

ATU 08

OŚMIOTOROWY MODUŁ STAŁOTEMPERATUROWO – STAŁOPRĄDOWY DO POMIARÓW ANEMOMETRYCZNO – TERMOMETRYCZNYCH

Opis przyrządu standardowego – poszczególne wersje różnią się ilością i funkcją torów pomiarowych, rodzajem czujników i parametrami technicznymi



OPRACOWAŁ DOC. DR HAB. INŻ. PAWEŁ LIGEZA

INSTYTUT MECHANIKI GÓROTWORU PAN
ul. REYMONTA 27, 30-059 KRAKÓW
tel.: (12) 637 62 00, fax: (12) 637 28 84
ligeza@img-pan.krakow.pl

**WERSJA: CZTERY TERMOANEMOMETRY
Z CZUJNIKAMI SPECJALNYMI
NUMER SERYJNY PRZYRZĄDU: 0900**

KRAKÓW 2009

1. Wprowadzenie

Termoanemometria jest pośrednią metodą pomiaru prędkości przepływu gazów poprzez pomiar strat ciepłych grzanego elementu umieszczonego w badanym przepływie. Wyróżniki tej metody to:

- pomiar sygnałów szybkozmiennych,
- pomiar zbliżony do punktowego,
- mała inwazyjność pomiaru,
- brak ruchomych elementów czujnika,
- duży stosunek sygnału do szumu,
- elektryczny sygnał wyjściowy.

Obszar pomiarowy i stopień inwazyjności metody wyznaczone jest rozmiarami elementu pomiarowego czujnika. Jest nim włókno o średnicy kilku mikrometrów wykonane z materiału o rezystancji zależnej od temperatury. Prąd elektryczny rozgrzewa element pomiarowy, umożliwiając jednocześnie pomiar jego temperatury. Przeprowadzenie bilansu ciepłego dla elementu pomiarowego pozwala na wyznaczenie mierzonej wielkości.

Typowym układem pracy czujnika termoanemometrycznego jest układ stałotemperaturowy. Jest to układ regulacji automatycznej zasilający czujnik takim prądem, aby temperatura elementu czynnego utrzymywana była niezależnie od zewnętrznych warunków odbierania ciepła na stałym, zadanym poziomie. W układzie tym prąd czujnika jest funkcją prędkości badanego przepływu, zależny jest jednak również od temperatury medium.

Dla stanu ustalonego wymianę ciepła między elementem czynnym czujnika a przepływającym gazem opisuje równanie:

$$I^2 R = (A + BV^n)(R - R_0), \quad (1)$$

gdzie:

I - natężenie prądu przepływającego przez włókno czujnika,

R - rezystancja nagrzanego włókna czujnika,

R_0 - rezystancja włókna czujnika w temperaturze gazu,

V - prędkość przepływu gazu,

A, B, n - parametry uzyskane w procesie wzorcowania.

W równaniu tym możemy wyróżnić trzy czynniki. Pierwszy to moc prądu elektrycznego ogrzewającego włókno. Prąd I jest mierzonym bezpośrednio sygnałem wyjściowym, rezystancja R jest zależna od warunków pracy czujnika. W układzie stałotemperaturowym rezystancja R utrzymywana jest na zadanym poziomie. Drugi czynnik to funkcja mierzonej prędkości przepływu $A + BV^n$. Parametry tej funkcji zależą od wartości wielkości fizycznych opisujących właściwości czujnika i medium. Ich wartości wyznacza się w procesie wzorcowania czujnika. Trzeci czynnik jest proporcjonalny do różnicy temperatur nagrzanego włókna i medium. Jest on wyrażony poprzez rezystancje, a więc wielkości bezpośrednio mierzalne na drodze elektrycznej. Stosunek rezystancji włókna nagrzanego do jego rezystancji w temperaturze medium:

$$\eta = \frac{R}{R_0} \quad (2)$$

nazywany jest współczynnikiem nagrzania włókna pomiarowego.

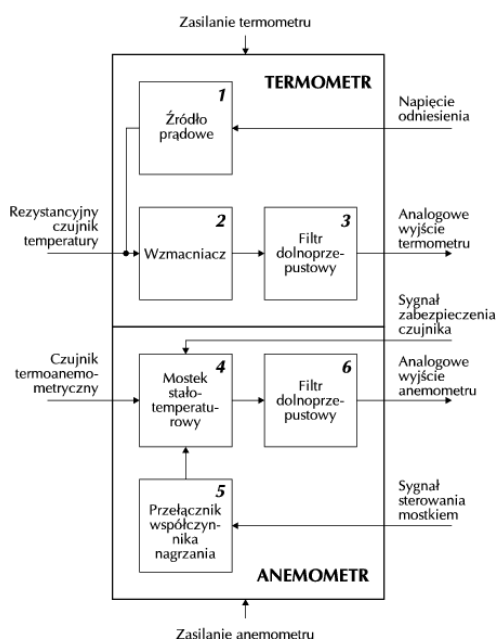
2. Charakterystyka modułu

Czterokanałowy, ośmiotorowy moduł stałotemperaturowo – stałoprądowy ATU 08 przeznaczony jest do prowadzenia precyzyjnych laboratoryjnych pomiarów prędkości i temperatury w przepływach powietrza. Zestaw pomiarowy składa się z kompletu czujników pomiarowych, obsadek czujników łączących czujniki z modułem, modułu pomiarowego i zewnętrznego zasilacza sieciowego. Moduł posiada wyjścia sygnałów analogowych z poszczególnych torów pomiarowych. Przeznaczony jest do współpracy z modułem przetworników analogowo - cyfrowych i komputerem PC lub z innym urządzeniem zewnętrznym z wejściami analogowymi.

Konfiguracja zestawu pomiarowego zależy od przeznaczenia i jest ustalana indywidualnie dla każdego systemu pomiarowego. Dotyczy to ilości kanałów i torów pomiarowych, ich parametrów, realizowanych funkcji oraz ilości i typu czujników pomiarowych. Czujniki pomiarowe mogą współpracować tylko z tym kanałem pomiarowym, do którego zostały przygotowane. Zmiana konfiguracji grozi uszkodzeniem czujnika.

Moduł pomiarowy pełni funkcję przetwornika sygnałów z czujników na napięciowe sygnały wyjściowe proporcjonalne do prędkości przepływu i temperatury badanego medium. Składa się z czterech kanałów pomiarowych. Każdy kanał posiada dwa tory pomiarowe A i B mogące realizować funkcję termometru stałoprądowego (CCT) lub termoanemometru stałotemperaturowego (CTA). Przykładowy schemat blokowy pojedynczego kanału pomiarowego realizującego funkcje CCT i CTA przedstawia rysunek 1.

Termometr pracuje w układzie stałoprądowego termometru rezystancyjnego (CCT). Czujnik pomiarowy zasilany jest prądem o stałej wartości ze źródła prądowego **1**. Napięcie na czujniku jest proporcjonalne do jego rezystancji, a więc również do badanej temperatury. Napięcie to jest wzmacniane we wzmacniaczu **2**, a następnie podawane do wyjścia modułu poprzez filtr dolnoprzepustowy **3**. Wartość prądu czujnika, wzmacnienie i częstotliwość graniczna (3 dB) filtracji jest indywidualnie dobrana dla każdego toru pomiarowego. Tor termometru może być także wykorzystany jako wzmacniacz do przetwarzania sygnałów z innych typów czujników pomiarowych lub jako termoanemometr stałoprądowy.



Rys. 1. Schemat blokowy pojedynczego kanału pomiarowego CCT i CTA

Termoanemometr stałotemperaturowy (CTA) pracuje w układzie mostkowym **4**. Stanowi on układ regulacji automatycznej zasilający czujnik takim prądem, aby w stanie nagrzania jego temperatura pozostawała na stałym, zadanym poziomie. Dzięki temu prąd czujnika jest funkcją prędkości przepływu. Poziom nagrzania czujnika jest stały, indywidualnie dobrany dla każdego toru pomiarowego. Istnieje możliwość wprowadzenia funkcji sterowania pracą układu stałotemperaturowego **5** za pomocą zewnętrznego sygnału cyfrowego. Sygnał ten zależnie od konfiguracji toru pomiarowego może być wykorzystany do włączania i wyłączenia termoanemometru lub do przełączania współczynnika nagrzania czujnika pomiarowego pomiędzy dwoma poziomami. Poziom niski sygnału sterującego (lub brak sygnału zewnętrznego) powoduje ustawienie wyższego współczynnika nagrzania (lub załączenie termoanemometru), poziom wysoki powoduje ustawienie niższego współczynnika nagrzania (lub wyłączenie termoanemometru). Sygnał sterujący jest wspólny dla obu torów A i B w kanale. Sygnał wyjściowy z układu stałotemperaturowego proporcjonalny do prądu czujnika podawany jest do wyjścia modułu poprzez wzmacniacz i filtr dolnoprzepustowy **6**. Parametry dynamiczne układu stałotemperaturowego i częstotliwość graniczna filtracji jest indywidualnie dobrana dla każdego toru pomiarowego.

Moduł zasilany jest z zewnętrznego zasilacza sieciowego o stabilizacji ciągłej. Zasilacz dostarcza stabilizowane napięcie stałe. W module zastosowano rozwiązania zabezpieczające czujniki przed przepaleniem w stanach nieustalonych w czasie załączania i wyłączenia.

3. Dane techniczne modułu (wersja standardowa)

Tor pomiarowy termometru CCT:

- tryb pracy - stałoprądowy
- zakres pomiarowy – 0 do 100 °C
- prąd czujnika - ustalony dla kanału
- wzmacnienie - ustalone dla kanału
- filtr wyjściowy - dolnoprzepustowy
- zakres wyjściowego napięcia pomiarowego – 0 do +10 V
- napięcie wyjściowe maksymalne – do +12V

Tor pomiarowy termoanemometru CTA:

- tryb pracy - stałotemperaturowy
- zakres pomiarowy – 0 do 100 m/s
- nagrzanie czujnika - ustalone dla kanału
- wejściowy sygnał sterujący - TTL/CMOS
- filtr wyjściowy - dolnoprzepustowy
- zakres wyjściowego napięcia pomiarowego – 0 do +10 V
- napięcie wyjściowe maksymalne – do +12V

Układ zasilania:

- zasilanie zewnętrzne - ~230 V, 50 Hz, ok. 20 W
- zasilanie wewnętrzne - +12 V, stabilizowane
- napięcie odniesienia - +5 V
- układ zabezpieczenia czujnika - w stanach nieustalonych

Wymiary modułu:

- szerokość - 250 mm
- wysokość - 55 mm
- głębokość - 175 mm

4. Opis złącz modułu

Złącza czujnika **PROBE** - gniazdo D-SUB 9 F:

- pin 1: ekran
- pin 2,6: czujnik toru pomiarowego B (anemometru lub termometru) - masa
- pin 3,7: czujnik toru pomiarowego B (anemometru lub termometru) - aktywny
- pin 4,8: czujnik toru pomiarowego A (anemometru lub termometru) - masa
- pin 5,9: czujnik toru pomiarowego A (anemometru lub termometru) - aktywny

Złącze sygnałów wyjściowych **OUTPUTS** - gniazdo D-SUB 25 F:

- pin 1: wyjście zasilania +12 V
- pin 2: wejście sygnału sterującego pracą termoanemometru - kanał 1
- pin 3: napięcie wyjściowe toru pomiarowego B - kanał 1
- pin 4: napięcie wyjściowe toru pomiarowego A - kanał 1
- pin 5: wejście sygnału sterującego pracą termoanemometru - kanał 2
- pin 6: napięcie wyjściowe toru pomiarowego B - kanał 2
- pin 7: napięcie wyjściowe toru pomiarowego A - kanał 2
- pin 8: wejście sygnału sterującego pracą termoanemometru - kanał 3
- pin 9: napięcie wyjściowe toru pomiarowego B - kanał 3
- pin 10: napięcie wyjściowe toru pomiarowego A - kanał 3
- pin 11: wejście sygnału sterującego pracą termoanemometru - kanał 4
- pin 12: napięcie wyjściowe toru pomiarowego B - kanał 4
- pin 13: napięcie wyjściowe toru pomiarowego A - kanał 4
- pin 14 do 25: masa

Złącze zasilacza **SUPPLY** - gniazdo D-SUB 9 M:

- pin 1 do 5: zasilanie +12 V
- pin 6 do 9: masa

5. Przygotowanie modułu do pracy

- Moduł ustawić na stanowisku pomiarowym.
- Wyłącznik zasilania ustawić w pozycji **OFF**. Podłączyć zasilacz sieciowy do złącza **SUPPLY** i przykręcić śruby mocujące.
- Do złącza **OUTPUTS** podłączyć odpowiedni kabel łączący moduł z wejściami zewnętrznymi przetworników analogowo - cyfrowych USB (lub innego urządzenia z

wejściami analogowymi) i przykręcić śruby mocujące. Moduł przetworników podłączyć kablem USB do komputera PC. Należy zwrócić uwagę na dokładne i pewne podłączenie kabli. Podczas podłączania kabla komputer powinien być wyłączony.

- Obsadki czujników zamocować w odpowiednich statywach w badanym obszarze pomiarowym. Wybrane czujniki umieścić w obsadkach zwracając uwagę na znak pozycjonujący czujnik i dokonać ich ustawienia względem badanego przepływu. Włókno czujnika oraz jego oś powinny być ustawione prostopadle do badanego wektora prędkości (dotyczy standardowych pomiarów czujnikiem jednowłóknowym). Złącza obsadek czujników (1, 2, 3, 4) podłączyć do odpowiednich złącz **PROBE** kanałów pomiarowych (1, 2, 3, 4) modułu i przykręcić śruby mocujące. Należy pamiętać o zachowaniu zgodności numeracji kanałów i czujników w kanałach.
- Dla czujników złożonych wielowłóknowych stosuje się specjalne obsadki lub przejściówki umożliwiające podłączenie czujnika do kilku kanałów pomiarowych. Należy pamiętać o zachowaniu zgodności numeracji kanałów i czujników w kanałach.
- Nieprawidłowe podłączenie czujników może doprowadzić do ich uszkodzenia.
- Zasilacz umieścić w gniazdku sieciowym, najlepiej w listwie wyposażonej w filtr sieciowy i wyłącznik. Załączyć listwę.
- Załączyć komputer współpracujący i uruchomić odpowiedni program. Załączyć moduł ATU 08 ustawiając wyłącznik w pozycji **ON**. Włączenie modułu ATU 08 sygnalizowane jest świeceniem diod **LED**. Diody sygnalizują stan torów termooanemometrycznych. Kolor zielony oznacza termooanemometr wyłączony lub brak czujnika, kolor czerwony oznacza pracę termooanemometru. Zestaw pomiarowy jest przygotowany do pracy.
- Pomiaru należy prowadzić zgodnie z instrukcją programu pomiarowego, stanowiącą odrębny dokument.
- Wymiana czujników lub rozłączanie złącz modułu dopuszczalne jest wyłącznie przy wyłączonym zasilaniu.
- Wyłączenie modułu następuje poprzez ustawienie wyłącznika w pozycji **OFF**. Podczas dłuższych przerw w pracy należy wyłączyć również zasilacz sieciowy poprzez wyłączenie listwy lub wyjęcie zasilacza z gniazdka sieciowego.

Należy pamiętać, aby masa wszystkich urządzeń współpracujących była podłączona do tego samego potencjału (zerowania). Należy tu przestrzegać ogólnie przyjętych reguł postępowania, aby nie dopuścić do uszkodzenia aparatury lub porażenia prądem.

6. Wzorcowanie systemu pomiarowego

Ponieważ zastosowane metody pomiarowe nie są bezwzględne (należą do metod pośrednich), niezbędnym warunkiem prowadzenia pomiarów jest wzorcowanie zestawu pomiarowego. Wzorcowania toru termooanemometrycznego można dokonać w tunelu aerodynamicznym, natomiast wzorcowania toru termometru w regulowanym termostacie z przepływem powietrza. Wzorcowanie polega na wyznaczeniu zależności sygnału wyjściowego z modułu od wielkości mierzonej w zadanym zakresie zmienności. Wzorcowanie przeprowadza się dla każdego czujnika oddzielnie, każdy czujnik w danym kanale pomiarowym posiada indywidualną charakterystykę metrologiczną. Podczas wzorcowania należy zadbać, aby warunki wzorcowania były zbliżone do panujących na stanowisku badawczym. W przypadku termooanemometru należy uwzględnić kompensację temperaturową. Jeżeli badany przepływ jest zanieczyszczony, może następować zmiana charakterystyki toru termooanemometrycznego w czasie, związana z osiadaniem zanieczyszczeń na włóknie pomiarowym. W takim

przypadku należy okresowo ostrożnie wypłukać włókno czujnika w alkoholu etylowym. Wskazane jest także okresowe sprawdzanie charakterystyki termooanemometru.

7. Wyznaczanie temperatury i prędkości przepływu dla pojedynczego włókna czujnika

Pomiar temperatury i prędkości przepływu medium polega na wyznaczeniu tych wielkości z napięć wyjściowych z toru termometru (CCT) i termooanemometru (CTA), przy uwzględnieniu charakterystyk czujników i parametrów wzorcowania. Jeżeli napięcia te są wprowadzane do komputera poprzez kartę przetwornika analogowo-cyfrowego, to temperatura i prędkość przepływu medium mogą być wyznaczone przez komputer na podstawie podanych niżej algorytmów.

7.1 Wyznaczanie temperatury medium dla toru CCT

W celu wyznaczenia temperatury medium należy odczytać napięcie $U(T)$ z toru termometru (CCT), a następnie obliczyć temperaturę medium T zgodnie z zależnością:

$$T = \frac{U(T) - U(T_0)}{\alpha U(T_0)} + T_0, \quad (3)$$

gdzie:

$U(T_0)$ - napięcie wyjściowe toru termometru w temperaturze wzorcowania T_0 ,

α - temperaturowy współczynnik rezystancji dla materiału elementu czynnego termometru w temperaturze wzorcowania T_0 .

7.2 Wyznaczanie prędkości przepływu medium dla toru CTA

W celu wyznaczenia prędkości przepływu medium należy odczytać napięcie $U(V)$ z toru termooanemometru (CTA), a następnie obliczyć prędkość przepływu medium V zgodnie z zależnością:

$$V = \Gamma \left\{ U(V) \sqrt{\frac{T_s - T_0}{T_s - T}} \right\}, \quad (4)$$

gdzie:

Γ - funkcja zależności prędkości przepływu od napięcia wyjściowego toru termooanemometru w temperaturze wzorcowania T_0 (charakterystyka wzorcowania czujnika),

T_s - temperatura nagrzanego włókna termooanemometru,

T - wyznaczona temperatura badanego medium.

Charakterystyka czujnika (funkcja Γ) w temperaturze wzorcowania T_0 oraz temperatura T_s jest indywidualna dla każdego czujnika. Człon pierwiastkowy jest członem kompensacji temperaturowej charakterystyki czujnika.

8. Uwagi końcowe

Dla czujników wielowłóknowych mierzone wielkości takie jak składowe wektora prędkości wyznaczone są w oparciu o specjalizowane algorytmy pomiarowe.

Ośmiotorowy moduł stałotemperaturowo - stałoprądowy ATU 08 umożliwia realizację specjalizowanych komputerowych systemów pomiarowych przeznaczonych do pomiaru prędkości przepływu i temperatury powietrza i innych gazów do zastosowań laboratoryjnych, technicznych i przemysłowych. W systemach pomiarowych stosowane są czujniki *hot-wire* o miniaturowych rozmiarach elementu czynnego. Aparatura taka umożliwia w szczególności następujące specjalizowane pomiary termooanemometryczne:

- nieinwazyjne, wielopunktowe pomiary prędkości przepływu i temperatury,
- pomiary pól prędkości i temperatury,
- pomiary składowych wektora prędkości przepływu,
- pomiary z detekcją zwrotu wektora prędkości,
- pomiary w przepływach nieizotermicznych,
- pomiary przepływów szybkozmiennych,
- pomiary intensywności turbulencji,
- pomiary w zakresie bardzo małych prędkości przepływu,
- pomiary w zakresie bardzo małych wydatków.

Moduł pomiarowy wraz z czujnikami stanowi precyzyjny instrument badawczy, posługiwanie się nim wymaga przestrzegania podstawowych reguł dotyczących procedury metrologicznej, instrukcji obsługi oraz ostrożnego obchodzenia się z czujnikami. Moduł jest skonstruowany w taki sposób, aby do minimum ograniczyć możliwość uszkodzenia czujników na drodze elektrycznej podczas załączania, wyłączenia i wymiany czujników. Czujniki termooanemometryczne są jednak elementami o bardzo delikatnej konstrukcji i z czasem mogą ulegać uszkodzeniu. Możliwa jest jednak ich regeneracja u producenta.

9. Warunki gwarancji

- Na wykonaną aparaturę producent udziela rocznej gwarancji od dnia odbioru.
- Gwarancja nie obejmuje czujników i innych elementów nietrwałych. Regeneracja i wzorcowanie czujników dokonywane są odpłatnie.
- Gwarancja nie obejmuje uszkodzeń mechanicznych i innych powstałych z winy użytkownika.
- Naprawy gwarancyjne i pogwarancyjne oraz regeneracja i wzorcowanie czujników dokonywane są po dostarczeniu kompletnego sprzętu do producenta. Dostarczenie i odbiór sprzętu odbywa się na koszt użytkownika.
- Z uwagi na prototypowy charakter aparatury producent zastrzega sobie prawo wprowadzania zmian konstrukcyjnych oraz zmiany niektórych parametrów. Producent nie bierze odpowiedzialności za ewentualne szkody lub inne negatywne skutki związane z eksploatacją aparatury.
- Eksploatacja aparatury powinna być prowadzona zgodnie z jej przeznaczeniem, instrukcją obsługi, zaleceniami producenta oraz odpowiednimi przepisami dotyczącymi eksploatacji aparatury naukowo - badawczej.

10. Konfiguracja torów pomiarowych dla przyrządu nr 0900

TERMOMETRY CCT								
kanał	1		2		3		4	
tor pomiarowy	A	B	A	B	A	B	A	B
prąd czujnika [mA]								
wzmocnienie sygnału								
częstotliwość graniczna [kHz]								
uwagi: numer wyjścia analogowego BNC								

TERMANEMOMETRY CTA								
kanał	1		2		3		4	
tor pomiarowy	A	B	A	B	A	B	A	B
sterowanie pracą mostka sygnałem cyfrowym	-	-	-	-				
rezystancja nagrzanego czujnika poziom wyższy [Ω]	11,6	11,6	11,6	11,6				
rezystancja nagrzanego czujnika poziom niższy [Ω]	-	-	-	-				
częstotliwość graniczna [kHz]	5	5	5	5				
uwagi: numer wyjścia analogowego BNC	1	2	3	4				

11. Konfiguracja czujników pomiarowych dla przyrządu nr 0900

CZUJNIKI POMIAROWE HOT-WIRE JEDNOWŁÓKNOWE								
kanał	1		2		3		4	
tor pomiarowy	A	B	A	B	A	B	A	B
typ czujnika	1V							
funkcja włókna	V _x							
identyfikacja wsporników								
ilość czujników	2							
uwagi: należy zachować zgodność numeracji złączy								

CZUJNIKI POMIAROWE HOT-WIRE DWUWŁÓKNOWE								
kanał	1		2		3		4	
tor pomiarowy	A	B	A	B	A	B	A	B
typ czujnika	2X							
funkcja włókna	V _x	V _y						
identyfikacja wsporników	strona							
	znaku							
ilość czujników	2							
uwagi: należy zachować zgodność numeracji złączy								

CZUJNIKI POMIAROWE HOT-WIRE TRÓJWŁÓKNOWE								
kanał	1		2		3		4	
tor pomiarowy	A	B	A	B	A	B	A	B
typ czujnika	3D							
funkcja włókna	V _x	V _y	V _z					
identyfikacja wsporników	red	blue	green					
ilość czujników	1							
uwagi: należy zachować zgodność numeracji złączy, osłona zsuwana na kabel								