

Piotr DOMAGAŁA

Stanisław DROBNIAK

Instytut Maszyn Ciepłych

Politechnika Częstochowska

METODA WIZUALIZACJI WARUNKOWEJ DLA SWOBODNYCH PRZEPŁYWÓW OSIOWO-SYMETRYCZNYCH

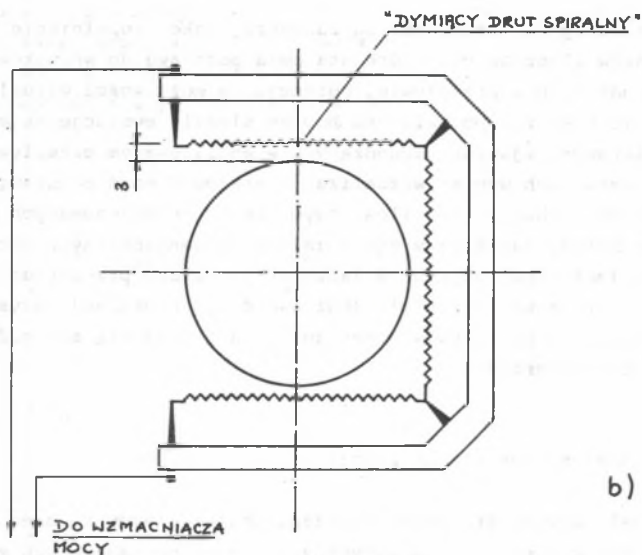
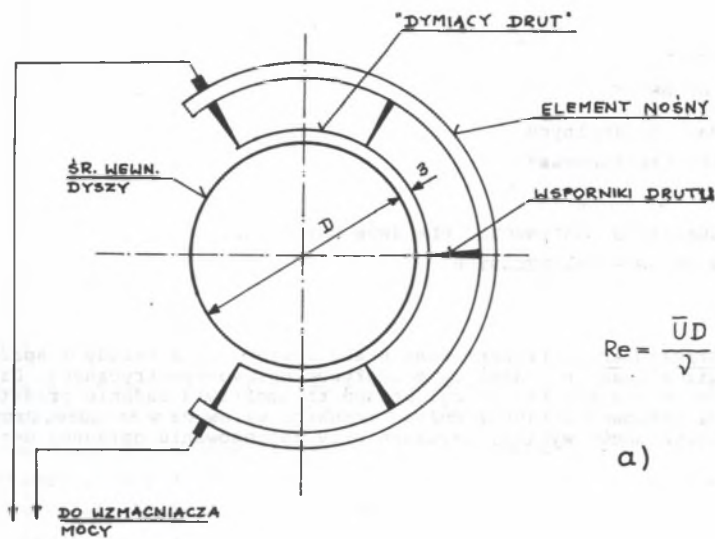
Streszczenie. Prezentowana praca zawiera opis metody i aparatury do wizualizacyjnej analizy przepływów osiowo-symetrycznych. Dzięki zastosowaniu synchronizacji metoda ta umożliwia badanie przestrzennej i czasowej ewolucji dużych struktur wirowych w strudze. Przytoczono przykładowe wyniki, uzyskane przy zastosowaniu opisanej metody.

WSTĘP

Badania wizualizacyjne traktowane są zazwyczaj jako uzupełnienie lub ilustracja pomiarów ilościowych, które stanowią podstawę do wnioskowania o procesach zachodzących w przepływie. Potencjalne możliwości wizualizacji są jednak znacznie większe, pozwala ona bowiem śledzić ewolucję skomplikowanych, trójwymiarowych zjawisk zachodzących w analizowanym przepływie, a nawet w pewnych warunkach wyniki wizualizacji stanowić mogą podstawę do wyciągania wniosków o charakterze ilościowym. Celem relacjonowanych badań było opracowanie metody łączącej w sobie zalety konwencjonalnych technik wizualizacyjnych (możliwość uzyskania zamrożonego obrazu przepływu) i procedur warunkowego próbkowania sygnału (możliwość synchronizacji uzyskanego obrazu z zachodzącymi w przepływie procesami), nadającej się szczególnie do badań struktur koherentnych.

OPIS PROPONOWANEJ METODY WIZUALIZACJI

Techniki wizualizacyjne stosowane w badaniach przepływów są obecnie intensywnie rozwijane w wielu specjalistycznych ośrodkach badawczych zarówno w kraju, jak i za granicą, a problemy z tym związane doczekały się już kilku monograficznych opracowań [1, 2, 3]. Jednym z ostatnich osiągnięć w tej dziedzinie jest technika "dymiącego drutu" (smoke - wire method) opracowana na początku lat siedemdziesiątych w IIT Chicago i rozwinięta następnie w [4, 5].



Rys. 1. Generator dymu

a) dla $Re < 2000$, b) dla $Re = 2000 \div 5000$

Fig. 1. Smoke generator

a) $Re < 2000$, b) $Re = 2000 \div 5000$

Zarówno metody konwencjonalne, jak i technika "dymiącego drutu", zastosowane w bezpośredni sposób do badania strug osiowo-symetrycznych, wykazują jednak szereg istotnych wad. W metodzie tradycyjnej na przykład czynnik kontrastujący wprowadzony jest do całej objętości przepływu, a pożądaną przekrojem wydziela się za pomocą tzw. "noża świetlnego", uzyskując dwuwymiarowy obraz przepływu [6]. Również i opracowane dotychczas odmiany techniki "dymiącego drutu" umożliwiają uzyskanie jedynie płaskiego obrazu przepływu [7].

W celu ujawnienia trójwymiarowego charakteru analizowanych struktur wybrano, po przeprowadzeniu szeregu prób, odmianę metody zaproponowanej przez Drukę oraz Nagiba [4], która charakteryzuje się umieszczeniem "dymiącego drutu" poza obszarem przepływu głównego (rys. 1). Cząstki dymu wytworzone przez impulsowe odparowanie mikroskopijnych par oleju zasysane są przez strugę tworząc otoczkę doskonale kontrastującą z przezroczystym wnętrzem strugi. Odpowiednie ukształtowanie drutu sprawia, że w odróżnieniu od metod omówionych poprzednio, możliwe jest uwidocznienie trójwymiarowego charakteru ewolucji struktur wirowych. Przykładowy obraz uwidocznionych w ten sposób struktur koherentnych pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowy obraz struktur koherentnych $Re = 2150$

Fig. 2. Exemplary coherent structure picture

Spośród kilku opracowań wariantów układu "smoke-wire" pokazano na rys. 1 szczegóły konstrukcyjne dwóch wersji generatora dymu dostosowanych do przepływów o liczbie $Re = <2000$ i $Re = 2000 \div 5000$, oznaczonych odpowiednio jako a) i b).

UKŁAD WARUNKOWEGO INICJOWANIA PROCESU WIZUALIZACJI

Analiza przepływów turbulentnych oparta jest najczęściej na hipotezie Reynoldsa, w myśl której rzeczywisty ruch płynu traktowany być może jako superpozycja ruchu średniego i fluktuacyjnego.

Zgodnie z tym rzeczywista wartość dowolnej, charakteryzującej przepływ wielkości fizycznej $A(x,t)$ przedstawiona być może w postaci [9]:

$$A(x,t) = \bar{A}(x) + a(x,t), \quad (1)$$

gdzie \bar{A} - jest wielkością średnią, zaś a - fluktuacyjną.

Ponieważ w omawianej klasie przepływów występują zjawiska okresowe (struktury koherentne), zatem wielkość $A(x,t)$ wyrażona być musi sumą:

$$A(x,t) = \bar{A}(x) + \tilde{A}(x,t) + a(x,t), \quad (2)$$

w której:

\bar{A} - składowa średnia,

a - składowa fluktuacyjna (turbulentna),

\tilde{A} - składowa periodyczna wynikająca z okresowego charakteru przepływu.

Konwencjonalne uśrednianie daje zawsze zerowe wartości obu składowych zmian:

$$\overline{\tilde{A}(t)} = 0 \quad \text{i} \quad \overline{a(t)} = 0$$

Jeśli jednak proces uśredniania prowadzić będziemy nie w całym okresie obserwacji (w sposób ciągły), lecz w ściśle określonych chwilach, zsynchronizowanych z procesem okresowym w przepływie, wówczas otrzymamy tzw. średnią grupową

$$\langle A(t) \rangle = \langle \bar{A} + \tilde{A}(t) \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{A}(t+iT) \right] + \bar{A}, \quad (3)$$

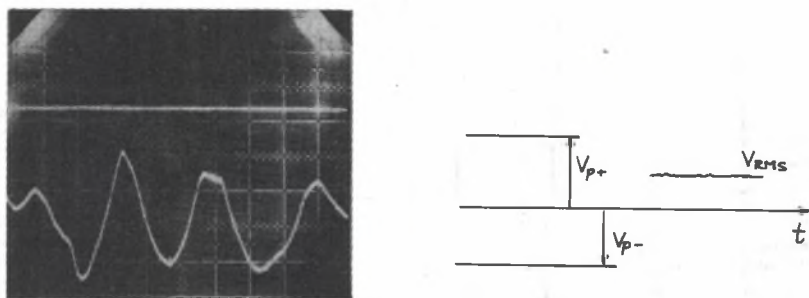
która przy odpowiednio dużym N nie zawiera składowej fluktuacyjnej. Oznacza to, że uśrednianiu poddawana jest nie cała realizacja, lecz jedynie te jej fragmenty, które uważane być mogą za pochodzące od zjawisk okresowych, a kryterium pozwalającym je wyróżnić, jest spełnienie określonego warunku. W rezultacie otrzymujemy tzw. średnią grupową $\langle A \rangle$, będącą wynikiem uśredniania zbioru wybranych próbek.

Istotnym zagadnieniem staje się wówczas wybór kryterium próbkowania, które oczywiście powinno być uzależnione od charakteru zjawisk zachodzących w przepływie. Należało zatem sformułować takie kryterium, które byłoby przydatne do śledzenia zjawisk periodycznych w strudze osiowo-symetrycznej.

Do oceny poprawności wybranego zespołu parametrów sygnału stanowiących kryterium próbkowania użyte zostały fotogramy wykonane w trakcie eksperymentu. Sygnałem, którego parametry analizowano, była składowa zmienna napięcia wyjściowego CTA z sondą odniesienia umieszczoną w osi badanego przepływu.

Obserwowane w strudze zorganizowane formy ruchu są rezultatem cyklicznie zachodzących procesów utraty stabilności prowadzących do znacznego wzrostu amplitudy sygnału. Osiągnięcie przez sygnał CTA odpowiednio dużej amplitudy może więc być spowodowane obecnością w okolicy sondy dużej struktury wirowejj.

Jak wynika z badań przeprowadzonych przez Bruuna [8], amplituda sygnału wzrasta wtedy do wartości rzędu $2\div 3 u'_{RMS}$. W trakcie badań okazało się jednak, iż nie jest to kryterium uniwersalne. W początkowym obszarze strugi ($x < 2d$), gdzie sygnał pochodzący od struktury koherentnych wyraźnie dominuje nad turbulentnym tłem, współczynnik szczytu sygnału^{*)} jest bliski jedności i zastosowanie kryterium Bruuna jest niemożliwe; nie dochodzi wówczas do zainicjowania procesu wizualizacji (rys. 3).



Rys. 3. Definicja współczynnika szczytu sygnału

$$k = \frac{V_P}{V_{RMS}}, \quad V_P - \text{szczytowa, chwilowa amplituda sygnału, } V_{RMS} - \text{skuteczna (RMS) wartość sygnału}$$

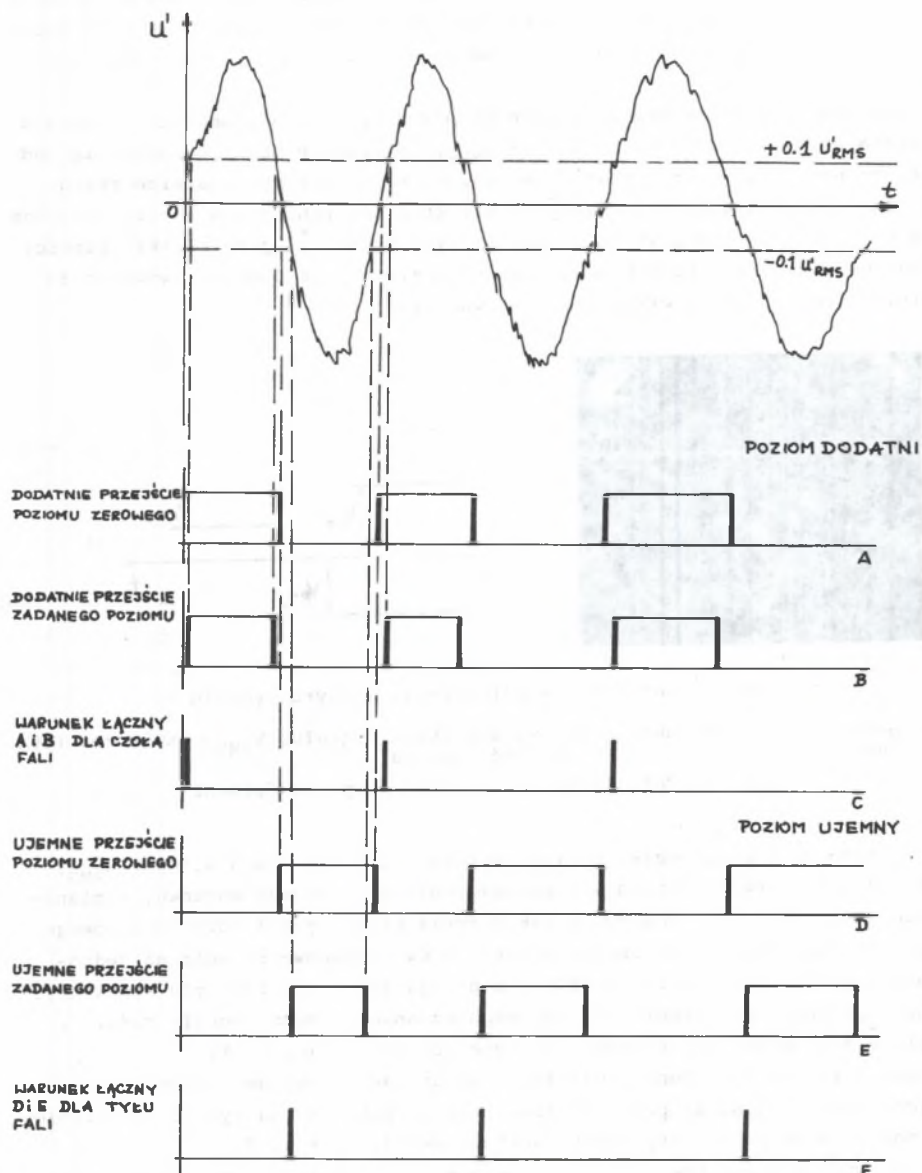
Fig. 3. Definition of signal top coefficient

W obszarze tym optymalny poziom zawiera się w granicach $0,1\div 0,2 u'_{RMS}$, przy czym konieczne okazało się wprowadzenie dodatkowego warunku, a mianowicie dodatniego lub ujemnego przekroczenia przez sygnał poziomu zerowego (rys. 4). Ustalone w ten sposób kryterium dwuwarunkowe pozwala na jednoznaczne powiązanie chwili inicjacji z przejściem czoła lub tyłu struktury. W dalszym obszarze strugi ($x > 2d$) współczynnik szczytu sygnału rośnie i możliwe jest wówczas zastosowanie kryterium Bruuna (rys. 5).

Schemat blokowy układu, realizującego opisane wyżej dwuwarunkowe, synchroniczne inicjowanie procesu wizualizacji, pokazano na rys. 6, a przebiegi napięć w charakterystycznych punktach układu na rys. 7.

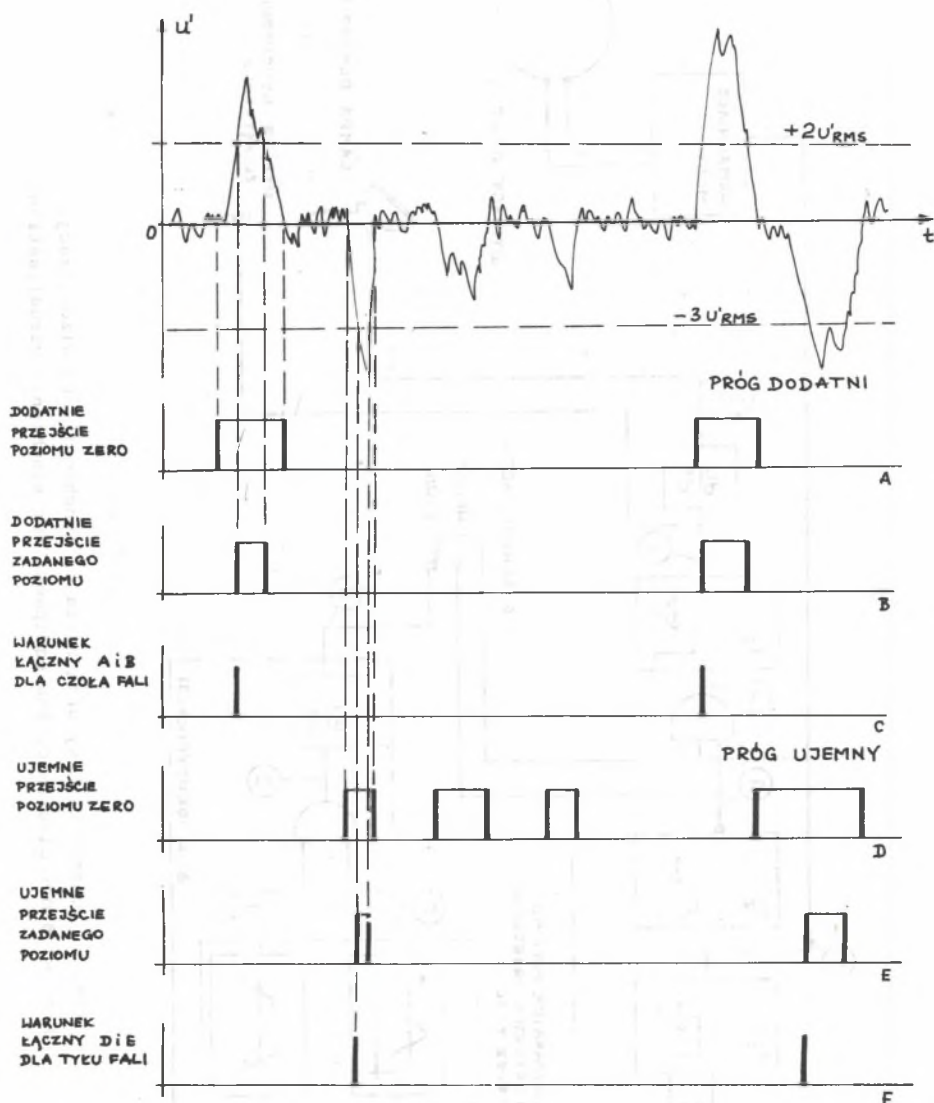
Jak wynika z rysunku, układ ten składa się z bloku realizującego badanie, czy sygnał ma odpowiednio duży poziom i polaryzację, zespołu trzech uniwbulatorów realizujących opóźnienia czasowe τ_1, τ_2, τ_3 , bramek logicznych AND oraz wzmacniacza mocy i układu wyzwalania lampy błyskowej.

^{*)} Współczynnik szczytu sygnału k - patrz rys. 3.



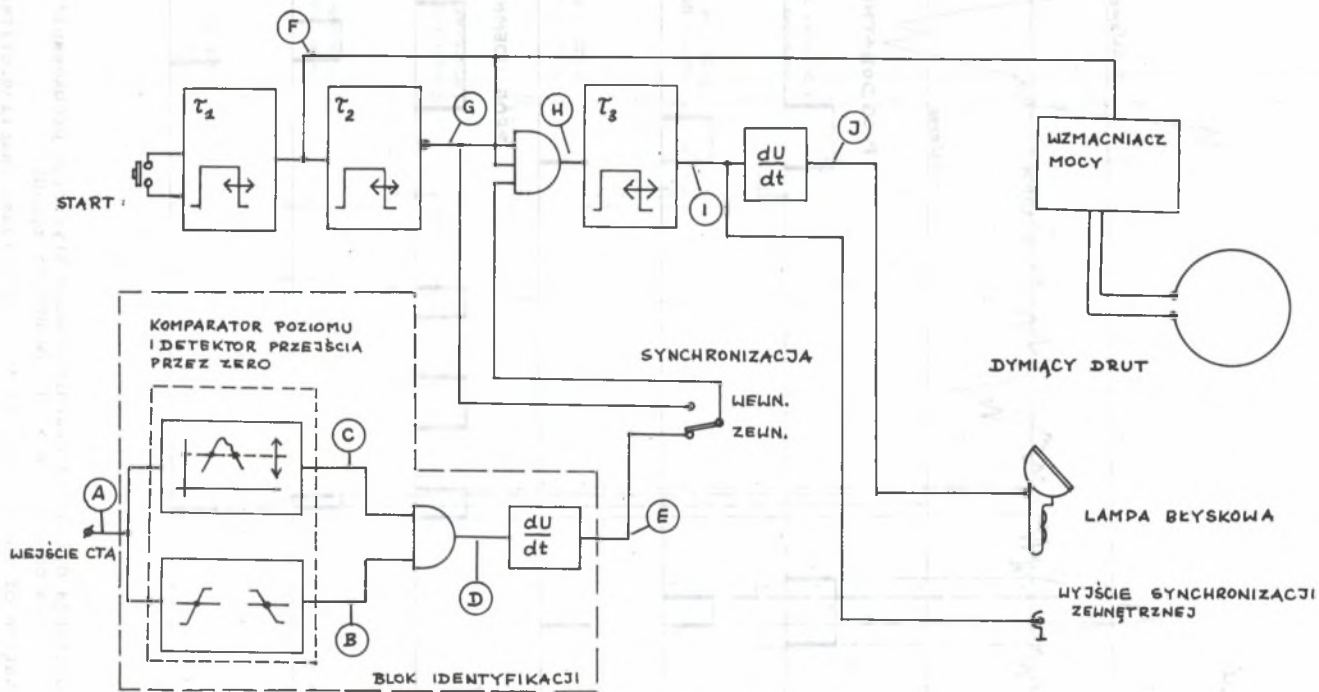
Rys. 4. Ilustracja działania dwuwarunkowego kryterium próbkowania dla obszaru $x < 2d$

Fig. 4. Presentation of the results of two conditional sampling criterion of the area $x < 2d$

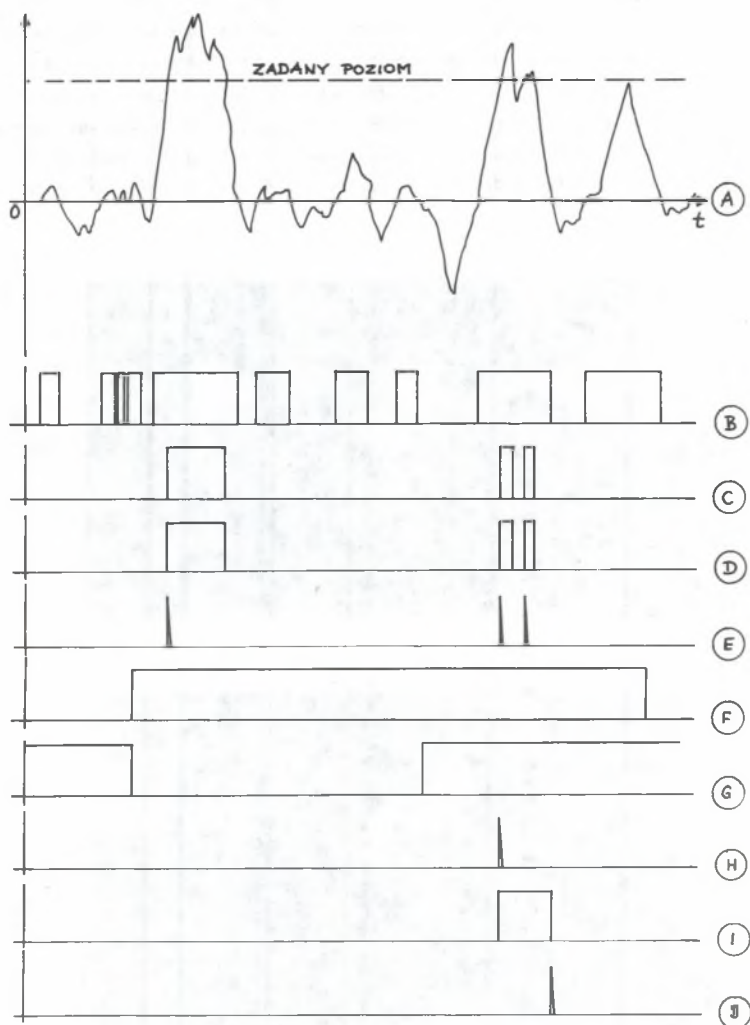


Rys. 5. Ilustracja działania dwuwarunkowego kryterium próbkowania dla obszaru $x > 2d$ (w uproszczeniu)

Fig. 5. Presentation of the results of two conditional sampling criterion of the area $x > 2d$



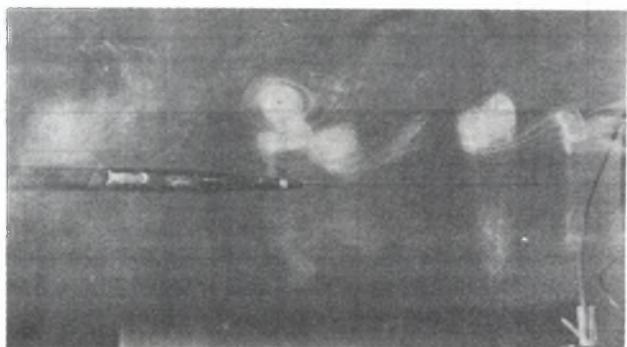
Rys. 6. Schemat blokowy urządzenia do synchronicznej wizualizacji
 Fig. 6. Block diagram of the equipment for synchronic visualisation



Rys. 7. Ilustracja działania układu wyzwalania warunkowego A÷J przebiegi napięć w charakterystycznych punktach układu

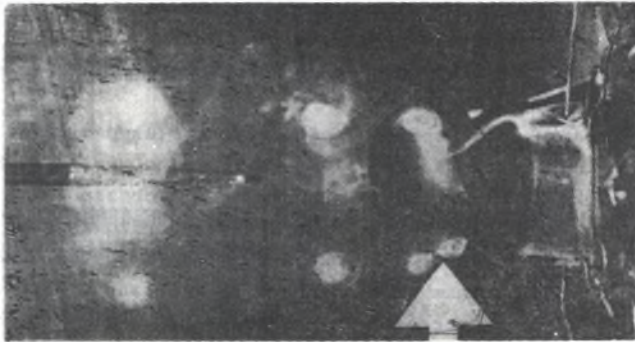
Fig. 7. Presentation of the work of a conditional execution system. Voltage transients in the characteristic system points

Po zainicjowaniu działania układu przyciskiem START załączony zostaje na czas τ_1 wzmacniacz mocy, który podgrzewa "dymiący drut". Jednocześnie zostaje załączony drugi uniwibrator, który na czas τ_2 blokuje bramkę na wejściu trzeciego uniwibratora. Ma to na celu zabezpieczenie lampy błyskowej, gdy dym generowany na "dymiącym drucie" nie ma jeszcze odpowiedniej gęstości. Po upływie czasu τ_2 bramka ta zostaje odblokowana. Jeśli teraz w przepływie pojawi się struktura koherentna, co stwierdza blok identyfikacji na podstawie warunków zadanych przez operatora, wówczas na jego wyjściu (punkt E) pojawia się impuls szpilkowy uruchamiający trzeci uniwibrator, który po upływie czasu τ_3 wyzwala lampę błyskową, umożliwiając uzyskanie fotogramu przepływu. Zastosowanie w układzie dodatkowego opóźnienia τ_3 ma na celu korekcję niedokładności ustawienia w przepływie sondy odniesienia,



Rys. 8. Przykład wizualizacji warunkowej w obszarze przepływu $x > 2d$. Moment ekspozycji zsynchronizowano ze zboczem dodatnim (narastające) sygnału CTA. Poziom wyzwalania ustalony był na wysokości $+2,5 V_{RMS}$. Sonda CTA znajduje się w obszarze parowania wirów

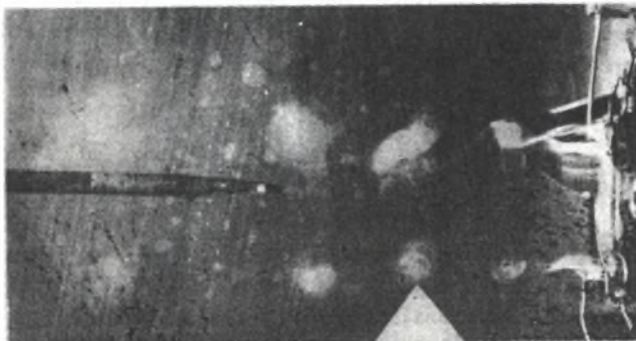
Fig. 8. An example of the conditional visualization in the flow area $x > 2d$. Exposition moment synchronized with the positive edge of the signal CTA



$$t_3 = 0$$



$$t_3 = 3,2 \text{ ms}$$



$$t_3 = 4,8 \text{ ms}$$

Rys. 9. Proces powstawania pierścienia wirowego

Kolejne fotografie uzyskano przy pomocy zwykłej kamery fotograficznej w odstępach kilkuminutowych. Zastosowanie synchronizacji i regulowanego opóźnienia ekspozycji (t_3) pozwala zaobserwować etapy tworzenia pierścienia wirowego

Fig. 9. The process of turbulent ring initiation

co umożliwia zwiększenie dokładności analizy. Lampa błyskowa, używana do oświetlania strugi, musi charakteryzować się krótkim czasem błysku, który powinien być rzędu $50 \mu\text{s}$.

Opisany wyżej układ może być używany również do warunkowego próbkowania sygnału w komputerowym systemie pomiarowym.

Wizualizacja warunkowa, oprócz aspektów poznawczych, służyć może do sprawdzania poprawności opracowanych kryteriów. Obrazują to rys. 8a i 8b, na których pokazano przykłady wizualizacji warunkowej dla obszaru $x > 2d$ przy poziomie wyzwalania $+2,5 u'_{\text{RMS}}$. Moment błysku zsynchronizowany był z dodatnim zboczem sygnału CTA (rys. 5) z korekcją fazy $\zeta_3 = 120 \mu\text{s}$. Podkreślić należy, iż sonda odniesienia umieszczona była w obszarze parowania wirów, gdzie warunki detekcji są szczególnie niekorzystne, a mimo to uzyskane rezultaty są zupełnie zadowalające. Możliwości wizualizacji synchronicznej ilustruje również rys. 9, przedstawiający kolejne etapy procesu powstawania pierścienia wirowego. Poszczególne zdjęcia otrzymano zwiększając czas opóźnienia błysku względem czoła struktury wirowej (korekcja ζ_3). Strzałki na fotogramach określają położenie dwóch elementarnych wirów (rys. 9a i b), które zlewając się ze sobą tworzą pojedynczy pierścień wirowy. Przedstawiona tutaj sekwencja fotogramów obrazuje więc ewolucję struktur koherentnych bez konieczności używania szybkiej kamery filmowej.

WNIOSKI

Przedstawiona w pracy metoda wizualizacji warunkowej wykazała swą pełną przydatność do analizy trójwymiarowych struktur koherentnych w strugach swobodnych. Opracowane w trakcie badań dwuwarunkowe kryterium inicjacji procesu wizualizacji okazało się prawidłowo zaprojektowane, co potwierdzają zaprezentowane w pracy fotogramy. Zgromadzony materiał pozwala stwierdzić, że metoda wizualizacji warunkowej stanowić może cenne narzędzie badawcze w analizie dynamiki dużych struktur wirowych.

LITERATURA

- [1] Merkirch W.: Flow Visualization, Academic Press, 1974.
- [2] Illustrated experiments in fluid mechanics, MIT Press, 1972.
- [3] Reznicek R.: Visualizace Proudění, Academia Praha, 1972.
- [4] Drubka R.E., Nagib H.M.: Instabilities in Near Field of Turbulent Jets and Their Dependence on Initial Conditions and Reynolds Number AFOSR-TR-92, Chicago IIT, 1982.
- [5] Corke T., Koga D., Drubka R.E., Nagib H.M.: A New Technique for Introducing Controlled Sheets of Smoke Streaklines in Wind Tunnels, 77 CH 1251-8 AES, 1977.
- [6] Crow S.C., Champagne F.H.: Orderly structures in Jet Turbulence, J.F.M., vol 48, 1971.

- [7] Popiel Cz.O.: II Seminarium Podsekcji Turbulencji Komitetu Mechaniki PAN, Poznań 1984 (materiał niepublikowany).
- [8] Bruun H.H.: A Time - domain analysis of the Large Scale Flow Structure in a Circular Jet, J.F.M., vol. 83, 1977.
- [9] Elsner J.W.: Turbulencja przepływów. PWN, Warszawa (praca złożona do druku).

МЕТОД ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ СВОБОДНЫХ ОСЕССИМЕТРИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Р е з ю м е

В работе представляется новый вид метода визуальных испытаний. Метод делает возможным анализ пространственной эволюции структуры струи. Приведены результаты применения описываемого метода в испытаниях свободных осесимметрических течений.

A CONDITIONAL VISUALISATION METHOD FOR FREE AXISYMMETRIC FLOWS

S u m m a r y

The paper presents a visualisation method for free axisymmetric flows which enables the analysis of spatial and temporal evolution of large-scale vortex structure.