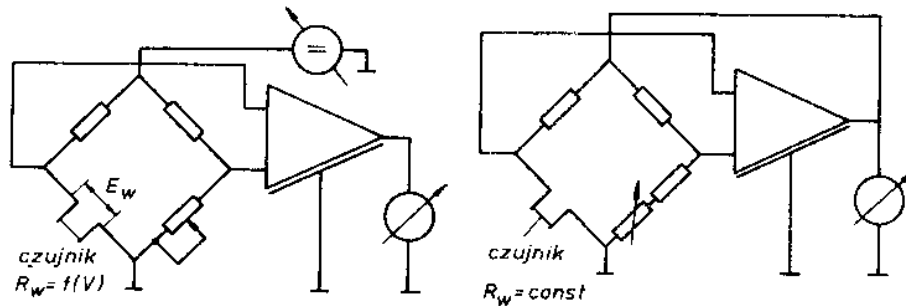
$$\frac{E_w^2}{R_w} = (A' + B' V^n) (T_w - T_a), \quad (5)$$

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).



Schematy termooanemometru: stałoprądowego (rys. 1) i stałotemperaturowego (rys. 2)

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 (5) przybiera postać zwaną zależnością Kinga:

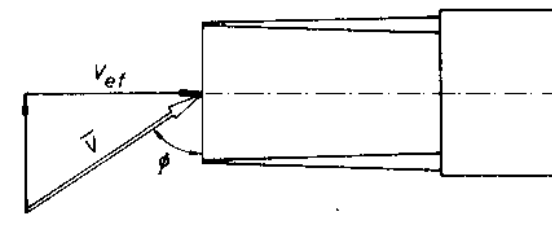
$$E^2 = A^2 + B V_{ef}^n. \quad (6)$$

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: ϕ - kąt pomiędzy wektorem prędkości \vec{V} a osią włókna.

Dla czujników, dla których $L/d > 200$ zachodzi $k=0.2$, można więc z przybliżeniem przyjąć, że V_{ef} jest to składowa wektora prędkości prostopadła do włókna sondy (rys. 3).



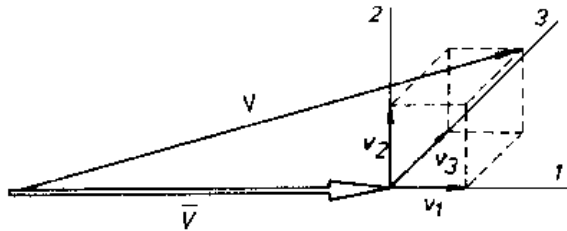
Rys. 3 Trójkąt prędkości przy skośnym opływie włókna

Sygnal 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 zależności (8) wymaga zapoznania się ze sposobem opisu wektora prędkości w przepływie turbulentnym. Prędkość chwilowa jest sumą wektorową prędkości średniej i prędkości pulsacji (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, przyjmujemy wariancję funkcji $v(t)$

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

albo wartość skuteczną pulsacji (odchylenie standardowe RMS)

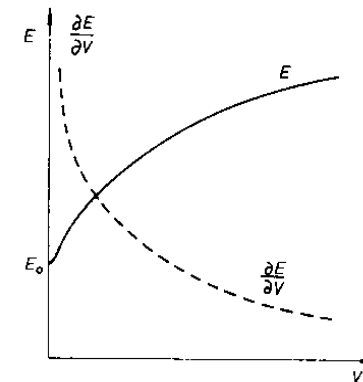
$$v_{RMS} = v' = \sqrt{\overline{v^2}}. \quad (14)$$

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 ta jest przedstawiona na rys. 5.



Rys. 5 Charakterystyka prędkościowa termooanemometru

Wykorzystanie analitycznej postaci funkcji $E(V)$ do bezpośredniego wyznaczania wartości prędkości, wymaga znajomości 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 (4.6) w układzie logarytmicznym

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

pozwała 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 $A = 0,96 E_0$).

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

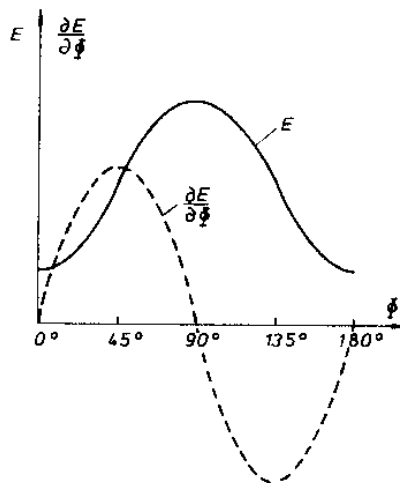
Przykładowy przebieg zależności $E(\phi)$ i czułości układu pomiarowego

$\frac{\partial E}{\partial \phi}$ 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 kątowna termooanemometru

Należy zaznaczyć, że obie czułości, prędkościowa i kątowna 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

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

w którym stałe A, B i n wyznaczamy korzystając z uprzednio wykonanej krzywej kalibracji $E(V)$. Średnią wartość napięcia wyjściowego z mostka E mierzymy woltomierzem prądu stałego z odpowiednio dobraną stałą czasową lub stosując w układzie pomiarowym integrator analogowy lub cyfrowy.

2.5. Pomiar pulsacji prędkości

Wartość pulsacji prędkości można wyznaczyć ze wzoru (22), który po uwzględnieniu zależności na czułość prędkościową w postaci

$$\frac{\partial E}{\partial V} = \frac{B n V^{n-1}}{2 E}$$

oraz przy prostopadłym ustawieniu sondy ($\partial E / \partial \phi = 0$) przybiera postać

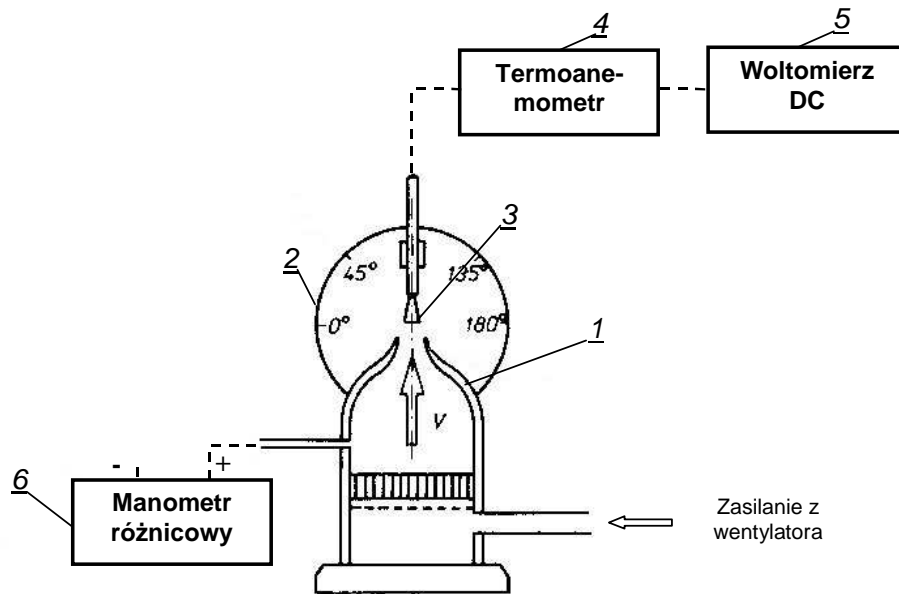
$$v_{RMS} = \frac{2E \cdot e_{RMS}}{n \cdot (E^2 - E_o^2)} \cdot V \quad (24)$$

Użyteczną wielkością do oceny poziomu pulsacji prędkości jest bezwymiarowa wartość turbulencji (tj. wartość pulsacji odniesioną do prędkości lokalnej)

$$t = \frac{v_{RMS}}{V} = \frac{2E \cdot e_{RMS}}{n \cdot (E^2 - E_o^2)}$$

3. Stanowisko pomiarowe i wykonanie ćwiczenia

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



Rys. 7 Schemat stanowiska pomiarowego

- 1 - dysza o średnicy 16 mm do wzorcowania sond termooanemometrycznej
- 2 - obrotowy uchwyt sondy z kątomierzem
- 3 - badana sonda
- 4 - termooanemometr
- 5 - woltomierz 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: Δp – nadciśnienie w komorze przed dyszą wylotową,

$\rho = \frac{p}{RT}$ - gęstość powietrza na wylocie z dyszy,

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 – wyznaczenie stałych A, B i n.

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 $\log(E^2 - E_o^2) = f(V_{wz})$ i z tego wykresu wyznaczyć stałe n i B .
5. Dla każdej wartości E obliczyć prędkość wskazywaną przez termooanemometr ze wzoru (23)
Oraz wykonać wykres $V_{term} = f(V_{wz})$.
6. Obliczyć wartości błędów według wzoru

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

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

3.2 Charakterystyka kierunkowa

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

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

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

3. Obliczyć wartości błędów według wzoru

$$Błąd_\phi = \frac{V_{term\ \phi} - V_{term0st}}{V_{term0st}} \cdot 100\%$$

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

3.3 Pomiar prędkości i pulsacji prędkości w swobodnym strumieniu powietrza

1. Zanotować wartość napięcia E_o (V) oraz różnicy ciśnień Δp (uwaga: jeśli wartość Δp jest mierzona w mm H₂O należy ją przeliczyć na Pa).
2. W przekrojach wskazanych przez prowadzącego dokonać pomiaru wartości stałej napięcia ϵ oraz wartości skutecznej napięcia (e_{RMS}).
3. Obliczyć prędkość wypływu powietrza z dyszy V_d ze wzoru (24).
4. Dla każdego pomiaru obliczyć prędkość średnią wskazywaną przez termooanemometr ze wzoru (23) – wartość stałych B oraz n podaje prowadzący
5. Dla każdego pomiaru obliczyć wartość pulsacji przepływu ze wzoru (24)

6. Dla każdego pomiaru obliczyć procentową wartość poziomu pulsacji przepływu (odniesioną do prędkości wypływu z dyszy)

$$p = \frac{v_{RMS}}{V_d} = \frac{2E \cdot e_{RMS}}{n \cdot (E^2 - E_o^2)} \cdot \frac{V}{V_d} \cdot 100$$

oraz procentową wartość turbulencji przepływu (odniesioną do prędkości lokalnej)

$$t = \frac{v_{RMS}}{V} = \frac{2E \cdot e_{RMS}}{n \cdot (E^2 - E_o^2)} \cdot 100$$

7. Wykonać wykresy:

$V = f(y)$, $V/V_d = f(y)$, $v_{RMS} = f(y)$, $p = f(y)$, $t = f(y)$