

Aleksander OLCZYK

UL. WÓLCZAŃSKA 219/223, 90-924 ŁÓDŹ (POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH)

Koncepcja pomiaru szybkozmiennej temperatury gazu z uwzględnieniem dynamicznej składowej temperatury

dr inż. Aleksander OLCZYK

Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego PL – uzyskał dyplomy w specjalnościach „Samochody i ciągniki” (1989) oraz „Systemy, maszyny i urządzenia energetyczne” (1991). W 1992 roku ukończył we Francji studia DEA Conversion de l’Energie. W 1997 obronił pracę doktorską z dziedziny niestacjonarnych zjawisk przepływowych w turbozespołach ładujących. Zajmuje się problematyką pomiarów parametrów przepływu – głównie niestacjonarnych.



e-mail: aolczyk@p.lodz.pl

Streszczenie

W pomiarach zmiennej w czasie temperatury płynącego gazu występują dwa kluczowe problemy: pierwszy związany jest z niedostateczną dynamiką stosowanych zwykle przetworników temperatury, drugi wynika z konieczności uwzględnienia dynamicznej składowej temperatury wynikającej z częściowego wyhamowania czynnika na powierzchni termometru. W artykule proponuje się sposób kompleksowego rozwiązania tego zagadnienia poprzez zastosowanie metody korekcji dwutorowej, której celem jest wyeliminowanie (lub wyraźne zredukowanie) błędu dynamicznego pomiaru temperatury a następnie rozłożenie sygnału temperatury na składowe odpowiadające temperaturze statycznej (wynikającej ze zmian parametrów termodynamicznych czynnika) oraz dynamicznej (związanej z prędkością przepływu gazu). W procesie tego rozkładu niezbędna jest znajomość charakterystyki tzw. współczynnika odzyskania energii kinetycznej określającego stopień przetworzenia energii kinetycznej gazu na ciepło rejestrowane jako wzrost temperatury czujnika. W artykule zaproponowano metodę wyznaczania takiej charakterystyki za pomocą sondy Prandtla o specjalnie zmodyfikowanej konstrukcji.

Słowa kluczowe: temperatura, gaz, przepływ niestacjonarny, błąd dynamiczny, współczynnik odzysku, statyczna i dynamiczna składowa temperatury

Concept of the unsteady gas temperature measurement, including the dynamic component of temperature

Abstract

Two key problems occur during measurements of unsteady temperature of the flowing gas: the first issue is related to insufficient dynamics of usually used temperature transducers, the second one follows from the necessity of taking into account the dynamical component of temperature that results from a partial impeding of the medium on the thermometer surface. A complex solution to this problem through an application of two-path correction method to eliminate (or reduce considerably) the dynamic error of the temperature measurement, and then a decomposition of the temperature signal into components corresponding to static temperature (resulting from changes in thermodynamic parameters of the medium) and dynamic temperature (related to gas flow velocity), is postulated. During the decomposition, it is necessary to know the characteristics of the so-called kinetic energy recovery coefficient that defines a degree of transformation of the gas kinetic energy into heat, recorded as an increase in the sensor temperature. In the paper, a method for determination of such characteristics with a specially modified Prandtl probe is discussed.

Keywords: temperature, gas, unsteady flow, dynamic error, recovery coefficient, static and dynamic component of temperature

1. Wstęp

W maszynach przepływowych bardzo często mamy do czynienia ze zmiennością parametrów przepływu w funkcji czasu. Jednym z takich przypadków jest przepływ przez turbinę zespołu ładującego silnik spalinowy, która zasilana jest spalinami w sposób pulsacyjny, zgodnie z kolejnymi cyklami otwierania i zamykania zaworów wydechowych w kolejnych cylindrach silnika. Dla stałego punktu pracy silnika przepływ spalin jest okresowy, a częstotliwość zmian parametrów tego przepływu zależy od aktualnej prędkości obrotowej silnika oraz ilości jego cylindrów. W nowoczesnych szybkoobrotowych silnikach Diesla częstotliwości generowanych na wylocie pulsacji sięgają poziomu 150-200Hz. Pomiar szybkozmiennych parametrów takiego przepływu, wymaga zastosowania przetworników o jak najlepszych własnościach dynamicznych. W przypadku ciśnień dostępne obecnie na rynku przetworniki piezorezystancyjne pozwalają na pomiary sygnałów o częstotliwościach rzędu kilkudziesięciu kHz [1]. Na podobnym poziomie kształtują się częstotliwości graniczne termooptometrów stosowanych do pomiarów prędkości przepływu [2]. Poważnym problemem jest natomiast pomiar zmiennej w czasie temperatury gazu. Zastosowanie termoelementów z odkrytą spoiną, nawet przypadku wysokiego stopnia ich miniaturyzacji, pozwala na uzyskanie pasma przenoszenia na poziomie jedynie kilku-kilkunastu Hz [3]. Drugim poważnym problemem jest interpretacja zarejestrowanego sygnału temperatury. Zwykle bowiem jest on sumą temperatury statycznej (związanej z ciśnieniem i gęstością za pomocą równania stanu gazu) oraz pewnej części temperatury dynamicznej. Bez wyseparowania tych dwóch składowych nie jest możliwe poprawne opisanie zjawisk ciepłno- przepływowych zachodzących w tego typu przepływie.

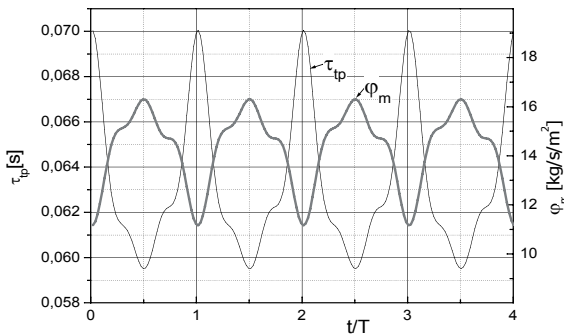
2. Analiza możliwości pomiaru szybkozmiennej temperatury gazu

Skutecznym rozwiązaniem pomiaru szybkozmiennej temperatury jest zastosowanie termometru stałoprądowego CCT (Constant Current Thermometer) działającego jako termometr rezystancyjny z nieosłoniętym elementem pomiarowym (najczęściej włóknem wolframowym o średnicy kilku mikrometrów). Np. Bruun [4] podaje wartość częstotliwości granicznej¹ dla takiego termometru (przy zastosowaniu włókna o średnicy 5µm) na poziomie 100Hz, jednak taka orientacyjna wartość nie może posłużyć jako parametr do korekcji własności dynamicznych, która pozwoliłaby poszerzyć zakres dostępnych częstości do wymaganego poziomu.

W tej sytuacji konieczna jest identyfikacja stosowanego czujnika a więc wyznaczenie parametrów jego charakterystyki dynamicznej. Sytuację dodatkowo komplikuje fakt, iż parametry te (w przypadku przyrządu I-go rzędu jest to stała czasowa) silnie zależą od prędkości przepływu intensyfikującej wymianę ciepła na powierzchni czujnika [5], [6]. W efekcie nie można używać jednej, niezależnej od warunków przepływu wartości stałej czasowej. Nawet w warunkach przepływu średnioustalonego (a więc takiego, dla którego wartość średnia parametrów przepływu

¹ definiowanej jako częstość odpowiadająca poziomowi tłumienia sygnału $L=-3dB$

jest stała) wskazane jest operowanie chwilową wartością stałej czasowej, wynikającą z aktualnych parametrów przepływu. Na rys. 1 przedstawiono przebieg zmian wartości stałej czasowej termoelementu τ_{tp} przy częstotliwości wymuszenia 20Hz.



Rys. 1. Zmiany wartości stałej czasowej w przepływie pulsacyjnym na tle zmian gęstości strumienia masy φ_m
Fig. 1. Changes in values of the time constant in the pulsating flow vs. changes in the specific mass flow rate. φ_m

Przebieg ten wyznaczono na podstawie modelu zaprezentowanego w [5], opartego na równaniach bilansu ciepła wymianianego na spoinie termoelementu przy jej opływie przez gaz o znanych, zmiennych w czasie parametrach.

Przebieg stałej czasowej skonfrontowano z przebiegiem zmierzonej termoanemometrem stałotemperaturowym CTA gęstości strumienia masy φ_m , definiowanej jako:

$$\varphi_m = \frac{\dot{m}}{S} = \rho v \quad (1)$$

gdzie:

\dot{m} - strumień masy gazu;

S - pole powierzchni badanego przekroju;

ρ - gęstość gazu w badanym przekroju;

v - prędkość przepływu (uśredniona po powierzchni badanego przekroju).

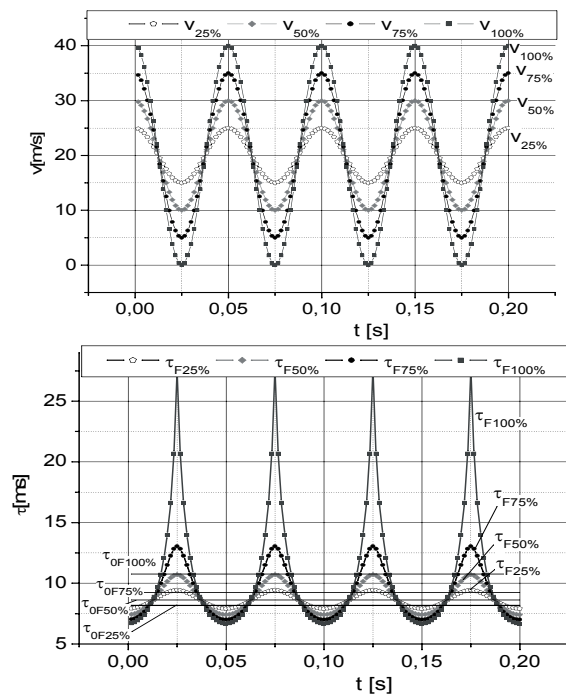
Jak wynika z równ. (1), gęstość strumienia masy jest iloczynem gęstości i prędkości przepływu. Dla przepływów dalekich od krytycznych, charakteryzowanych przez małe liczby Macha ($Ma \ll 1$) zmiany gęstości gazu są niewielkie i przebieg φ_m odpowiada jakościowo zmianom prędkości przepływu.

Jak widać z rys. 1, przebiegi prędkości i stałej czasowej są w stosunku do siebie w przeciwfazie. W obszarach, w których prędkość przepływu (reprezentowana przez przebieg φ_m) jest najmniejsza, mamy do czynienia z maksymalnymi wartościami stałej czasowej. Zmniejszenie prędkości powoduje bowiem spadek intensywności wymiany ciepła na spoinie i pogorszenie własności dynamicznych termometru.

Na rys. 2a, przedstawiono cztery zamodelowane przebiegi prędkości przepływu o takiej samej wartości średniej $v_0 = 25 \text{ m/s}$ ale różnych amplitudach, stanowiących kolejno 25, 50, 75 oraz 100% wartości średniej. Rys. 2b, pokazuje charakter zmian stałej czasowej analizowanej termopary dla tych przebiegów prędkości. Wartości stałej czasowej obliczane były za pomocą modelu opisanego w [5] z wykorzystaniem równania Frösslinga, stosowanego w przypadku zamodelowania spoiny termoelementu jako kuli.

Z rys. 2b widać, iż przy zachowaniu stałej wartości średniej prędkości, przebieg stałej czasowej bardzo silnie zależy od charakteru jej zmian. Wraz ze wzrostem amplitudy prędkości, rośnie amplituda zmian stałej czasowej. Na szczególną uwagę zasługuje przebieg $\tau_{F100\%}$. W obszarze, w którym prędkość przepływu ($v_{100\%}$) zbliża się do zera (wyhamowanie czynnika) obserwujemy bardzo silny wzrost wartości stałej czasowej. Przy zaniku prędkości, mamy bowiem do czynienia z brakiem wymiany ciepła na drodze konwekcji wymuszonej, kształtującej zjawiska wymiany ciepła na spoinie. Efektem wzrostu amplitud

prędkości i coraz „głębszego” wchodzenia w obszary niskich, niekorzystnych z punktu widzenia wymiany ciepła prędkości, jest stopniowe podwyższanie również średniej wartości stałej czasowej (por. proste $\tau_{0F25\%}, \dots, \tau_{0F100\%}$ na rys. 2b).



Rys. 2. Przebiegi prędkości (a) o amplitudzie stanowiącej odpowiednio 25, 50, 75 oraz 100% wartości średniej ($v_0 = 25 \text{ m/s}$) oraz odpowiadające im zmiany stałej czasowej (b) zamodelowanej wg równania Frösslinga.
Fig. 2. Velocity (a) with the amplitude equal to 25, 50, 75 and 100%, respectively, of the mean value ($v_0 = 25 \text{ m/s}$) vs. corresponding changes in the time constant (b) modeled according to the Frössling equation.

Z uwagi na złożoność zjawisk cieplno-przepływowych w analizowanym przypadku w zasadzie nie ma możliwości przeprowadzenia poprawnego procesu identyfikacji czujnika a następnie dokonana korekcji jego własności dynamicznych. Zwykle bowiem procesy identyfikacji i korekcji są prowadzone w innych warunkach przepływu, co nie pozwala na przeniesienie wyników identyfikacji na warunki panujące podczas pomiarów.

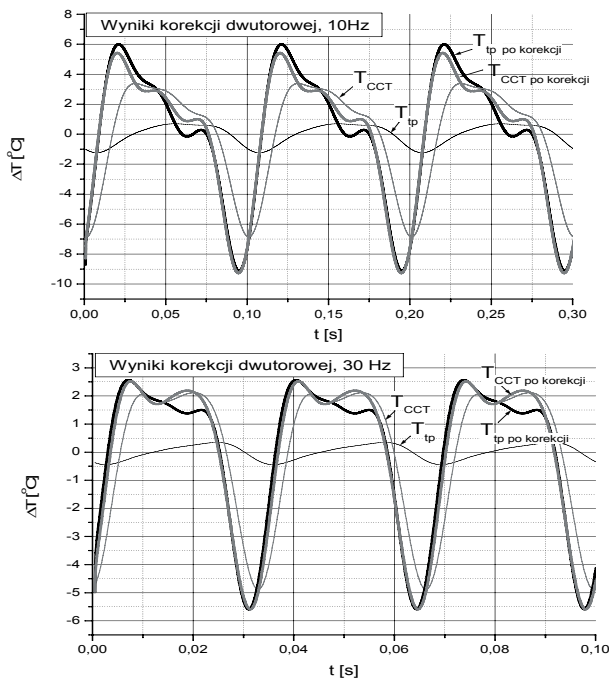
Z tego punktu widzenia niezwykle atrakcyjna wydaje się metoda korekcji dwutorowej, nazywana również metodą korekcji „w ciemno”. Istotą tej metody jest zastosowanie dwóch przetworników o różnej (z góry nie znanej) dynamice, mierzących ten sam sygnał wejściowy. Zaletą tej metody jest brak konieczności uprzedniej identyfikacji czujnika. Jest ona de facto efektem procesu korekcji (proces ten jest prowadzony iteracyjnie do momentu spełnienia warunku minimalnej różnicy sygnałów po korekcji z obydwu torów pomiarowych). Metoda ta jest od kilku lat intensywnie rozwijana na drodze analiz teoretycznych i symulacji numerycznych [7],[8], a niedawno doczekała się pierwszych w kraju realizacji praktycznych [6],[9].

2.1. Praktyczna realizacja układu korekcji dwutorowej

Układ korekcji dwutorowej zrealizowany w IMP PŁ oparty jest na dwóch czujnikach temperatury o wyraźnie różniących się własnościach dynamicznych. W „słabszym” torze umieszczono miniaturową termoparę typu „E” wykonaną z drutu o średnicy 0,05mm, w „silniejszym” termometr CCT wykonany z drutu wolframowego o średnicy 5μm.

Opis stanowiska badawczego i szczegóły dotyczące obydwu torów pomiarowych przedstawiono w pracach [6] oraz [9]. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki korekcji

przeprowadzonej na sygnałach o częstotliwości 10 oraz 30 Hz, zarejestrowanych w przewodzie zasilanym w sposób pulsacyjny.



Rys. 3. Niekorygowane i korygowane przebiegi temperatur zarejestrowane termoparą oraz termometrem CCT dla częstotliwości pulsacji 10 oraz 30 Hz
Fig. 3. Uncorrected and corrected time function of temperature recorded with a thermocouple and a CCT thermometer for the pulsation frequency of 10 and 30 Hz

Stopień zgodności sygnałów z obydwu torów pomiarowych po korekcji jest bardzo wysoki.

W sensie amplitudowym możemy mówić o pełnej zgodności, niewielkie rozbieżności dotyczą jedynie charakteru obydwu przebiegów, przy czym są one ograniczone jedynie do pewnego fragmentu okresu pulsacji.

Podczas badań uzyskano wysoką skuteczność korekcji w zakresie częstotliwości pulsacji do 50 Hz [9]. Poszerzenie tego zakresu wymagać będzie zastosowania czujnika o lepszych właściwościach dynamicznych w „słabszym” torze pomiarowym (por. niekorygowane przebiegi dla termopary na rys. 3) oraz uzyskania jak najkorzystniejszego stosunku sygnału użytecznego do zakłóceń w tym torze.

Zaprezentowana metoda daje obiecujące rezultaty pomimo operowania uśrednionymi dla okresu pulsacji wartościami stałych czasowych (przyjęto stałe parametry korektorów w obydwu torach pomiarowych [6]). Należy jednak zauważyć, że w przedstawionych przypadkach, amplitudy względne pulsacji są na poziomie 15% dla temperatur oraz 30% dla prędkości, a więc nie są bardzo wysokie. Dla wyższych amplitud, wpływ zmian prędkości na chwilowe wartości stałej czasowej byłby znacznie większy, zgodnie z tym, co pokazano na rys. 2. Dlatego też celowe wydaje się rozbudowanie procedur wyznaczania stałych czasowych w taki sposób, aby uwzględnić ich zmienność. Teoretyczne rozwiązanie tego zagadnienia dla przypadku okresowej zmienności stałej czasowej przedstawiono w [10].

3. Rozkład sygnału temperatury na składowe

Zaproponowana metoda korekcji dwutorowej pozwala na wylimitowanie, a przynajmniej znaczne ograniczenie dynamicznego błędu pomiaru temperatury.

Po uzyskaniu sygnału możliwie dokładnie odpowiadającego sygnałowi wejściowemu temperatury, nie mniej ważnym zadaniem będzie jego właściwa interpretacja.

Zmiana temperatury statycznej T jest efektem zmian ciśnienia statycznego p , zgodnie z równaniem stanu gazu:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (2)$$

gdzie: ρ - gęstość gazu; R - indywidualna stała gazowa

Warto podkreślić, iż określenia „statyczna”, „statyczne” wskazują jedynie na niezależność parametru (temperatury, ciśnienia) od prędkości przepływu, w żadnym wypadku nie oznaczają stałości tych parametrów w czasie!!! W przepływie pulsacyjnym, zarówno temperatura jak i ciśnienie statyczne zmieniają się w sposób okresowy.

W przypadku przepływu gazu z dużą prędkością, pojawia się dynamiczna składowa temperatury T_d , wynikająca z zamiany energii kinetycznej czynnika wyhamowanego na czujniku, na energię cieplną:

$$T_d = \frac{v^2}{2c_p} \quad (3)$$

gdzie c_p jest ciepłem właściwym gazu przy stałym ciśnieniu.

W idealnym przypadku, czujnik będzie więc rejestrował sumę tych dwóch składowych, w postaci temperatury całkowitej T_e :

$$T_e = T + T_d \quad (4)$$

Jednak w rzeczywistości, wyhamowanie czynnika na powierzchni czujnika nie jest pełne i w efekcie mierzona temperatura T_M jest mniejsza od całkowitej T_e :

$$T_M = (T + rT_d) < (T + T_d) = T_e \quad (5)$$

gdzie r jest tzw. współczynnikiem odzyskania energii kinetycznej (współczynnikiem odzysku) [11].

Wartość współczynnika odzysku zależy od indywidualnych cech konstrukcyjnych czujnika oraz jego usytuowania w przepływie. Dane dostępne w literaturze [11] dają jedynie wyobrażenie o złożoności problemu, w żadnym wypadku nie można ich bezpośrednio wykorzystać.

Sytuację komplikuje dodatkowo fakt, iż współczynnik r zmienia się w funkcji prędkości przepływu, co powoduje konieczność wyznaczania jego charakterystyki, zwykle wykonywanej w funkcji liczb kryterialnych Reynoldsa (Re) lub Macha (Ma). Ostatecznie, posługiwanie się współczynnikiem odzysku wymaga indywidualnego wywzorcowania używanego czujnika. Wzorcowanie to rodzi kolejne problemy, ponieważ nie istnieje wzorcowy czujnik, zapewniający w szerokim zakresie prędkości stałą wartość współczynnika $r=1$. Dla każdego rzeczywistego czujnika $r < 1$.

Dlatego proponuje się zastosowanie metody wyznaczania współczynnika odzysku, z wykorzystaniem sondy Prandtla o specjalnej konstrukcji. Sonda ta oprócz klasycznego pomiaru ciśnień (całkowitego p_e i statycznego p) zapewnia pomiar temperatury statycznej gazu (por. rys. 4). Pomiar ten jest realizowany za pomocą miniaturowej termopary umieszczonej w punkcie odpowiadającym pomiarowi ciśnienia statycznego (na obwodzie końcówki pomiarowej sondy) i odizolowanej cieplnie od sondy.

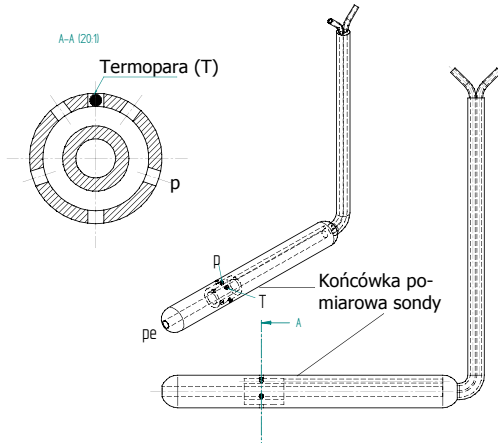
Umieszczenie termopary w tym miejscu zapewnia pomiar temperatury statycznej, analogicznie do pomiaru ciśnienia statycznego (wektor prędkości jest równoległy do osi walcowej części końcówki pomiarowej sondy, a więc żadna składowa dynamiczna temperatury nie ma wpływu na wskazanie termopary).

Oczywiście wzorcowanie takie odbywa się w warunkach przepływu ustalonego. Pomiar ciśnień całkowitego p_e oraz

statycznego p (rys. 4) umożliwi wyznaczenie prędkości przepływu v zgodnie równaniem (6).

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(p_e - p)}{\rho}} \quad (6)$$

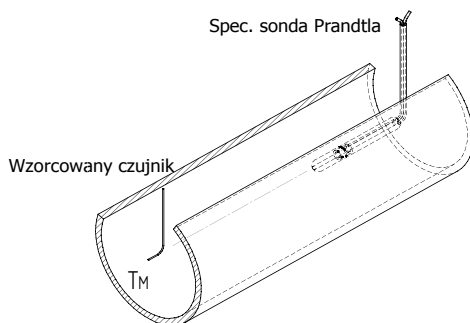
Gęstość ρ zostanie wyznaczona z równania stanu gazu (2).



Rys. 4. Schemat sondy Prandtla w specjalnej wersji, wzbogaconej o dodatkowy pomiar temperatury statycznej.

Fig. 4. Schematic drawing of the Prandtl probe in a special version, equipped with the additional measurement of static temperature.

Dysponując wyznaczoną w ten sposób wartością prędkości v , uzyskamy informację o dynamicznej składowej temperatury. Porównując wyznaczone składowe temperatury (T oraz T_d) z rejestrowanym sygnałem T_M z badanego czujnika, możliwe będzie wyznaczenie współczynnika r - równ. (5), rys. 5. – w zasadzie dla dowolnego czujnika



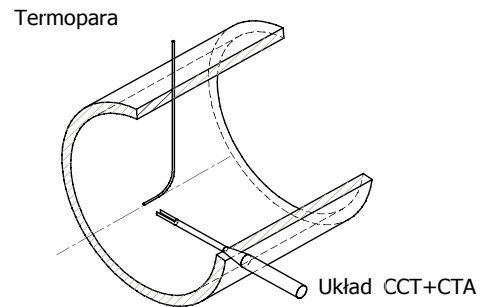
Rys. 5. Schemat umieszczenia w kanale specjalnej sondy Prandtla oraz badanego czujnika dla potrzeb wyznaczania charakterystyki wsp. odzysku.

Fig. 5. Schematic view of location of the special Prandtl probe and the sensor under investigation in the channel in order to determine the characteristics of the recovery coefficient.

Przebadanie w opisany sposób zakresu spodziewanych podczas badań prędkości, umożliwi wykonanie charakterystyki współczynnika odzysku $r=r(v)$.

Dysponując tą charakterystyką, będzie możliwe dokonanie rozłożenia zarejestrowanego, zmiennego w czasie sygnału T_M (rozumianego tutaj jako sygnał po korekcji, a więc pozbawiony błędów dynamicznych) na składowe.

Procedura ta wymagać będzie oczywiście jednoczesnej rejestracji sygnałów z układu korekcji dwutorowej w celu pozyskania sygnału T_M (rys. 6.), przy czym stosowany jest tu anemometryczny układ dwuwłóknowy (CCT+CTA) zawierający jedno włóknno do pomiaru temperatury (CCT), a drugie do pomiaru prędkości (CTA). Taki układ, wraz z pomiarem ciśnienia statycznego, za pomocą wkręconego w ściankę kanału przetwornika piezorezystancyjnego (nie zaznaczonego na rys. 6.), pozwala na uzyskanie kompletu parametrów opisujących przepływ.



Rys. 6. Schemat rozmieszczenia przetworników w kanale podczas pomiarów

Fig. 6. Schematic view of locations of transducers in the channel during measurements

4. Wnioski

Skojarzenie metody korekcji dwutorowej oraz metody wyznaczania współczynnika odzysku, powinno umożliwić kompleksowe rozwiązanie zagadnienia pomiaru zmiennej w czasie temperatury gazu w bardzo szerokim przedziale częstotliwości wymuszenia. W efekcie uzyskamy pozbawiony błędów dynamicznych sygnał temperatury, rozłożony na składowe odpowiadające temperaturze statycznej i dynamicznej. Należy podkreślić, iż w obecnie stosowanej praktyce przyjmuje się zwykle, iż niezależnie od konstrukcji czujnika, rejestrowany sygnał odpowiada temperaturze całkowitej, co jest równoważne przyjęciu założenia $r=1$ w całym obszarze pracy czujnika.

Proponowana metoda może być stosowana dla czujników dowolnego typu i o dowolnej konstrukcji. Jedynek warunkiem jest taki dobór czujników w obydwu torach pomiarowych, jaki zapewni skuteczność procesu korekcji dwutorowej.

5. Literatura

- [1] Endevco: Piezoresistive pressure transducers. Instruction manual. 2001
- [2] Ligeza P.: Laboratoryjny termooanemometr stałotemperaturowy i termometr stałoprądowy HPTT 96. Instrukcja. Kraków, IMG PAN. 1996
- [3] Olczyk A., Kucharski J., Urbanek P.: Investigation of thermocouple sensor dynamics under conditions of pulsating flow of gases. 2nd International conference on Advanced Measurement Techniques and sensory Systems for Automotive Applications - 13-14 September 2001 - Ancona, Italy 2001
- [4] Bruun H.H.: Hot wire anemometry –principles and signal analysis. Oxford University Press. 1999
- [5] Olczyk A.: Modelowanie własności dynamicznych przetworników niestacjonarnej temperatury gazu. XV Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”. Krynica, 18-22.09.2005, str. 71-80
- [6] Olczyk A., Kucharski J., Urbanek P.: Wyznaczanie chwilowej temperatury gazu w przepływie nieustalonym za pomocą dwóch równoległych torów pomiarowych. XVI Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”. Krynica 17-21.09.2006. Pomiar Automatyka Kontrola 10/2006 bis, str. 29-34
- [7] Nabelec J.: Metoda wyznaczania „w ciemno” współczynników modelu dynamiki toru pomiarowego – wersja całkowita. Materiały X Jubileuszowego Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych. Krynica 18-22 września 2000, str. 21-28
- [8] Nabelec J., Nalepa J.: Ocena skuteczności trzech algorytmów korekcji dynamicznej pomiaru metodą „w ciemno” dla obiektu pierwszego rzędu – badania symulacyjne. Krajowy Kongres Metrologii, Politechnika Warszawska 24-26.06.2001. str. 247-250
- [9] Olczyk A., Kucharski J., Urbanek P.: Korekcja błędów dynamicznych miniaturowych przetworników temperatury gazu. Ciężkie Maszyny Przepływowe – Turbomachiny nr 129 vol. I. 2006, str. 55-70
- [10] Nabelec J., Zatorski A.: Korekcja błędów dynamicznych niestacjonarnego systemu pomiarowego 1-rzędowej metodą „w ciemno” dla wybranego przypadku okresowego. XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych – Krynica 2005, pp.53-60
- [11] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria - przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. 1998: