

PROCEDURA POMIARU CHWILOWEJ PRĘDKOŚCI PŁYNU TERMOANEMOMETREM CTA W WARUNKACH SILNEJ ZMIENNOŚCI TEMPERATURY CZYNNIKA

Aleksander OLCZYK¹, Tomasz PAŁCZYŃSKI¹

1. WSTĘP

W obszarze pomiarów prędkości w przepływach nieustalonych płynu, dominują dwie grupy metod:

- metody optyczne: Dopplerowska anemometria laserowa (LDA) oraz metody wizualizacyjne takie jak PIV (Particle Image Velocimetry) czy PTV (Particle Tracking Velocimetry),
- metody termooanemometryczne, wykorzystujące wymianę ciepła pomiędzy grzanym włóknem a omywającym go płynem.

W ostatnich latach nastąpił niezwykle dynamiczny rozwój metod optycznych, które pozwalają na wizualizację przepływów, łącznie ze skomplikowanymi strukturami 2D i 3D. Metody optyczne pozostają jednak bardzo drogimi metodami badawczymi, wymagającymi od ich użytkowników bardzo solidnego przygotowania merytorycznego i doświadczenia w interpretacji wyników. Poza tym, ich zastosowanie wymaga spełnienia kilku warunków (takich jak przezroczystość ścianek kanału w obszarze pomiarowym, możliwość wprowadzenia posiewu o odpowiednich parametrach itd.).

Te ograniczenia sprawiają, że termooanemometria ma nadal wiele do zaoferowania, szczególnie w obszarze metrologii przepływów. Jej zasadnicze zalety to miniaturyzacja czujników pomiarowych, pozwalająca traktować pomiar jako punktowy oraz doskonałe właściwości dynamiczne, pozwalające na zastosowanie tej metody w obszarze szybkozmiennych przepływów [4]. Metoda może być także stosowana do badań przepływów 3-D przy zastosowaniu specjalnych sond

¹ Instytut Maszyn Przepływowych, 90-924 Łódź, Wólczańska 219/223,
aleksander.olczyk@p.lodz.pl, tomasz.palczynski@p.lodz.pl

trójwłóknowych.

Zasada działania sondy termooanemometrycznej opiera się na pomiarze ilości ciepła odbieranego od grzanego elementu pomiarowego (najczęściej to włókno o średnicy kilku μm) przez płynący czynnik. Wzrost prędkości przepływu intensyfikuje wymianę ciepła na powierzchni włókna, co zwiększa ilość odbieranego ciepła.

Równanie bilansu ciepła generowanego przez przepływ prądu przez włókno oraz odbieranego przez przepływ czynnika można zapisać w postaci [3]:

$$\frac{U^2}{R(T_w)} = \alpha S_w (T_w - T_g) \quad (1)$$

gdzie:

U - napięcie na zaciskach włókna;

$R(T_w)$ – rezystancja włókna w temperaturze T_w ;

α – przejmowalność ciepła pomiędzy włóknem sondy a płynem;

S_w – pole powierzchni wymiany ciepła (pole powierzchni włókna);

T_w – temperatura włókna sondy;

T_g – temperatura gazu.

Równanie to można przekształcić do postaci [5]:

$$U^2 = (A + B \varphi_m^N) (T_w - T_g) \quad (2)$$

gdzie:

$\varphi_m = \rho u = \frac{\dot{m}}{S}$ - tzw. prędkość masowa lub gęstość strumienia masy

Stałe A i B zależą od parametrów geometrycznych włókna oraz parametrów przepływu i mają postać:

$$A = a R(T_w) \frac{\lambda_g S_w}{l} \quad \text{oraz} \quad B = b R(T_w) \frac{\lambda_g S_w}{l} \left(\frac{d}{\mu} \right)^N ;$$

gdzie:

λ_g - przewodność cieplna gazu

l - wymiar charakterystyczny (długość włókna);

d - wymiar charakterystyczny (średnica włókna)

μ - lepkość dynamiczna gazu

Wyrażenia na stałe A i B zawierają dodatkowo współczynniki a, b, N , które wynikają z przyjętego modelu wymiany ciepła, wiążącego ze sobą liczby kryterialne Nusselta Nu i Reynoldsa Re_d . Dla włókien termooanemometrycznych stosuje się zwykle równanie Kramersa:

$$Nu = a + b Re_d^N \quad (3)$$

z wartościami współczynników: $a = 0,039$, $b = 0,51$, $N = 0,5$

Równanie Kramersa opisuje wyidealizowany przypadek walca o małej średnicy, z wymianą ciepła wyłącznie w postaci konwekcji wymuszonej. W przypadku rzeczywistego włókna mamy dodatkowo do czynienia z konwekcją naturalną oraz odprowadzaniem ciepła do wsporników włókna na drodze przewodzenia.

Dlatego współczynniki a, b, N (a w konsekwencji A, B, N) wyznacza się doświadczalnie w trakcie wzorcowania statycznego sondy termooanemometrycznej.

W równaniu (2) występują w formie jawnej dwie temperatury: włókna T_w oraz gazu T_g . Dodatkowo stałe A i B są także wrażliwe na zmianę temperatury włókna, wpływającą na wartość jego rezystancji. Aby uniezależnić się od zmian temperatury włókna, zwykle stosuje się układy typu CTA (Constant Temperature Anemometr), w których dokonuje się stabilizacji temperatury włókna na drodze elektronicznej, co rozwiązuje problem jego wpływu na wartość sygnału wyjściowego z sondy. Problemem pozostaje natomiast zmienność temperatury ośrodka T_g . Jest ona niejako integralnie związana z obszarem zastosowań sondy termooanemometrycznej, która jest przyrządem dedykowanym do pomiarów przepływów nieustalonych, w których zmienności podlegają wszystkie parametry termodynamiczno-przepływowe (ciśnienie, temperatura, prędkość). Istnieją metody ograniczania wpływu zmian temperatury czynnika na sygnał wyjściowy termooanometru poprzez zastosowanie elektronicznych układów kompensacji lub korekcji temperaturowej [2]. W niniejszym artykule zaproponowano procedurę polegającą na bezpośrednim wykorzystaniu danych z dwuwymiarowego wzorcowania, która może być stosowana w warunkach silnej zmienności temperatur w badanym przepływie.

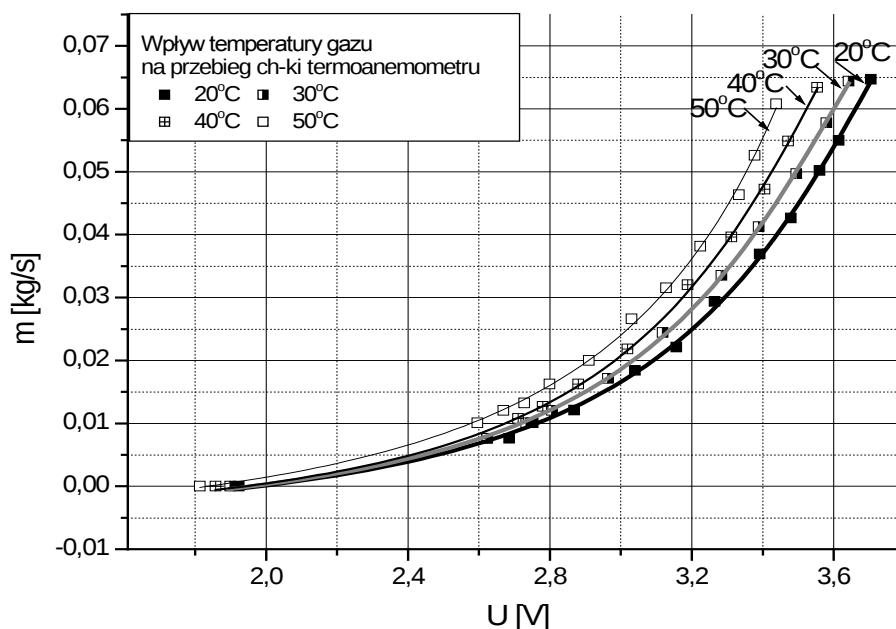
2. WZORCOWANIE SONDY TERMOANEMOMETRYCZNEJ

Na rys. 1 przedstawiono charakterystykę statyczną sondy termooanemometrycznej wykonaną dla różnych wartości temperatur czynnika [5].

Zgodnie z równaniem (2), wzrost temperatury czynnika T_g przy stałym strumieniu masy, skutkuje zmniejszeniem sygnału wyjściowego sondy. Wpływ temperatury rośnie ze wzrostem strumienia masy (krzywe dla poszczególnych temperatur robią się coraz bardziej rozbieżne). Zjawisko to jest bardzo niekorzystne szczególnie w przypadku przepływów pulsacyjnych o dużych amplitudach. Zmiany wartości temperatury i strumienia masy zachodzą wówczas w szerokich granicach, co powoduje trudności w korzystaniu z charakterystyki statycznej.

Z uwagi na pracochłonność procedury wzorcowania, wykonuje się ją zazwyczaj dla jednej temperatury czynnika, odpowiadającej w przybliżeniu składowej stałej przebiegu rejestrowanego podczas pomiarów. W przypadku przebiegów o małych amplitudach takie podejście jest akceptowalne. Świadomie godzimy się wówczas na pogorszenie dokładności pomiarów w zamian za uproszczenie procedury

wzorcowania. Jednak w przypadku przepływów charakteryzujących się silnymi zmianami temperatury, jej wpływ należy uwzględnić.



Rys. 1. Wpływ temperatury czynnika na charakterystykę statyczną sondy termocouplemometrycznej [3].

Wzorcowanie polega na przyporządkowaniu sygnałowi wyjściowemu z sondy U , znanej (zmierzonej przyrządem wzorcowym) wartości prędkości lub strumienia masy. Jedną z możliwych konfiguracji stanowiska do wzorcowania sond termocouplemometrycznych przedstawiono w [4].

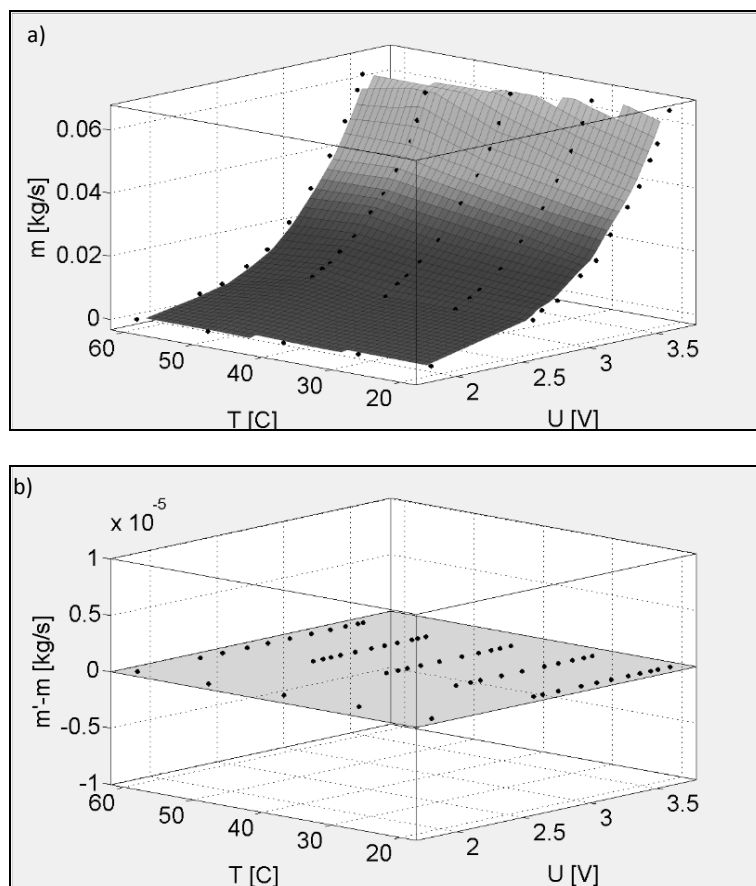
Wzorcowanie jest prowadzone w warunkach ustalonych: zadawane wartości prędkości (strumienia masy) oraz temperatury są stałe dla danego punktu charakterystyki. W efekcie jeden punkt charakterystyki opisany jest trzema współrzędnymi: $\dot{m}, U, T_g$ lub (przy wykorzystaniu prędkości masowej) ϕ_m, U, T_g .

Poprawne odwzorowanie charakterystyki statycznej powinno więc mieć formę powierzchni określonej w układzie trójwymiarowym.

3. TRÓJWYMIAROWA CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA SONDY TERMOANEMOMETRYCZNEJ

W wyniku wzorcowania, otrzymano trójwymiarowy zbiór punktów przedstawiający strumień masy $\dot{m}$ jako funkcję temperatury gazu T_g i napięcia U – sygnału wyjściowego z sondy. Wyniki te przedstawiono na rysunku 2a, gdzie

dodatkowo naniesiono powierzchnię uzyskaną w procesie interpolacji liniowej w środowisku Matlab.



Rys. 2. Interpolacja liniowa wyników procesu wzorcowania sondy termooanemometrycznej (a), residua powierzchni aproksymującej (b).

Warto pamiętać, że uzyskana w procesie interpolacji powierzchnia nie może być przedstawiona w postaci jawnej, tj. równania powierzchni aproksymującej. Rysunek 2b przedstawia tzw. residua, dla powierzchni wynikającej z interpolacji liniowej, zdefiniowane jako $r = \dot{m}' - \dot{m}$. Residua reprezentują różnicę pomiędzy wartością wielkości aproksymowanej i jej aproksymacją i dla przypadku przedstawionego na rysunku nr 2a residua przyjmują zerową wartość.

W tabeli 1 zawarto porównanie trzech postaci równania powierzchni aproksymującej analizowany zbiór wyników procesu wzorcowania sondy termooanemometrycznej przedstawiony na rysunku 1. Aproksymację powierzchnią

o dwóch stopniach swobody dla zmiennej U i jednym stopniu swobody dla zmiennej T otrzymano jako polioptymalizację o równaniu (4):

$$\dot{m}(U, T) = p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T, \quad (4)$$

zwaną dalej PO_21. Stopnień swobody należy w tym przypadku rozumieć jako dopuszczalny najwyższy wykładnik potęgi danej zmiennej w równaniu aproksymującym. W analogiczny sposób zdefiniowano równania powierzchni przy polioptymalizacji dla trzech stopni swobody dla zmiennej U i jednego dla zmiennej T zdefiniowaną jako PO_31 a także dla pięciu stopni swobody dla zmiennej U i czterech dla zmiennej T zdefiniowaną jako PO_54.

W porównaniu wyników z tabeli 1 przedstawiono następujące wskaźniki obrazujące jakość aproksymacji [1]:

- SSE – Sum of Squares Due to Error – suma kwadratów różnic tzw. suma kwadratów residuów lub też resztkowa suma kwadratów odchyłeń definiowana jako $SSE = \sum_{i=1}^n (\dot{m}' - \dot{m})^2$, gdzie wartości bliższe zeru wskazują na lepszą aproksymację;

- SSR- Sum of Squares of Regression- regresyjna suma kwadratów odchyłeń, definiowana jako $SSR = \sum_{i=1}^n (\dot{\bar{m}} - \dot{m}')^2$, czyli różnica pomiędzy wartością

aproksymowaną $\dot{m}'$ i wartością średnią $\dot{\bar{m}}$, definiowaną jako wartość odniesienia stanowiącą wartość średnią ze wszystkich wyników pomiarów dla danej wielkości (wielkość statystyczna nie posiadająca interpretacji fizycznej dla analizowanego przypadku);

- SST – Total Sum of Squares – całkowita suma kwadratów odchyłeń definiowana jako $SST = \sum_{i=1}^n (\dot{\bar{m}} - \dot{m})^2$ lub $SST = SSR + SSE$.

- R^2 =R-square - współczynnik determinancji definiowany jako $R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$.

- adjusted R-square – skorygowany współczynnik determinancji, definiowany jako $adjusted_R - square = adj_R^2 = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(v)}$ uwzględniający zależność:

$v = n - \dot{m}$, gdzie: v - liczba stopni swobody residuów rozumiana jako liczba niezależnych wyników obserwacji lub liczba niezależnych zmiennych losowych, n - liczba parametrów estymowanych czyli liczba związków które łączą wyniki ze sobą. Estymatory, które stanowią granice przedziałów występowania zmiennych losowych uznaje się jako tzw. fixed – ustalone, które zwiększają liczbę stopni

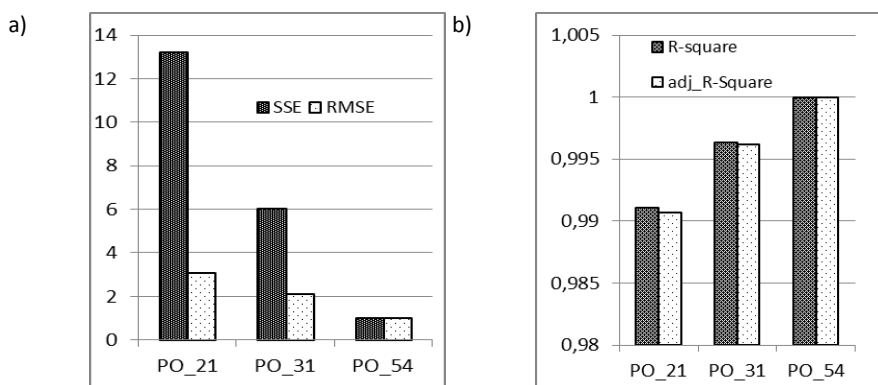
swobody analizowanego układu.

- RMSE – Root Mean Squared Error – błąd średniokwadratowy definiowany jako

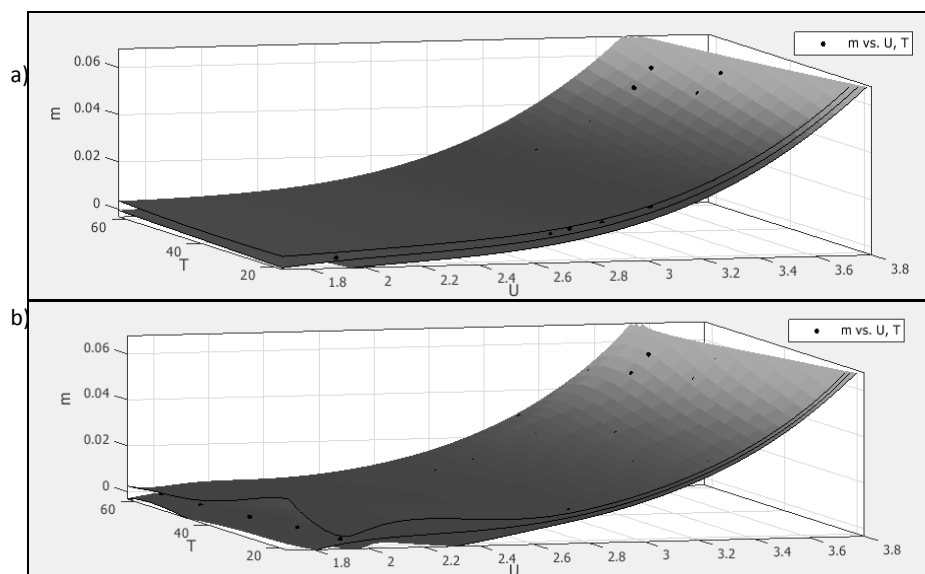
$$RMSE = s = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{SSE}{v}}.$$

Porównując ze sobą przebiegi powierzchni aproksymujących przedstawione w tabeli 1, wyraźnie widać iż wariant PO_21 jest niedoskonały ze względu na tzw. siodło, co stanowi o tzw. niejednoznaczności charakterystyki statycznej, funkcja przyjmuje taką samą wartość dla dwóch różnych argumentów, wartości wielkości wejściowej przetwornika U .

Na rysunku 3a przedstawiono porównanie znormalizowanych, względem wartości minimalnej, parametrów SSE i RMSE dla trzech rozważanych wariantów aproksymacji. Wskaźnik SSE jest trzynastokrotnie (dla PO_21) i sześciokrotnie (dla PO_31) większy od przyjętego jako punkt odniesienia wariantu PO_54. Wartości RMSE wynoszą odpowiednio: 3 – dla PO_21, 2- dla PO_31 i 1 dla wartości odniesienia czyli PO_54. Suma kwadratów różnic – SSE dla wariantu PO_31 może być uznana jako kompromis pomiędzy jakością dopasowania powierzchni aproksymującej w stosunku do stopnia skomplikowania równania tejże powierzchni. Otrzymana funkcja aproksymująca pozwala na określenie jej wartości w całej dziedzinie, przede wszystkim wartości pośrednich pomiędzy punktami pochodzącymi z wzorcowania. Zastosowanie w/w procedury umożliwia określenie wartości pośrednich w oparciu o interpolację będącą wynikiem polioptymalizacji z przyjętym poziomem SSE i odpowiadającym temu przedziałem niepewności dla przyjętego przedziału ufności. W przypadku braku takiej procedury stosuje się najczęściej interpolację liniową powodującą znaczne pogorszenie jakości estymacji analizowanej wielkości.



Rys. 3. Porównanie statystycznych parametrów powierzchni aproksymujących dla trzech wariantów polioptymalizacji trójwymiarowej charakterystyki statycznej sondy termooanemometru.



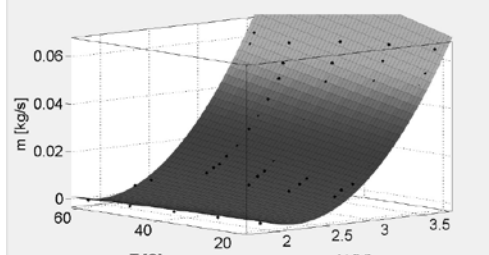
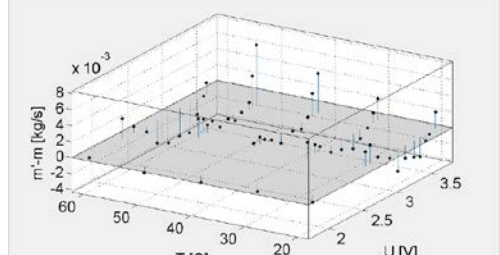
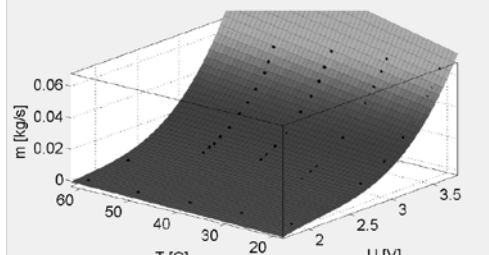
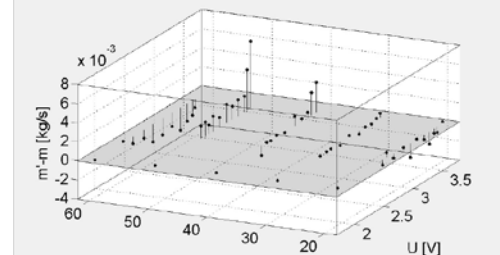
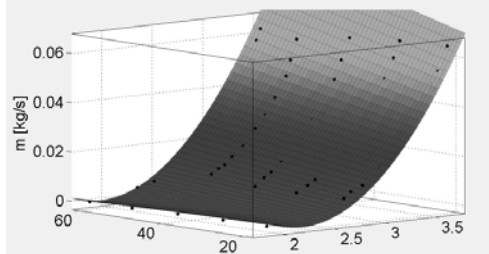
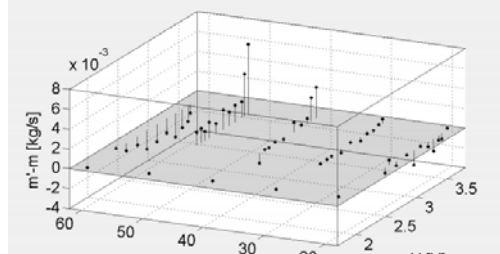
Rys. 4. Porównanie przedziałów niepewności estymowanej powierzchni powierzchni dla polioptymalizacji trójwymiarowej charakterystyki statycznej sondy termooanemometru linią PO_31 (a) i PO_54 (b) dla przyjętego przedziału ufności na poziomie 95%.

3. WNIOSKI

Z przeprowadzonej analizy procedury pomiaru chwilowej prędkości płynu termooanemometrem CTA w warunkach silnej zmienności temperatury czynnika wynika, że:

- Konieczne jest wzorcowanie przetworników termooanemometrycznych w dziedzinie temperatury, celem uwzględnienia jej wpływu na wyniki pomiarów, rysunek 1.
- Celowe jest zastąpienie, zbioru charakterystyk statycznych termooanemometru CIA powierzchnią aproksymującą umożliwiającą określenie wartości strumienia masy w funkcji wartości mierzonej U i temperatury gazu T_g , co znacznie upraszcza proces pomiarowy a tym samym proces wytwarzania z jego zastosowaniem.
- Celowe jest posługiwanie się wskaźnikiem SSE przy wyborze optymalnej postaci równania krzywej aproksymującej – linia PO_31, towarzyszy temu znaczne zmniejszenie przedziałów niepewności estymowanej wartości (Wariant PO_31 w porównaniu z wariantem PO_54) wynikające z przyjętego przedziału ufności – w tym przypadku 95%, rysunek 3.

Tabela 1. Warianty polioptymalizacji trójwymiarowej charakterystyki statycznej sondy termooanemometrycznej

Trójwymiarowa charakterystyka statyczna sondy termooanemometrycznej	Residua powierzchni aproksymującej
Polioptymalizacja 21 – zwana dalej PO_21 $\dot{m}(U, T) = p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T$ Goodness of fit: SSE: 0.0002209; R-square: 0.9904; Adjusted R-square: 0.9896; RMSE: 0.002061	
	
Polioptymalizacja 31 – zwana dalej PO_31 $\dot{m}(U, T) = p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T + p_{30} \cdot U^3 + p_{21} \cdot U^2 \cdot T$ Goodness of fit: SSE: 0.0001007; R-square: 0.9956; Adjusted R-square: 0.9951; RMSE: 0.001419	
	
Polioptymalizacja 54 zwana dalej PO_54 $\begin{aligned} \dot{m}(U, T) = & p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T + p_{30} \cdot U^3 + p_{21} \cdot U^2 \cdot T + \\ & p_{12} \cdot U \cdot T^2 + p_{03} \cdot T^3 + p_{40} \cdot U^4 + p_{31} \cdot U^3 \cdot T + p_{22} \cdot U^2 \cdot T^2 + p_{13} \cdot U \cdot T^3 + p_{04} \cdot T^4 + \\ & p_{50} \cdot U^5 + p_{41} \cdot U^4 \cdot T + p_{32} \cdot U^3 \cdot T^2 + p_{23} \cdot U^2 \cdot T^3 + p_{14} \cdot U \cdot T^4 \end{aligned}$ Goodness of fit: SSE: 1.672e-05; R-square: 0.9993; Adjusted R-square: 0.9989; RMSE: 0.0006722	
	

LITERATURA

- [1] KORNACKI J., MILENICZUK J., Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych, W: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004-491.
- [2] LIGĘZA P., Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe. AGH – Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Seria Rozprawy i Monografie, nr 98, Kraków, 2001.
- [3] OLCZYK A., HAMMOUD A., Problemy pomiaru chwilowego strumienia masy w przepływie niestacjonarnym za pomocą sondy termooanemometrycznej. Ciepłne Maszyny Przepływowe nr 686, Łódź, 1993, 187-209;
- [4] OLCZYK A. Investigation of the specific mass flow rate distribution in pipes supplied with a pulsating flow. W: Int. J. Heat Fluid Flow, 2009, vol.30, nr 4, 637-346.
- [5] OLCZYK A. Analiza niestacjonarnych zjawisk przepływowych w przewodach zasilanych pulsacyjnie. Politechnika Łódzka. Zeszyty Naukowe Nr 1003. Seria Rozprawy naukowe, Z. 360, Łódź, 2009.
- [6] PAŁCZYŃSKI T., A boundary conditions at modeling 1-D pulsating flows in pipes according to the method of characteristics. W: J. KONES, 2012, vol.19, nr 2, 395-402.