

Badania asymetrii rozkładu rezystancji włókna termooanemometru w aspekcie możliwości określania zwrotu wektora prędkości przepływu

JAN KIELBASA, ELŻBIETA POLESZCZYK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań pojedynczej sondy termooanemometrycznej, dzielonej na dwie równe części przez wprowadzenie trzeciego wspornika (rys. 5). Sonda ta jest zasilana z układu anemometru stałotemperaturowego a mierzy się napięcia występujące na obu jej częściach. Znając wartości tych napięć, można z nich wyznaczyć różnicę w rezystancji obu części włókna. Różnica ta zmienia znak w zależności od ustawienia sondy w stosunku do wektora prędkości i pionu. Znajomość tej różnicy pozwala określić zwrot wektora prędkości przepływu w wybranym układzie współrzędnych.

Słowa kluczowe: anemometria cieplna, sonda dzielona, różnica rezystancji, zwrot wektora prędkości przepływu

1. Wprowadzenie

Sonda termooanemometryczna, opiera swe działanie na pomiarze strat cieplnych grzanego włókna wynikłych na skutek odprowadzania ciepła z powierzchni włókna przez opływające go medium.

Teoretyczny opis pracy takiego czujnika podał w roku 1916 L.V. King wychodząc z założeń, że nieskończenie długie, grzane włókno jest opływane potencjalnie oraz nie zakłóca pola prędkości. Natomiast moc wydzielona w włóknie jest na tyle mała, że medium nagrzewając się nie zmienia swoich własności. Przy takich założeniach rozwiązując równanie przewodnictwa cieplnego z uwzględnieniem konwekcji i źródła, przy zerowym warunku początkowym i zerowym warunku brzegowym w nieskończoności uzyskał zależność:

$$I_w^2 R_w = (a + bv^{0.5})(T_w - T_m), \quad (1)$$

gdzie I_w oznacza prąd płynący przez grzane włókno, R_w rezystancję grzanego włókna, a i b stałe zależne od rodzaju medium i parametrów włókna, T_w jest temperaturą grzanego włókna, T_m – temperaturą napływającego medium a v – prędkością medium.

Jeśli grzane włókno pracuje w systemie anemometru stałorezystancyjnego (wówczas $R_w = \text{const}$) to $T_w = \text{const}$ i dodatkowo jeśli T_m jest stałe, to równanie (1) można zapisać w postaci:

$$U_w^2 = A + Bv^{0.5}, \quad (2)$$

gdzie U_w oznacza napięcie na grzonym włóknie a A i B nowe stałe, które uzyskuje się zwykle w trakcie wzorcowania sondy pomiarowej. Nowe stałe są związane ze stałymi z równania (1) następującymi zależnościami:

$$A = a(T_w - T_m)R_w \quad \text{oraz} \quad B = b(T_w - T_m)R_w.$$

Często zamiast równania (2) spotyka się bardziej ogólną postać

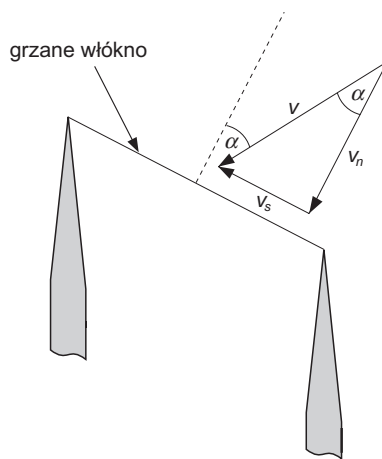
$$U_w^2 = A + Bv^n, \quad (3)$$

gdzie A , B i n są nowymi stałymi wyznaczonymi podczas wzorcowania. Nie mają one interpretacji fizycznej.

Czułość anemometru z grzonym włóknem zależy od kąta natarcia (kąta napływu medium na włókno), którym jest kąt α zawarty pomiędzy normalną do osi włókna a wektorem prędkości. Największa czułość występuje dla $\alpha = 0$.

Dla przepływu płaskiego wektor prędkości możemy rozłożyć na składowe jak na rysunku 1. Mamy więc

$$v_s = v \sin \alpha, \quad v_n = v \cos \alpha, \quad v = \sqrt{v_s^2 + v_n^2} \quad (4)$$



Rys. 1. Składowe v_s i v_n wektora v

Wrażliwość włókna nie jest jednakowa dla obu składowych prędkości. Intuicyjnie wydaje się, że składowa normalna, przy tej samej wielkości co składowa styczna, odbiera więcej ciepła od nagrzanego włókna. W związku z tym wprowadza się pojęcie prędkości efektywnej v_{ef} określonej jako:

$$v_{ef} = \sqrt{k^2 v_s^2 + v_n^2} = v \sqrt{k^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \quad (5)$$

gdzie k jest mniejsze od 1. Jeśli wzór (5) wprowadzimy do (2) to dostaniemy

$$U_w = \sqrt{A + B \sqrt{v^4 (k^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)}}. \quad (6)$$

Analizując zależność (6) łatwo zauważyć, że maksymalna wartość napięcia U_w na grzonym włóknem wystąpi gdy

$$\alpha = 0^\circ + m180^\circ$$

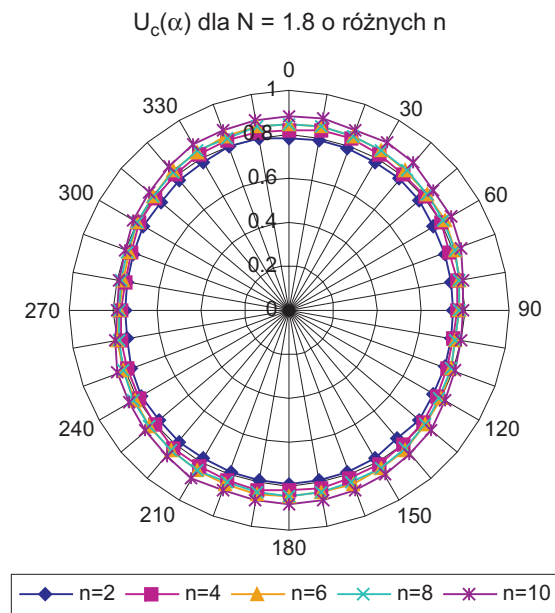
a minimalna gdy

$$\alpha = 90^\circ + m180^\circ,$$

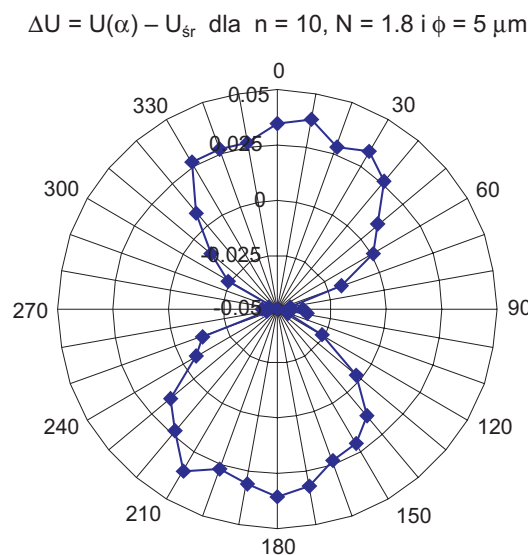
gdzie m jest liczbą całkowitą.

Dla stałej prędkości przepływu $v = \text{const}$, napięcie na włóknem w zależności od kąta natarcia $U_w(\alpha)$ będzie w układzie biegunowym przedstawiało odkształconą elipsę o maksymalnej wartości dłuższej osi dla kąta zerowego lub półpełnego, zaś dla 90° napięcie na włóknem będzie minimalne (rys. 2). Oznacza to, że mierząc napięcie na włóknem jako funkcję kąta α , możemy wykryć kierunek przepływu. Bardziej widoczne

to jest na rys. 3, gdzie naniesiono różnicę pomiędzy $U(\alpha)$ a średnią wartością napięcia na włóknie. Powyższe rozważania pozwalają na określenie kierunku wektora prędkości przepływu, natomiast nie można na ich podstawie wyznaczyć jego zwrotu.

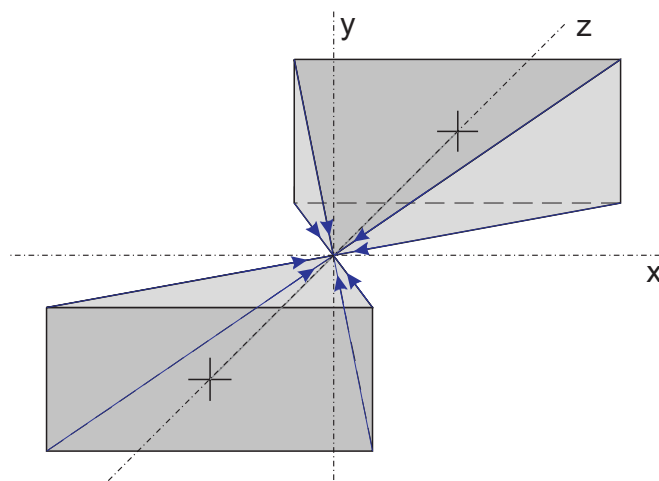


Rys. 2. Biegunowy wykres napięcia na grzonym włóknie jako funkcja kąta natarcia α



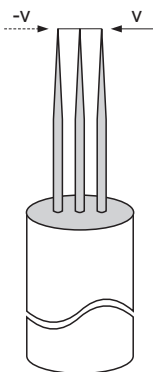
Rys. 3. Biegunowy wykres różnicy pomiędzy napięciem $U(\alpha)$ na grzonym włóknie a średnim napięciem U_{sr} dla $\alpha = 0^\circ \div 360^\circ$, jako funkcja kąta natarcia

Rozwiązując równanie (6) ze względu na v dostaje się zawsze $|v|$, czyli możliwe są dwie wartości v spełniające równania wyjściowe. Oznacza to, że nie można jednoznacznie określić zwrotu wektora prędkości medium. Sprawa się bardzo komplikuje, gdy ma się do czynienia z przepływem dwu lub trójwymiarowym. Liczba możliwych rozwiązań jest równa 2^N , gdzie N oznacza wymiarowość zagadnienia. Sytuację ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Różna liczba rozwiązań w zależności od wymiarowości zagadnienia

Zagadnienie to można uczynić jednoznacznym konfigurując czujnik tak, aby dawał możliwość wykrywania zwrotu prędkości przepływu. W literaturze można znaleźć kilka rozwiązań anemometrów cieplnych pozwalających wykryć kierunek i zwrot prędkości przepływu. Są to metody wykorzystujące sondy zawierające trzy [2, 3, 4] lub dwa [1, 5, 6, 7, 8] włókna. Włókna są do siebie równoległe, a linia prądu powinna leżeć w płaszczyźnie, którą wyznaczają włókna. Metody te mają tę wadę, że czujnik ma od 4 do 6 wsporników co silnie zakłóca przepływający strumień. Rozwiązanie, jakie proponują autorzy, wykorzystuje powstający wzdłuż grzanego włókna rozkład temperatury, a więc i rezystancji. Sprowadza się to do wprowadzenia do czujnika dodatkowej elektrody wyprowadzającej napięcie ze środka włókna (rys. 5).



Rys. 5. Szkic sondy do wykrywania zwrotu prędkości przepływu

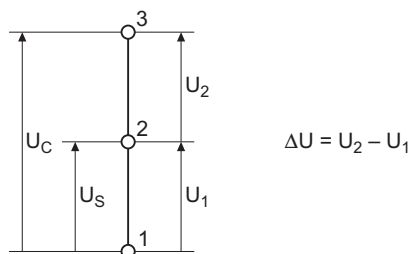
Elementarne rozważania prowadzą do następującego stwierdzenia: jeżeli w opływie włókna zaistnieje osiowa składowa prędkości przepływu, to zawsze spowoduje ona asymetrię w rozkładzie temperatury wzdłuż włókna, a co za tym idzie asymetrię rozkładu rezystancji wzdłuż włókna. Różnica rezystancji obu części włókna jest miarą powstałej asymetrii. Znak tej różnicy będzie informacją o zwrocie prędkości przepływu medium w wybranym układzie współrzędnych.

2. Praktyczna realizacja czujnika do wykrywania zwrotu

Na trzech współpłaszczyznowych wspornikach, które są odległe od siebie o ok. 3.0 mm rozpięto włókno wolframowe o średnicy 8 μm . Całkowita długość włókna wynosi ok. 6.0 mm. Włókno jest zgrzane do trzech wsporników. Dwa skrajne służą do zasilania czujnika, środkowe do pomiaru napięcia „na środku” czujnika. Czujnik pomiarowy jest zasilany z termoanemometru stałotemperaturowego, którego rolę pełni

uniwersalny termoanemometryczny system komputerowy do badań układów anemometrycznych z oddziaływaniem cieplnym CCC'2002. Każdorazowo mierzono napięcie na całym włóknie U_c i napięcie „na środku” U_s . Rezystancję „na zimno” R_g mierzono przed każdą serią pomiarów.

Na rys. 6 pokazano schematycznie jakie wielkości mierzono. Tak więc napięcie U_1 jest napięciem na czujniku między punktami 1-2 i jest równe U_s . Napięcie U_2 na pozostałym odcinku czujnika jest równe $U_c - U_s$.



Rys. 6. Rozkład mierzonych napięć

Zatem napięcie różnicowe ΔU jest równe

$$\Delta U = U_2 - U_1 = (U_c - U_s) - U_s = U_c - 2U_s \quad (7)$$

Z równania (3) można wyciągnąć wniosek, że jeśli napływ na włókno jest prostopadły (włókno ułożone poziomo, by wyeliminować wpływ konwekcji naturalnej) i U_s wyprowadzone jest dokładnie ze środka włókna, to ΔU winno być równe zero niezależnie od prędkości przepływu. Napięcia U_1 i U_2 są przekształcane na sygnały cyfrowe w odpowiednich przetwornikach analogowo-cyfrowych. Jeśli w każdym przetworniku istnieje pewne niezrównoważenie U_{1off} i U_{2off} to napięcia U_1 i U_2 są odpowiednio równe

$$U_1 = U_{10} + U_{1off} \quad (8)$$

oraz

$$U_2 = U_{20} + U_{2off}, \quad (9)$$

gdzie U_{10} i U_{20} są rzeczywistymi napięciami występującymi na włóknie. Zatem wzór (7) przyjmie postać

$$\Delta U = U_{20} - U_{10} = (U_c - U_s) - U_s - (U_{2off} + U_{1off}) = U_c - 2U_s - (U_{2off} + U_{1off}) \quad (10)$$

W trakcie wykonywania czujnika powstają pewne niedokładności i długości obu części włókna nie są takie same, czy też rezystancje zgrzein i miejsc lutowania nie są równe, co prowadzi do nierównomiernego podziału rezystancji włókna. Można wówczas wprowadzić dodatkowe napięcie symetryzujące U_{s0} , które należy dodać do napięć ($U_{1off} + U_{2off}$). Zatem zmodyfikowany wzór (10) wyrazi się jako

$$\Delta U = U_{20} - U_{10} = U_c - 2U_s - (U_{2off} + U_{1off} + U_{s0}) = U_c - 2U_s - \Delta U_{off} \quad (11)$$

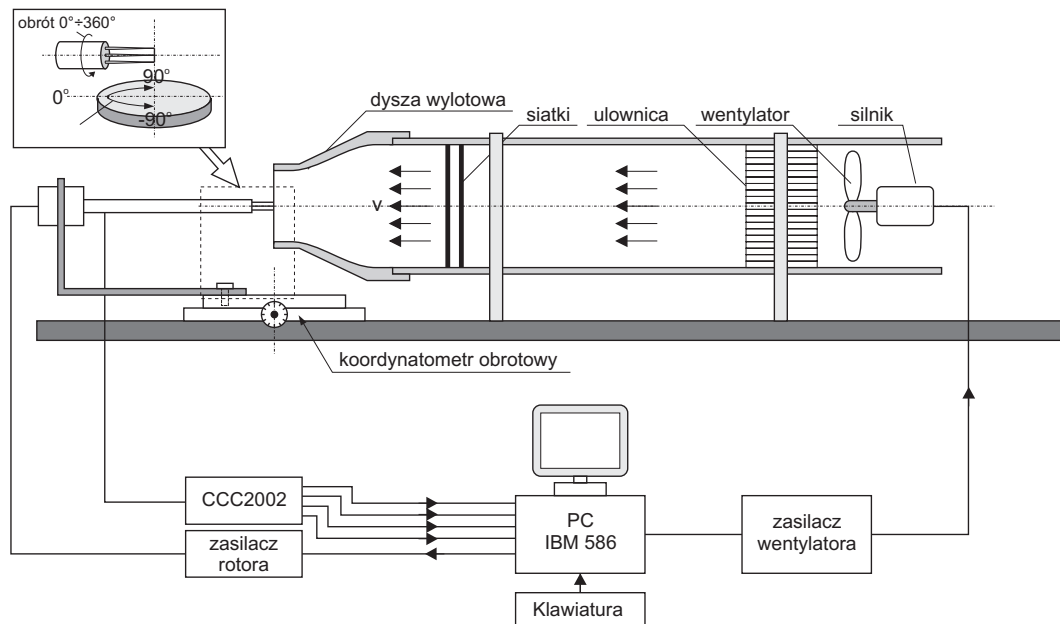
Zakładając, że $\Delta U = 0$, gdy przepływ jest prostopadły do włókna to dostajemy

$$\Delta U_{off} = -[U_c(0) - 2U_s(0)] = 2U_s - U_c. \quad (12)$$

Wstępne wyniki prac związanych z tym tematem opublikowano w pracach [9, 10]

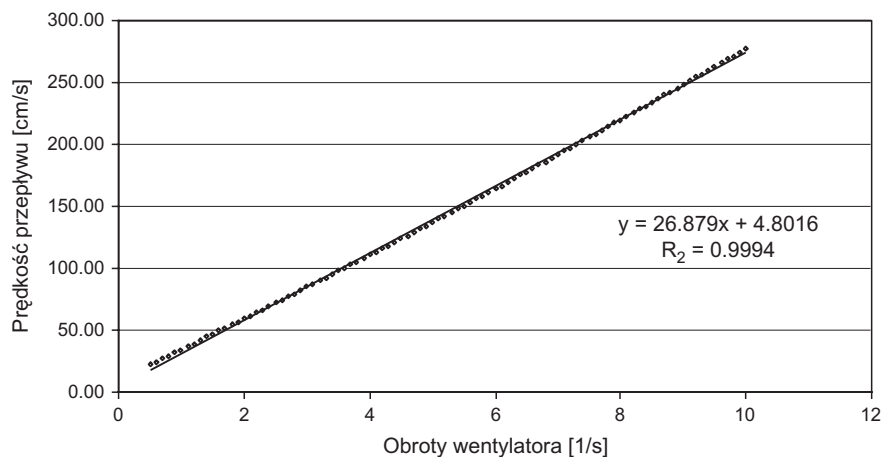
3. Badania eksperymentalne

Sondę pomiarową do wykrywania zwrotu kierunku przepływu przebadano na stanowisku pomiarowym, którego schemat blokowy przedstawiony jest na rys. 7. Rura metapleksowa zakończona konfuzorem jest zasilana wentylatorem promieniowym. Z kolei wentylator napędza trójfazowy silnik zasilany z falownika sterowanego cyfrowo z komputera. Prędkość wypływu z konfuzora można zmieniać w granicach od 0 do 15 m/s. W rurze umieszczono ulownicę i siatki, które w znacznym stopniu wyrównały przepływ (rys. 7).



Rys. 7. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Tunel wywzorcowano metodą fal cieplnych [11, 12]. Ponieważ rozdzielczość falownika wynosiła 0.1 obrotu na sekundę czyli ok. 2.69 cm/s, co nie pozwalało na ustawienie konkretnej żądanej prędkości, dlatego wszystkie pomiary są opisane ilością obrotów wentylatora na sekundę, przy jakiej były wykonywane. Odpowiadające prędkości przepływu można odczytać z krzywej wzorcowania przedstawionej na rys. 8.

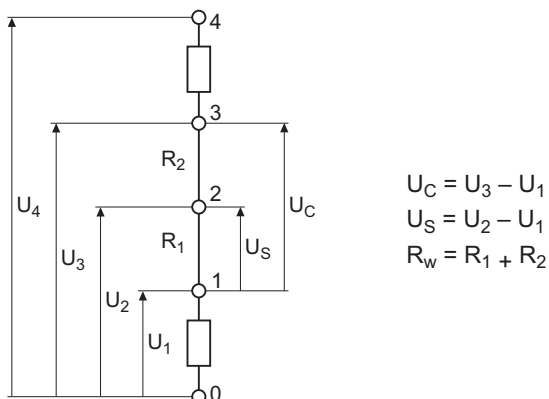


Rys. 8. Krzywa wzorcowania tunelu

Sondę pomiarową umieszczono na poziomym stoliku obrotowym, który mógł ją obracać od zera do 180° w stosunku do osi tunelu. Zmieniał się wówczas kąt β pomiędzy wektorem prędkości v a płaszczyzną wyznaczoną przez obracane wokół osi sondy. Samą sondę pomiarową zamontowano w „rotorze”, który umożliwiał zmianę kąta α pomiędzy wektorem prędkości przepływu a osią grzanego włókna czujnika (rys. 7).

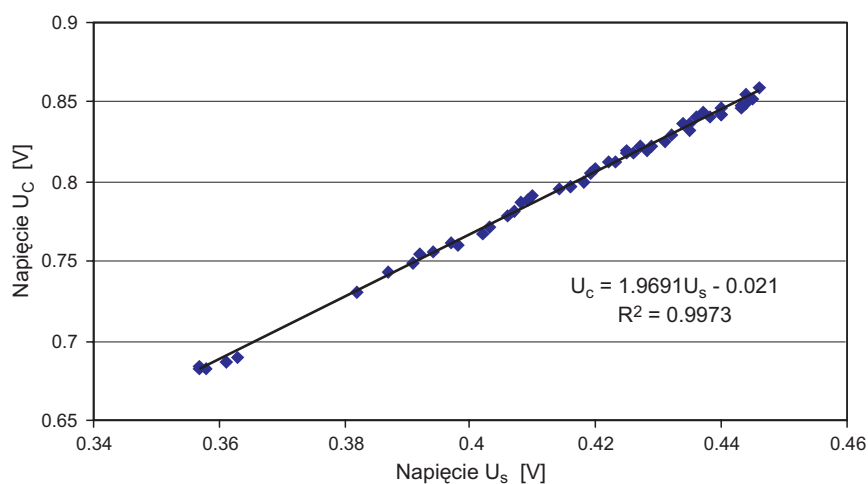
Badano sondę przedstawioną na rys. 5, która wykonana była z platynowanego włókna wolframowego o średnicy $5 \mu\text{m}$. Jej długość wynosiła ok. 4.0 mm. Rezystancja tej sondy „na zimno” wynosiła 10.24Ω . Sonda pracowała w układzie anemometru stałorezystancyjnego ze współczynnikiem nagrzania $N=1.8$ a więc jej rezystancja pracy wynosiła 18.43Ω . Początkowo mierzono napięcia U_c i U_s , jako funkcje prędkości przepływu powietrza, przy zadanym współczynniku nagrzania.

Na wstępie wyznaczono asymetrię w podziale rezystancji włókna sondy wynikającą z błędów wykonania. Okazało się, że zaproponowany wcześniej (rys. 6) sposób pomiaru napięć jest obarczony dużym błędem, gdyż w mierzonych napięciach U_s i U_c były zawarte spadki napięć na przewodach zasilających. Zasilanie czujnika zmieniono z dwuprzewodowego na czteroprzewodowe (rys. 9), dzięki czemu rozdzielono sygnały napięciowe i prądowe.



Rys. 9. Rozkład napięć przy zasilaniu czteroprzewodowym

W fazie wstępnej badań sondę umieszczono poziomo w osi tunelu aerodynamicznego, na jego wylocie a włókno sondy pomiarowej ustawiono pionowo i prostopadłe do osi tunelu (czyli do kierunku wektora prędkości przepływu powietrza). Przeprowadzono wzorcowanie tej sondy w szerokim zakresie prędkości. Celem tego pomiaru nie było wyznaczenie charakterystyki prędkościowej nagrzanego włókna, lecz poznanie asymetrii podziału rezystancji włókna. Ponieważ prąd płynący przez włókno jest taki sam w obydwu częściach, zatem stosunek napięć U_c do U_s będzie określał stosunek rezystancji. Równocześnie sprawdzono czy ten podział rezystancji nie zależy od prądu zasilania włókna. Na rys. 10 przedstawiono wynik dla wymienionej sondy pomiarowej.



Rys. 10. Zależność napięcia U_c od U_s

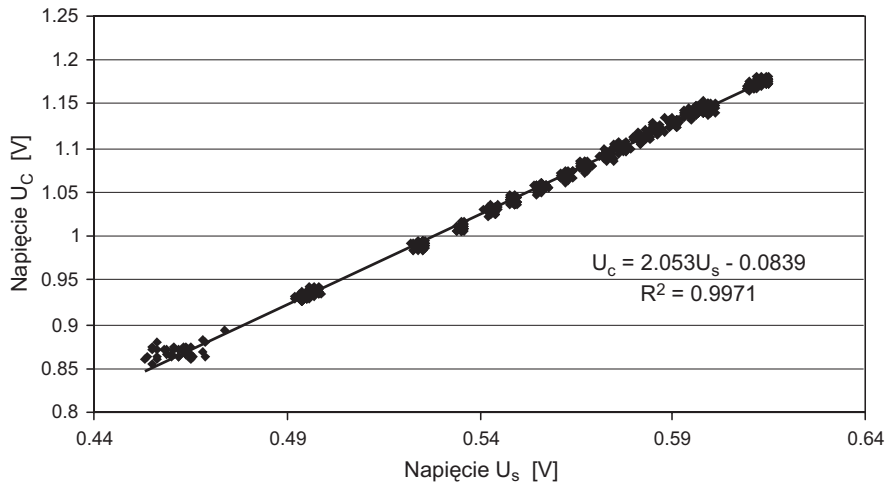
Z równania przedstawionego na wykresie widzimy, że zależność pomiędzy U_c i U_s jest liniowa. Podział rezystancji włókna jest jak 1:1.97. Widzimy, że w podziale występuje niewielka asymetria rzędu 1.5%. Przesunięcie na wykresie wynoszące 0.021 V pochodzi z napięć niezrównoważenia przetworników A/D uczestniczących w pomiarze.

Aby się zorientować jakich zmian asymetrii można oczekiwać w trakcie obrotu sondy wokół osi obsadki, przy zachowaniu przez cały pomiar prostopadłości włókna do wektora prędkości, wykonano serię

pomiarów obracając obsadkę od 0° do 360° kolejno co 10° , zmieniając przy każdym kącie prędkość, czyli obroty wentylatora od 0 do 10/s. Dla każdego kąta α ustawienia sondy, w dane pomiarowe $U_c(\alpha)$ i $U_s(\alpha)$ wpisywano metodą najmniejszych kwadratów proste

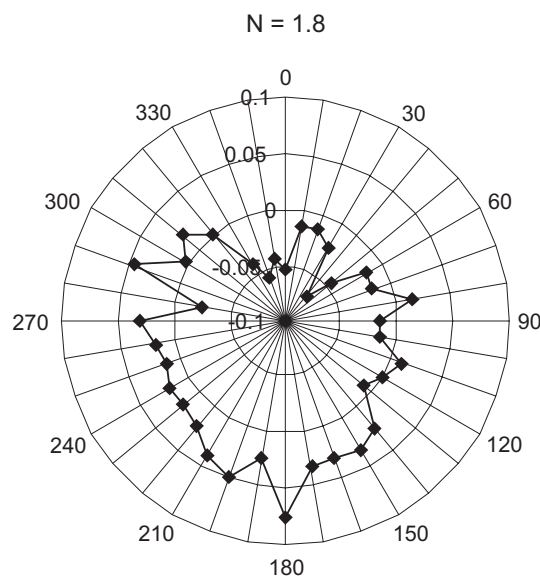
$$U_c = a(\alpha)U_s + b(\alpha) \quad (13)$$

uzyskując wartości nachylenia $a(\alpha)$ i $b(\alpha)$ oraz współczynnik korelacji R^2 . Z rys. 11 uśrednionego po wszystkich realizacjach wyraźnie widać, że związek pomiędzy $U_c(\alpha)$ i $U_s(\alpha)$ jest liniowy. Jednakże wartości parametrów prostych dla poszczególnych kątów się różnią.



Rys. 11. Zależność napięcia U_c od U_s

Na rys. 12 przedstawiono zależność $\Delta a(\alpha) = a_{sr} - a(\alpha)$. Widać, że Δa ma największą wartość dla kątów 0° i 180° . Ma to związek z konwekcją swobodną. Maksymalna różnica w podziale rezystancji obydwu części włókna sięga 0.075 co odpowiada około 4% całkowitej rezystancji włókna. Należy tu przypomnieć, że włókno w tym eksperymencie cały czas pozostawało prostopadłe do wektora prędkości.



Rys. 12. Zależność różnicy $a_{sr} - a(\alpha)$ od kąta obrotu sondy

Ponieważ włókno anemometru pracuje w systemie anemometru stałotemperaturowego zatem

$$R_w = R_1 + R_2 \quad (14)$$

gdzie R_1 i R_2 są rezystancjami poszczególnych części włókna. Z drugiej strony ponieważ przez obie części włókna płynie zawsze ten sam prąd, dlatego słuszną jest przyjęcie, że:

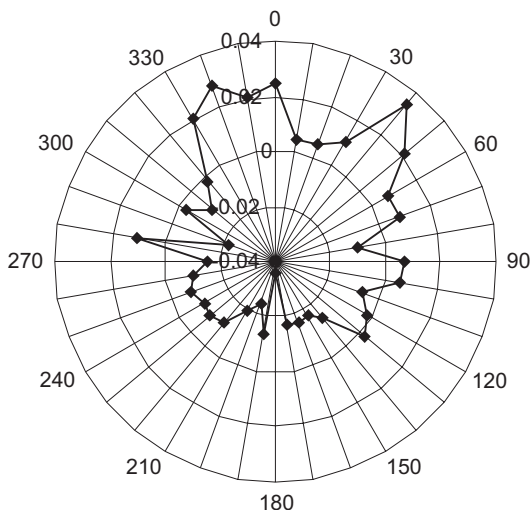
$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_s}{U_c} = \frac{1}{a} \quad (15)$$

Z tych dwu równań dostaje się

$$\Delta R = R_1 - R_2 = R_w \left(\frac{2}{a} - 1 \right) \quad (16)$$

Na rys. 13 przedstawiono wyliczone z danych do rys. 12 wartości $\Delta R/R_w = (2/a - 1)$ jako funkcje kąta α . Można zauważyć, że największe względne zmiany rezystancji włókna występują dla kątów 0 lub 180° co jest związane z konwekcją naturalną.

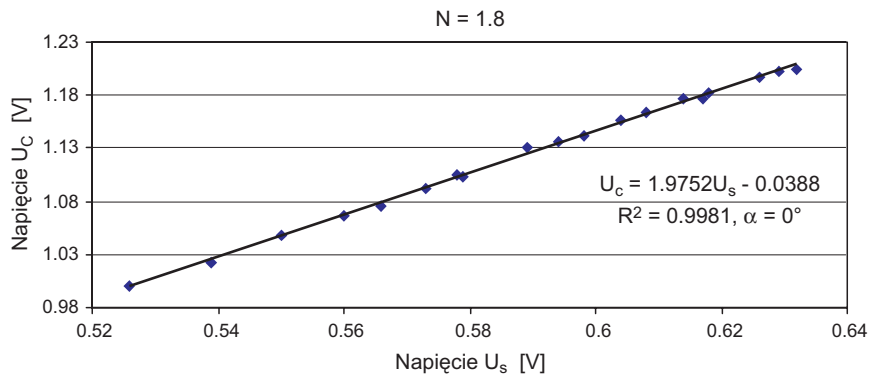
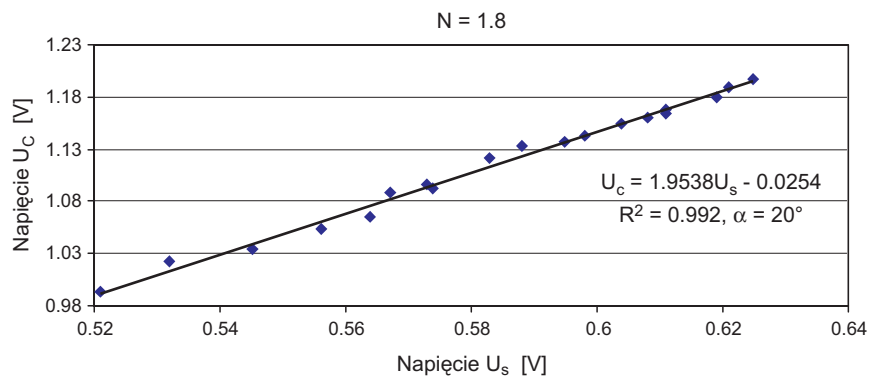
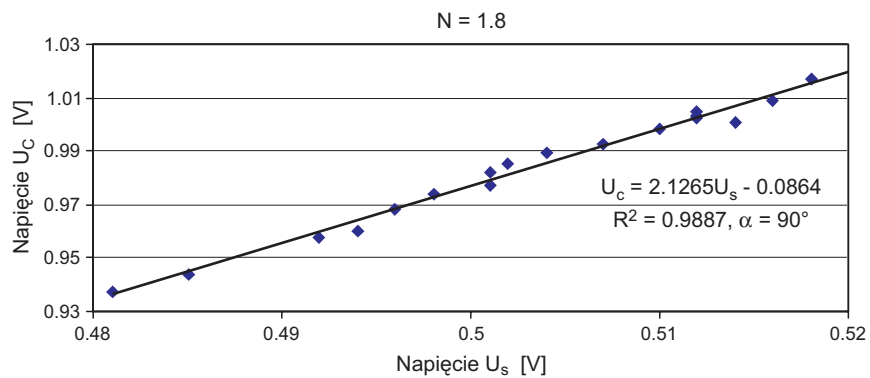
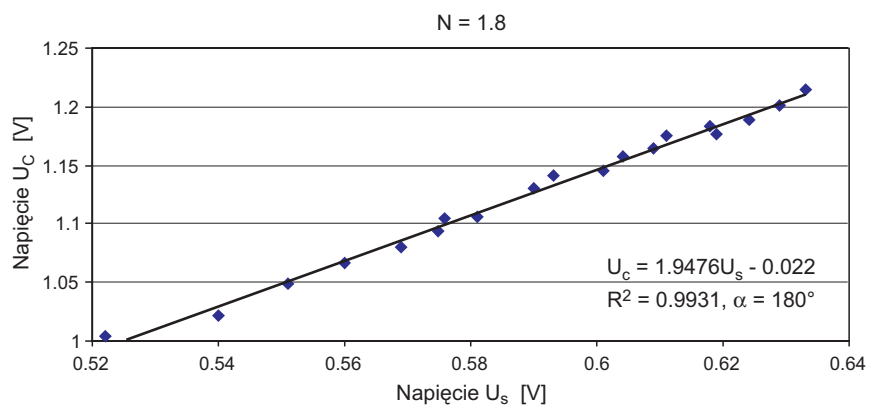
$\Delta R/R_w = 2/a - 1$ dla napływu prostopadłego, $N = 1.8$



Rys. 13. Wyliczone wartości $\Delta R/R_w$ jako funkcja kąta α

W następnym pomiarze sondę umocowano w ten sposób, że osadka sondy była prostopadła do wektora prędkości a włókno sondy obracano w płaszczyźnie równoległej do wektora prędkości. Obracając osadką zmieniał się kąt pomiędzy osią włókna a kierunkiem wektora prędkości przepływu. W położeniu wyjściowym włókno było w pozycji pionowej. Podobnie, jak w poprzednim eksperymencie mierzono napięcia jak na rys. 9 i wyliczano z nich napięcia U_s i U_c . W każdej pozycji ustawienia włókna mierzono napięcia dla prędkości przepływu odpowiadających obrotom wentylatora od 0 do 10 na sekundę co 0.5 obrotu. Podobnie jak w pierwszej serii pomiarów w punkty pomiarowe U_s i U_c wpisywano prostą, wyznaczając jej parametry a i b . Kilka takich przebiegów ilustrują rys. 14-17.

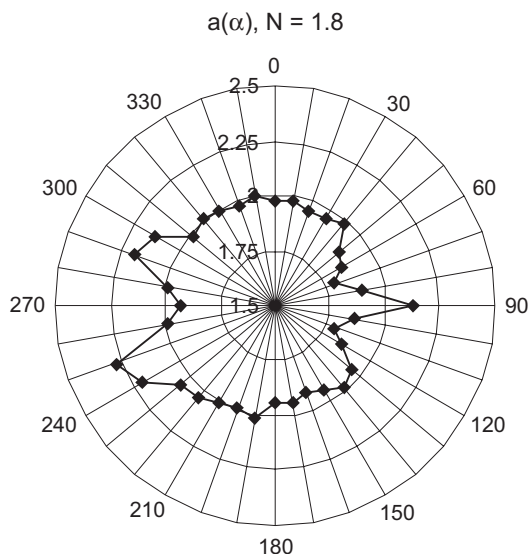
Widzimy, że wszystkie przebiegi są liniowe, jednakże parametry opisujące w/w proste nieznacznie się różnią. W tabeli 1 zebrano uzyskane parametry prostych dla wszystkich mierzonych kątów.

Rys. 14. Zależność napięcia całkowitego U_c od napięcia U_s dla $\alpha = 0^\circ$ Rys. 15. Zależność napięcia całkowitego U_c od napięcia U_s dla $\alpha = 20^\circ$ Rys. 16. Zależność napięcia całkowitego U_c od napięcia U_s dla $\alpha = 90^\circ$ Rys. 17. Zależność napięcia całkowitego U_c od napięcia U_s dla $\alpha = 180^\circ$

Tab. 1.

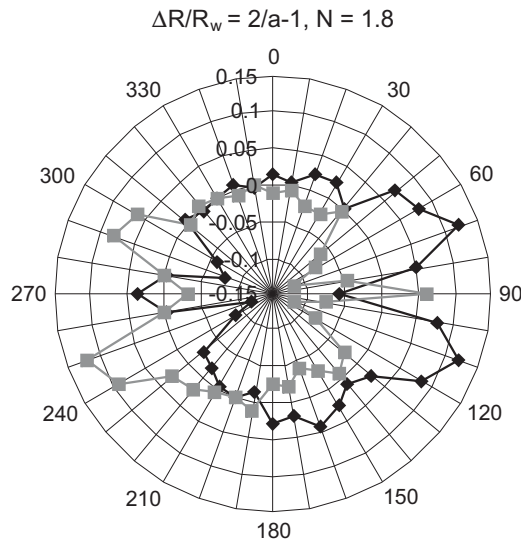
α	a	b	r^2	α	a	b	r^2
0	1.9752	-0.0388	0.9981	180	1.9476	-0.022	0.9931
10	1.9909	-0.0464	0.997	190	2.0241	-0.0674	0.9977
20	1.9538	-0.0254	0.992	200	1.9957	-0.0506	0.996
30	1.9545	-0.0248	0.994	210	2.0084	-0.0583	0.9972
40	1.99334	-0.011	0.9965	220	2.0409	-0.0773	0.9968
50	1.877	0.0203	0.9931	230	2.0528	-0.0833	0.9971
60	1.8473	0.0378	0.9922	240	2.2011	-0.1667	0.9935
70	1.786	0.0743	0.9901	250	2.2665	-0.2042	0.9846
80	1.9095	0.022	0.9591	260	2.0029	-0.0746	0.9709
90	2.1265	-0.0864	0.9887	270	1.9329	-0.0405	0.9662
100	1.8589	0.0373	0.9903	280	2.0042	-0.0671	0.9892
110	1.7917	0.0678	0.9937	290	2.1734	-0.1546	0.9937
120	1.8442	0.0371	0.9924	300	2.1325	-0.1305	0.9937
130	1.9533	-0.0256	0.9963	310	1.9874	-0.046	0.9962
140	1.9842	-0.0433	0.996	320	2.0122	-0.0606	0.9949
150	1.9455	-0.0202	0.9948	330	2.0056	-0.0572	0.9965
160	1.9209	-0.0052	0.9931	340	1.9798	-0.0416	0.9958
170	1.9589	-0.0279	0.993	350	2.0059	-0.0574	0.9963

Z tabeli 1 odczytuje się, że najniższa wartość parametru a wynosi 1.786 dla kąta $\alpha = 70^\circ$ a największa 2.2665 dla $\alpha = 250^\circ$. Zależność $a(\alpha)$ dla $0^\circ < \alpha < 360^\circ$ przedstawia rys. 18.

Rys. 18. Zależność parametru a od kąta α

Na rys. 19 przedstawiono wyliczone z tabeli 1 wartości $\Delta R/R_w = (2/a - 1)$ jako funkcje kąta α .

Gdy wyliczono średnią wartość $\Delta R/R_w$, okazało się, że wynosi ona 0.0104, co świadczy o tym, że wyjściowy podział włókna jest niesymetryczny. Odejmując tę wartość od $\Delta R/R_w$ otrzymano wyniki przedstawione na rys. 19. Uzyskano prawie pełną symetrię czujnika. Wyjaśnienia wymagają spadki wartości dla α równego 90° i 270° . Przypuszcza się, że są to punkty stagnacji przepływu związane z istnieniem wsporników, do których jest zgrzane włókno. Asymetria występująca względem osi 90° - 270° związana jest z tym, że trzy wsporniki, do których zgrzane jest włókno nie leżą w jednej płaszczyźnie, co może powodować asymetrię w opływie obydwu stron włókna.



Rys. 19. Wyliczone wartości $\Delta R/R_w$ jako funkcja kąta α . Linia szara oznacza napływ od strony R_1 , linia czarna – napływ od strony R_2

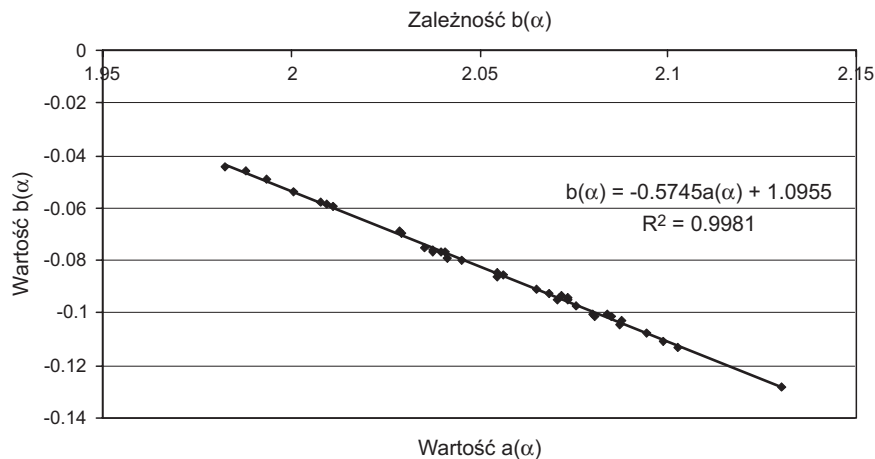
Na zakończenie skorelowano parametry a i b z tabeli 1. Wyniki ilustruje rys. 20. Widzimy, że zależność $b(a)$ jest liniowa dana wzorem

$$b(\alpha) = -0.5746 a(\alpha) + 1.0955. \quad (17)$$

Wstawiając (17) do (13) dostaje się

$$U_c = a(\alpha)(U_s - 0.5746) + 1.0955 \quad (18)$$

co wyraźnie sugeruje istnienie dużego napięcia niezrównoważenia



Rys. 20. Zależność $b(\alpha)$ od $a(\alpha)$

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono badania asymetrii rozkładu rezystancji włókna pojedynczego czujnika termoanemometrycznego z tzw. odczepem, w aspekcie wykrywania zwrotu wektora prędkości przepływu. W literaturze opisywane są liczne rozwiązania konstrukcyjne czujników służących do wykrywania zwrotu przepływu, wyposażone w dwa lub trzy włókna, które wraz z wspornikami powodują znaczne zaburzenia badanego pola prędkości. Autorzy zaproponowali model czujnika jednowłóknowego, podzielonego na dwie

równe części przez wprowadzenie dodatkowego wspornika, połączonego przez zgrzanie z włóknem w jego środku, który pełni funkcję elektrody i umożliwia pomiar napięcia w tym punkcie.

Czułość anemometru z grzonym włóknem zależy od kąta napływu medium na włókno. Jeżeli przyjmujemy, że α jest kątem między normalną do włókna a wektorem prędkości, to największa czułość występuje dla $\alpha = 0^\circ$. Oczywiście jest fakt, że wrażliwość włókna nie jest jednakowa dla składowych wektora prędkości: normalnej i stycznej. Dla stałej prędkości v , maksymalne napięcie będziemy mierzyć dla zerowego i półpełnego kąta napływu, natomiast minimalne dla $\alpha = 90^\circ$. Podstawowe rozważania pozwalają więc na określenie kierunku wektora prędkości a nie dają możliwości wykrywania jego zwrotu.

Jeżeli w opływającym włókno strumieniu zaistnieje składowa osiowa, a więc włókno będzie opływane równoległe do swojej osi podłużnej, powstanie wyraźna asymetria rozkładu temperatury wzdłuż włókna i odpowiadająca jej asymetria rezystancji.

Badania eksperymentalne omawianej metody wykonano dzięki zastosowaniu uniwersalnego termoanemometrycznego systemu komputerowego do badań układów anemometrycznych CCC'2002. Specjalistyczne, wielofunkcyjne oprogramowanie umożliwiło komputerowe sterowanie eksperymentem oraz rejestrację danych pomiarowych.

Wstępny etap prac polegał na wyznaczeniu asymetrii w podziale rezystancji włókna sondy wynikającej z błędów wykonania: nierównej długości obu części włókna, różnej rezystancji zgrzein i miejsc lutowania. Okazało się, że mierzone napięcia: na całym włóknie U_c i na środku U_s są obciążone dużym błędem, wynikającym ze spadków napięć na przewodach zasilających. Do wstępnych pomiarów został użyty czujnik z zasilaniem dwuprzewodowym. Wykonano w związku z tym drugą wersję czujnika z odczepem z zasilaniem czteropunktowym, rozdzielając w ten sposób sygnały napięciowe i prądowe.

Badano napięcia U_c i U_s w zależności od kąta napływu medium na włókno. Przy jednakowym prądzie płynącym przez obie części włókna, znany stosunek mierzonych napięć będzie określał stosunek rezystancji. Sprawdzone również, czy podział rezystancji nie zależy od prądu zasilania.

Przy prostopadłym napływie na włókno podział rezystancji włókna zależy od kąta pomiędzy osią włókna a pionem. Ilustrują to rys. 12 i 13. Wyniki pomiarów napięć $U_c(\alpha)$ i $U_s(\alpha)$ przy różnych kątach α wykazały między nimi związek liniowy. Parametry wpisanych prostych dla różnych kątów α wykazują różnice. Maksymalną wartość parametru kierunkowego $a(\alpha)$, przy prostopadłym napływie medium na włókno, zaobserwowano dla kątów 0° i 180° , ma to zapewne związek z występującą tutaj konwekcją swobodną.

W drugim etapie czujnik został zamontowany w ten sposób, że oś włókna była pozioma, równoległa do kierunku napływu, natomiast oś osadki prostopadła do osi tunelu. Wyliczono średnią stosunku $\Delta R/R_w$ z pomiarów dla kątów α w zakresie $0^\circ \div 360^\circ$ co 10° – uzyskana wartość świadczy o tym, że podział włókna nie jest symetryczny. Po odjęciu średniej od wartości $\Delta R/R_w$ dla kolejnych kątów ustawienia sondy względem kierunku napływu, otrzymano pełną symetrię czujnika. Dla kątów 90° i 270° zauważono spadki wartości $\Delta R/R_w$, co tłumaczy się istnieniem strefy stagnacji przepływu związanej z ustawieniami czujnika, kiedy płaszczyzna wyznaczona przez trzy wsporniki jest równoległa do linii prądu (na wspornikach, do których jest zgrzane włókno następuje częściowe wyhamowanie strumienia przepływu).

Asymetria sondy wynikająca z drobnych błędów wykonania, a więc wyjściowy nierówny podział rezystancji włókna, czy niewspółliniowe położenie końców wsporników mają zasadniczy wpływ na dokładność pomiarów, tym bardziej, że badana metoda wyznaczania zwrotu wektora prędkości przepływu może być stosowana w zakresie małych prędkości.

Podstawowym wnioskiem płynącym z wykonanych badań jest fakt, że podział rezystancji dzielonego włókna R_1/R_w jest zależny od ustawienia włókna względem wektora prędkości przepływu oraz względem pionu.

Literatura

- [1] Kielbasa J., Pindel Z., Rysz J., Smolarski A.Z. (1968): *Uebereinige elektrische Messmethoden der kleinen Luftgeschwindigkeiten*. Proc. of Congr. Int. Joachimicus de Fondinarum Ventilazione. Nr A-13.
- [2] Downing P.M. (1972): *Reverse flow sensing hot-wire anemometer*. J. Phys. E.: Sci Inst., 5, 849-851.
- [3] Eaton J.K., Jeans A. H., Ashjaee J., Johnston I. P. (1979): *A wall-flow-direction probe for use in separating and reattaching flows*. ASME, J. Fluids Ing. 101, 364-366.
- [4] Mahler D.S. (1982): *Bidirectional hot-wire anemometer*. Rev. Sci. Instrum., 53, 1465-1466.
- [5] Kielbasa J. (2000): *Thermal sensor of flow reversal*. Arch. Min. Sci., 45, 1, 89-100.
- [6] Kielbasa J. (2000): *Weryfikacja doświadczalna teorii cieplnego indykatora odwrócenia przepływu*. Arch. Min. Sci., 45, 4, 489-500.
- [7] Kielbasa J. (2000): *Charakterystyki kątowe cieplnego indykatora zwrotu przepływu*. VI Konferencja Naukowa – Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, Gliwice, 13-16 czerwca 2000, t. 1, 267-272.
- [8] Kielbasa J. (2000): *Dwuwłóknowy czujnik termooanemometryczny jako cieplny indykator odwrócenia przepływu*. VI Konferencja Naukowa – Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, Gliwice, 13-16 czerwca 2000, t. 1, 273-278.
- [9] Kielbasa J., Poleszczyk E. (2005): *Badanie asymetrii rozkładu napięć na dzielonym włóknie termooanemometru w zależności od prędkości przepływu*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 7, nr 1-2, 81-86.
- [10] Kielbasa J. (2006): *Korekcja asymetrii czujnika do wykrywania zwrotu wektora prędkości przepływu*. IX Konferencja Naukowa – Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, Zakopane, 19-22 czerwca 2006, t. 1, 151-154.
- [11] Rachalski A. (2006): *High-precision anemometer with thermal wave*. Rev. Sci. Instrum. Vol. 77.
- [12] Rachalski A. (2006): *High Precision Thermo-anemometer*. Proceedings of 2006 NCSLI Workshop and Symposium, Nashville, USA.

Investigations of hot-wire resistance asymmetry with the view of detection of flow velocity direction

Abstract

In current paper some investigation of single hot-wire divided into two parts were presented. The hot-wire is divided by introducing an additional support (Fig. 5) This wire is supplied by constant temperature anemometer system. Difference of resistance between parts of the wire can be derived from measured voltage drop on each part. The sign of this difference depends on probe orientation with respect to velocity vector and vertical line. If this difference is known the direction of flow velocity vector in established co-ordinate system may detected.

Keywords: thermal anemometry, probe with voltage division, resistance difference, direction of flow velocity vector

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Stanisław Gumuła*, AGH