

Metodyka analizy wzorcowych przepływów wykorzystywanych w badaniach własności anemometrycznych przyrządów pomiarowych

The method of analysis of standard flows used in researches of the anemometric measuring system properties



*Dr inż. Paweł Jamróz**



*Dr inż. Katarzyna Socha**



*Mgr inż. Maciej Bujalski**



*Prof. dr hab. inż. Paweł Ligęza**



*Dr inż. Elżbieta Poleszczyk**

Treść: W artykule przedstawiono metodę i wyniki analizy wzorcowego przepływu do testowania właściwości dynamicznych anemometrycznych przyrządów wentylacyjnych, na przykładzie modułu wymuszeń dynamicznych umieszczonego w tunelu aerodynamicznym. W metodzie analizy przepływu wykorzystano techniki pomiarowe związane z termoanemometrią włóknową oraz cyfrową anemometrią obrazową PIV. Zwrócono uwagę na problem stosowania przepływów jako sygnałów wzorcowych w celu określania charakterystyk statycznych oraz dynamicznych różnego typu anemometrów.

Abstract: This paper presents the method and the results of analysis of the standard flows used in researches of anemometric measuring systems properties. The method was presented on the basis of the nonstationary flow generated by the dynamic flow generator, which was a part of the wind tunnel. To describe the main features of the standard flow, several anemometric measurement techniques have been used, such as: hot-wire anemometry and the particle image velocimetry. Finally, the authors mentioned a particular problem related to the utilization of standard flows to determine the static and dynamic characteristics of different kinds of anemometers.

Słowa kluczowe:

przepływ wzorcowy, anemometryczne systemy pomiarowe, termoanemometria

Key words:

standardized flow, anemometric measuring system, hot-wire anemometer

*) Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie

1. Wprowadzenie

Do najpopularniejszych metod pomiaru prędkości przepływu powietrza w systemach wentylacyjnych, takich obiektów jak: wyrobiska kopalniane, tunele, obiekty budowlane, należą: anemometria skrzydełkowa, ultradźwiękowa i termoanemometria [8]. Rozwiązania takie stosowane są na całym świecie, a przyrządy wykorzystujące te techniki pomiaru produkowane są przez uznanych producentów aparatury metrologicznej. Wymienione metody znajdują również zastosowanie w aerologii górniczej, na potrzeby której produkuje się specjalne anemometry w wykonaniach iskrobezpiecznych przystosowane do pracy w ekstremalnych warunkach środowiskowych, związanych z dużym zapyleniem, zmienną wilgotnością i temperaturą. Równocześnie prowadzone są badania poświęcone własnościom metrologicznym takich przyrządów. Prace badawcze wiążą się z analizowaniem właściwości metrologicznych tych urządzeń, badaniami charakterystyk statycznych i dynamicznych, określaniem niepewności pomiarów, badaniem wpływu zmiennych parametrów przepływającego medium na charakterystyki przyrządów oraz nad stabilnością czasową charakterystyk statycznych. Wyniki prowadzonych badań wykorzystywane są do opracowywania nowych konstrukcji przyrządów i procedur pomiarowych pozwalających na minimalizowanie wpływu zewnętrznych czynników zwiększających niepewność, z jaką wykonywane są pomiary prędkości przepływu medium.

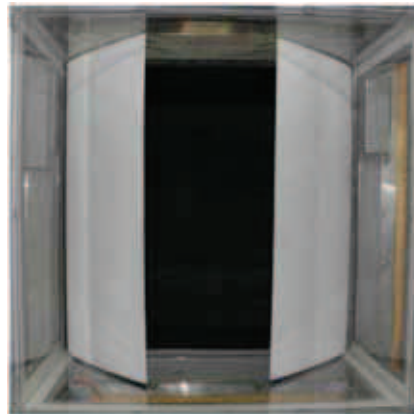
Podstawowe źródła niepewności w pomiarach prędkości przepływu powietrza w wyrobiskach kopalnianych związane są zwykle z własnościami stosowanej aparatury pomiarowej oraz samą techniką wykonywania pomiarów. Przykładowo, w pomiarach średniej prędkości przepływu z wykorzystaniem metody trawersu ciągłego, pośród rozpatrywanych źródeł niepewności znajdują się między innymi: trajektorie trawersu ciągłego, prędkość wykonywania trawersu oraz fluktuacje mierzonej prędkości [4]. Czynniki te powiązane są ściśle z zagadnieniem dynamiki przyrządu pomiarowego, którego inercja powoduje, że zakończenie pomiaru przed wyrównaniem się warunków otoczenia reprezentowanych przez wielkość mierzoną z odpowiedzią przyrządu pomiarowego wprowadza do pomiaru dodatkowy składnik niepewności nazywany błędem dynamicznym. Zagadnienie wpływu błędu dynamicznego w kopalnianych pomiarach prędkości powietrza poruszane zostało między innymi w [2, 3, 5, 6]. W każdym z tych przypadków kluczowe było pytanie czy dane urządzenie pomiarowe nadąża za zmianami sygnału mierzonego i jaki wpływ na wynik pomiaru będzie miała chociażby znikoma inercja wykorzystywanego czujnika.

2. Stanowisko pomiarowe

Z uwagi na duże znaczenie problematyki związanej z dynamiką systemów pomiarowych i jej wpływem na dokładność wykonywanych pomiarów, konieczne jest analizowanie własności dynamicznych każdego nowo opracowywanego przyrządu pomiarowego. Określenie jego własności dynamicznych umożliwia jego świadome używanie w różnych aplikacjach pomiarowych, a także właściwą interpretację wyników, uzyskiwanych za jego pośrednictwem. W przypadku przyrządów pomiarowych do pomiaru prędkości przepływu, badanie własności dynamicznych wiąże się z koniecznością generowania ściśle określonych, periodycznych fluktuacji prędkości. Dla tego typu stanowisk konieczne jest określenie metodyki badań generowanych przepływów testowych. Metodologia taka przedstawiona zostanie na przykładzie tunelu aerodynamicznego [1] wyposażonego w moduł wymuszeń dynamicznych.

2.1. Moduł wymuszeń dynamicznych

Generowanie zmiennego w czasie zaburzenia prędkości polega na cyklicznym przysyłaniu wlotu powietrza do komory pomiarowej przez przysłony (rysunek 1) zamontowane na bocznych ścianach tunelu aerodynamicznego. Przysyłanie takie powoduje lokalne spiętrzenie strugi powietrza i chwilowy wzrost wartości prędkości. W wyniku takiej periodycznej pracy układu zaburzającego powstaje przepływ okresowy.



Rys. 1. Moduł wymuszeń dynamicznych
Fig. 1. Module of dynamic extortion

Tak wygenerowana struga powietrza musi zostać przebadana w celu dokładnego określenia jej parametrów w całej objętości. Pozwala to na wyselekcjonowanie efektywnego przekroju pomiarowego, w którym dla kolejnych wybranych chwil czasowych profile prędkości są maksymalnie płaskie. Konieczne jest też określenie okresowości tego sygnału i jego rodzaju, tj. dąży się do tego, aby sygnał prędkości generowany przez stanowisko pomiarowe wykazywał cechy sygnału deterministycznego z jak najmniejszą zawartością losowości.

2.2. Aparatura pomiarowa

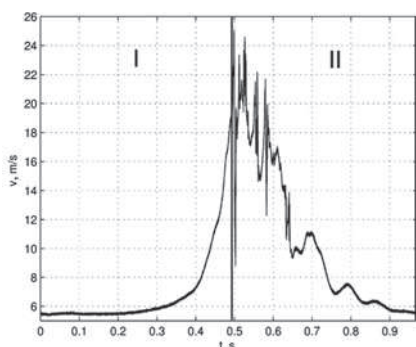
W przypadku konieczności kompleksowego określenia cech przepływu związanych z jego prędkością, naturalnym staje się wybór termoanemometrycznej aparatury pomiarowej jako narzędzia pomiarowego. Ma to związek z unikalnymi cechami termoanemometrów wykorzystujących cienkie włókna pomiarowe pozwalające wykonywać pomiary sygnałów, w których występują składowe o wysokich częstotliwościach. Termoanemometry takie wykorzystano między innymi jako wzorce odniesienia w badaniach metod wyznaczania własności dynamicznych anemometrycznych czujników termistorowych i napyłanych wykorzystywanych do pomiaru niskich prędkości [6]. Z uwagi na sposób realizacji zmiennego wymuszenia dynamicznego na badanym stanowisku, konieczne było dodatkowe określenie kierunku przepływu. Dlatego też w badaniach wykorzystano dodatkowo trójwłóknowe sondy termoanemometryczne wytwarzane w IMG PAN. W celu jakościowego scharakteryzowania pola prędkości za modułem wymuszeń dynamicznych, w rejonie gdzie będą testowane własności dynamiczne wentylacyjnych przyrządów pomiarowych, zastosowano metodę cyfrowej anemometrii obrazowej PIV [7]. Pomiar tą techniką polega na wprowadzeniu do badanego przepływu cząstek posiewowych, które odzwierciedlają ruch płynu. Zastosowano cząsteczki oleju (DEHS), których średnica wynosiła około 1 μm. Obszar pomiarowy został oświetlony światłem generowanym przez różnicowy podwójny impulsowy lasera Nd:YAG o energii 220 mJ na impuls. Grubość noża wynosiła około 1 mm. Ruch cząstek w płaszczyźnie lasera w poszczególnych chwilach czasowych

był rejestrowany za pomocą jednej kamery sCMOS, o rozdzielczości 2560x2100 pikseli. Rejestrowano 250 cyfrowych obrazów w trybie podwójnej klatki z częstotliwością 10 Hz. Metodami korelacji obrazu można wyznaczyć przesunięcie cząstek pomiędzy dwoma klatkami. Znając czas pomiędzy ekspozycjami otrzymuje się pole prędkości analizowanego obszaru. Zastosowana konfiguracja PIV pozwoliła na otrzymanie wektorowych pól prędkości o rozdzielczości ok. 2x2 mm.

3. Analiza własności przepływu generowanego przez moduł wymuszeń dynamicznych

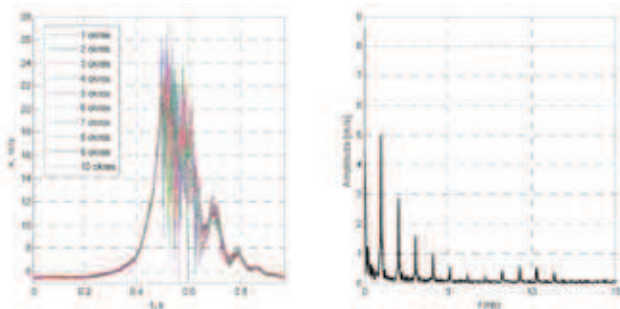
3.1. Sygnał wymuszenia dynamicznego

W pierwszym etapie badań skupiono się na analizie sygnału wymuszenia dynamicznego, jego powtarzalności i cechach związanych z okresowością. W tym celu wykonano pomiary z użyciem jednowłóknowej sondy termooanemometrycznej, z włóknem o średnicy 5 μm ustawionej w komorze pomiarowej w osi tunelu aerodynamicznego. W trakcie generowania przepływu zmiennego wykonano pomiary z częstotliwością 10 kHz. Przykładowy jeden okres wymuszenia dynamicznego zaprezentowano na rysunku 2. Wyróżnić można w nim charakterystyczne fragmenty sygnału prędkości przepływu. W pierwszym z nich (I), w którym przesłona generatora jest zamykana następuje narastanie prędkości, aż do osiągnięcia maksimum. W strefie tej sygnał charakteryzuje się niskim sturbulizowaniem. W drugim przedziale czasowym (II) następuje otwieranie przesłony, a wartość prędkości zmniejsza się. W sygnale prędkości występują gwałtowne stany dynamiczne świadczące o wysokim stopniu sturbulizowania przepływu.



Rys. 2. Jeden okres realizacji procesu wymuszenia dynamicznego
Fig. 2. One period of the dynamic extortion process

W celu określenia powtarzalności generowanych sygnałów porównano ze sobą ciąg pojedynczych okresów realizowanego wymuszenia dynamicznego. Dziesięć kolejnych realizacji procesu nałożonych na siebie przedstawiono na rysunku 3 wraz z ich analizą częstotliwościową.



Rys. 3. Powtarzalność i okresowość sygnału wymuszenia dynamicznego

Fig. 3. Repeatability and periodicity of the dynamic extortion signal

Wykonane zestawienie pokazuje, że w przedziale czasu od 0 do 0,45 s, w którym następuje zamykanie przesłony modułu wymuszeń dynamicznych, występuje bardzo dobra powtarzalność realizowanego wymuszenia z maksymalną różnicą między dwoma skrajnymi realizacjami na poziomie 0,25 m/s. W przedziale czasu 0,45 do 0,65 s (początkowa faza otwarcia przesłony wymuszeń dynamicznych) zaobserwowany sygnał prędkości charakteryzuje się losowością i brakiem powtarzalności. W kolejnym fragmencie charakterystyki w przedziale czasu 0,65 do 0,85 s, w którym następuje środkowa faza otwierania przysłony, pomimo znacznych fluktuacji powtarzalność sygnału rośnie, a różnice między skrajnymi przebiegami nie przekraczają 2 m/s. W ostatnim etapie otwierania przesłony w przedziale czasu od 0,85 do 0,97 s fluktuacje prędkości przepływu wygasają, a powtarzalność między kolejnymi okresami wzrasta do poziomu zaobserwowanego w przypadku zamykania przesłony modułu wymuszeń dynamicznych.

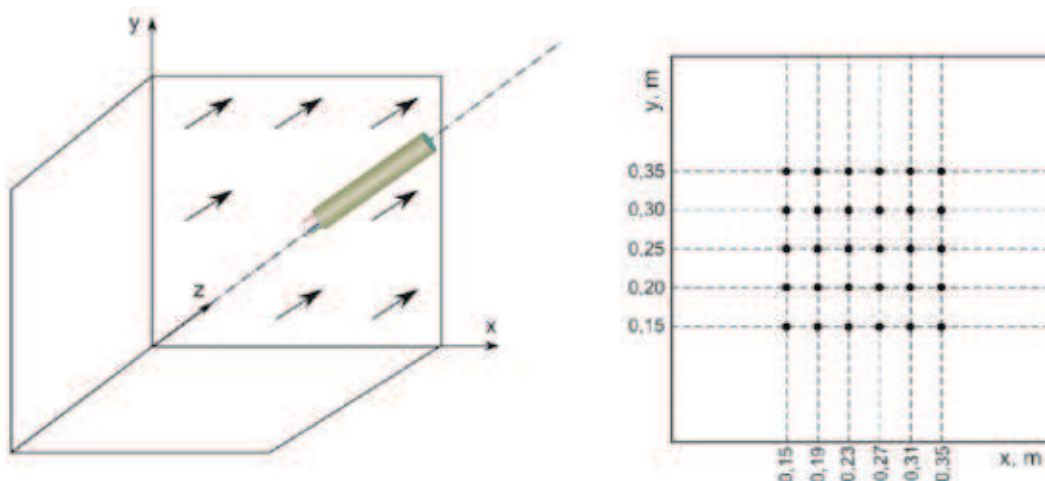
Przeprowadzona analiza częstotliwościowa na wybranym fragmencie sygnału (rysunek 3) oprócz częstotliwości podstawowej 1,03 Hz wykazała istnienie wielu składowych o istotnych amplitudach w zakresie częstotliwości do 15 Hz. Składowe te związane są z dodatkowymi fluktuacjami nałożonymi na częstotliwość główną sygnału i wynikają ze zjawisk przepływowych i sposobu realizacji wymuszenia dynamicznego (drżania generatora).

3.2. Efektywne pomiarowe pole przekroju

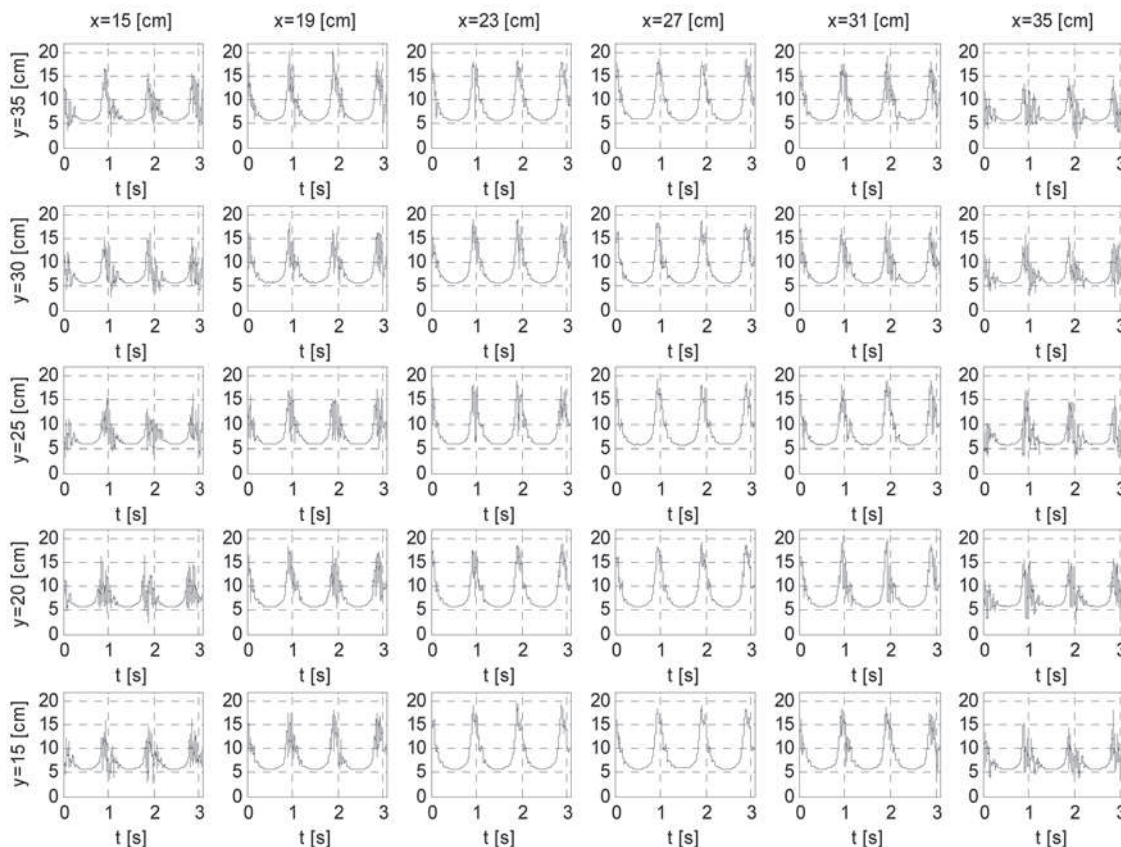
W celu określenia efektywnego pola przekroju, w którym mogą być przeprowadzone pomiary, wykonano eksperyment z wykorzystaniem trójwłóknowej sondy termooanemometrycznej. Sonda ta była umieszczana w kolejnych punktach przekroju poprzecznego komory pomiarowej tunelu aerodynamicznego w odległości 0,5 m od modułu wymuszeń dynamicznych, tak jak to zostało przedstawione na rysunku 4. Dodatkowo wykorzystana została druga sonda, umieszczona stacjonarnie w jednym punkcie, której odpowiedź na zmienny sygnał prędkości wykorzystany został do synchronizacji uzyskanych wyników pomiarowych z różnych punktów.

W pierwszym etapie badań wykonano rejestrację kilku okresów sygnału wymuszenia dynamicznego w każdym z punktów. Wyniki eksperymentu przedstawiającego przebiegi sygnałów modułu prędkości w każdym z punktów pokazane zostały na rysunku 5. Analiza uzyskanych wyników pomiarowych wykazała istnienie obszaru, w którym realizowane przepływy oznaczają się dużym stopniem podobieństwa. W miarę zbliżania się do granic obszaru pomiarowego, w rejestrowanych sygnałach prędkości następuje poszerzenie przedziałów czasowych, w których sygnał nacechowany jest losowością i brakiem powtarzalności.

Na rysunkach 6 - 8 przedstawiono wybrane trzy reprezentatywne chwile czasowe, dla których przedstawiono wyniki pomiaru modułu i kierunku wektora prędkości. Moduł wektora prędkości przedstawiono w skali barwnej z wyszczególnieniem izotach w całym obszarze pomiarowym, natomiast wektory prędkości zaczepione zostały w punktach pomiarowych, a układ współrzędnych transponowany został do pozycji pokazanej na rysunku 4. Zabieg ten dał możliwość lepszej obserwacji wpływu generatora wymuszeń dynamicznych na kierunek przepływu w komorze pomiarowej. W przedziale czasowym odpowiadającym zamykaniu przesłony generatora wymuszeń dynamicznych obraz modułu wektora prędkości jest jednolity (rysunek 6). Zmiany prędkości w tym przedziale następują w tych samych chwilach czasowych niezależnie od wybranego punktu. W całej przestrzeni pomiarowej zachowany jest kierunek przepływu, równoległy do osi komory pomiarowej tunelu aerodynamicznego. Brak chwilowych



Rys. 4. Ustawienie sondy trójwłókowej w stosunku do dominującej składowej przepływu
Fig. 4. Placement of the three-fiber probe in relation to the dominant component of the flow



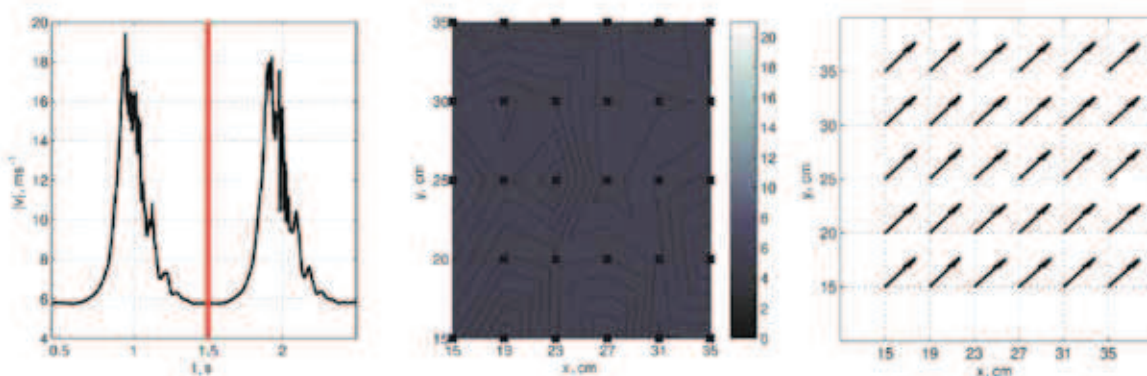
Rys. 5. Sygnał modułu prędkości w różnych punktach przekroju pomiarowego
Fig. 5. Signal of the velocity module in different benchmarks of gauging section

zmian kierunku przepływu świadczy o jego niskim stopniu sturbulizowania.

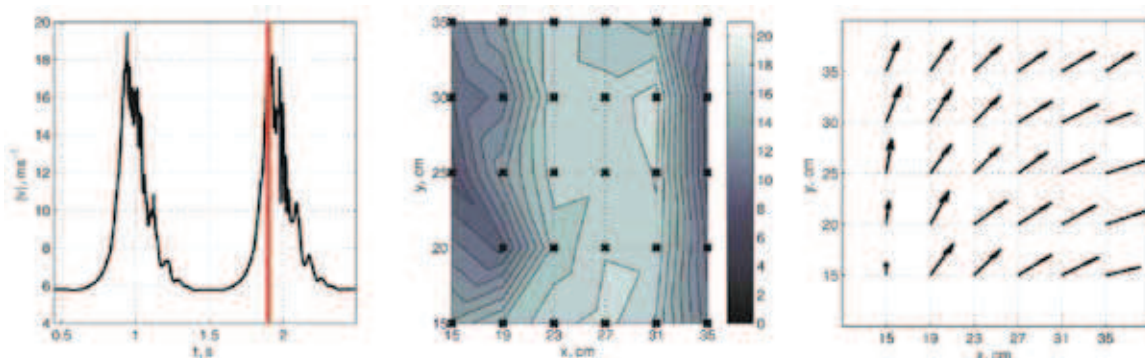
W miarę narastania prędkości, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej, obszar pomiarowy dzieli się na strefy, w których prędkość przepływu jest na jednakowym poziomie, tak jak to przedstawiono na rysunku 7. Strefy te układają się wzdłuż osi y przekroju, wyznaczając granice obszaru o równomiernie narastającym, jednolitym profilu prędkości obejmującym przedział 23 do 31 cm wzdłuż osi x i 23 do 31 cm wzdłuż osi y. Wektory prędkości w tym obszarze wykazują nieznaczną i jednokierunkową zmianę.

Natomiast w przedziale czasu odpowiadającym otwieraniu przesłony wymuszeń dynamicznych, obszar pomiarowy zostaje zróżnicowany pod względem prędkości przepływu (rysunek 8). Widoczne są znaczne gradienty prędkości i niemożliwe jest wyznaczenie wycinka użytecznego obszaru pomiarowego, w którym udało się uzyskać jednolity profil prędkości. Wektory prędkości w całym obszarze pomiarowym zmieniają kierunek w sposób dowolny, wykazując anizotropowość przepływu.

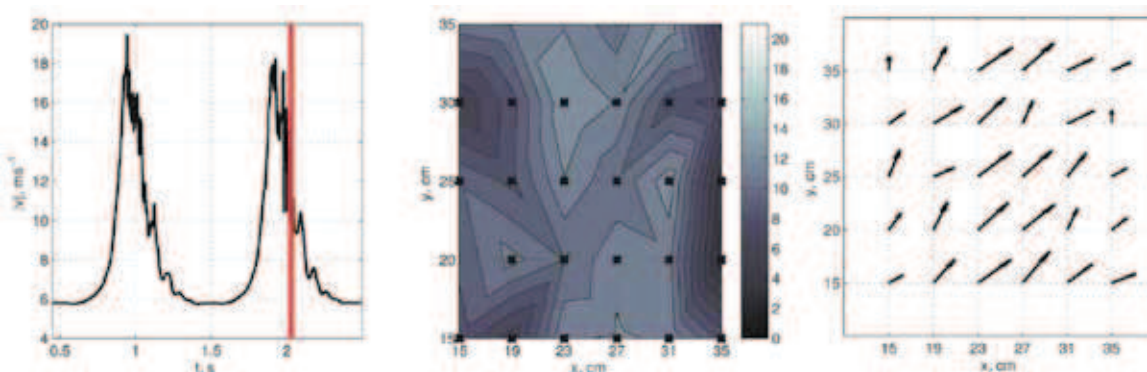
Przedziały czasu, w których generowany sygnał wzorcowy cechuje się znacznym stopniem sturbulizowania powodują,



Rys. 6. Analiza przepływu w obszarze pomiarowym – minimalna wartość prędkości
Fig. 6. Analysis of flow in the measuring range – minimum velocity value



Rys. 7. Analiza przepływu w obszarze pomiarowym – narastanie prędkości
Fig. 7. Analysis of flow in the measuring range – acceleration



Rys. 8. Analiza przepływu w obszarze pomiarowym – zmniejszanie prędkości
Fig. 8. Analysis of flow in the measuring range – deceleration

że zastosowanie go w praktyce jako sygnał testowy stwarzałyby dodatkowe problemy interpretacyjne w prowadzonych badaniach związanych z analizą dynamiki anemometrycznych przyrządów pomiarowych. Konieczna staje się analiza przyczyn powstawania takiej turbulencji.

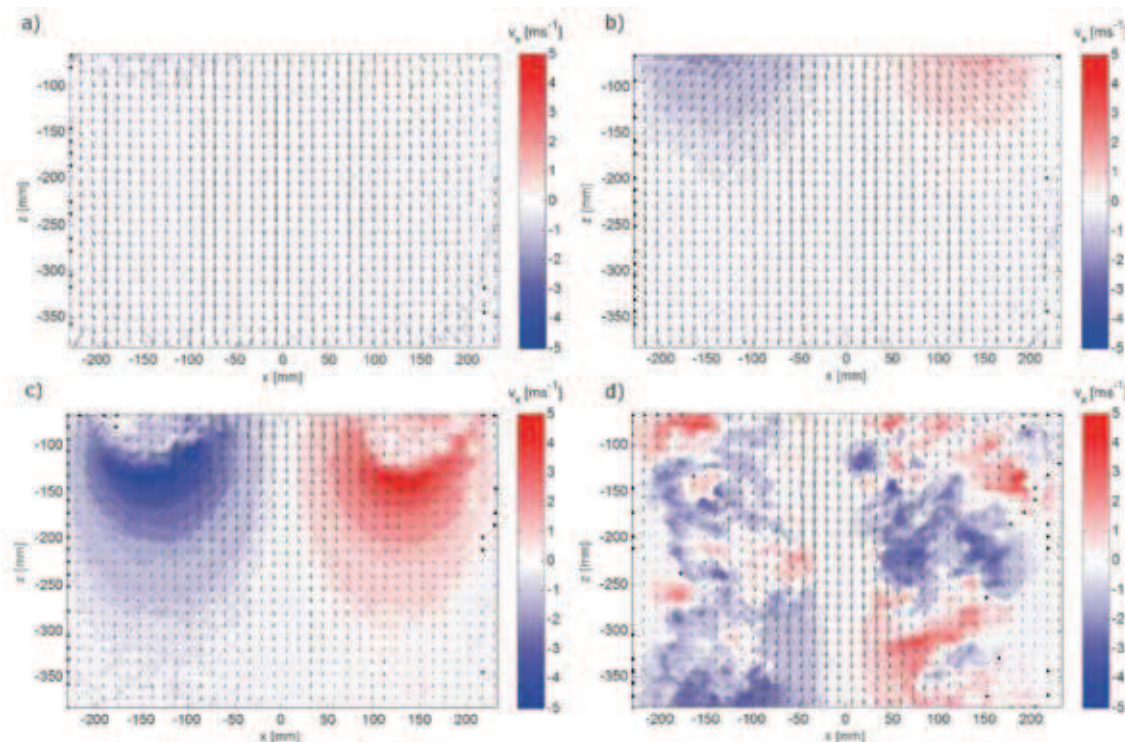
3.3. Wizualizacja przepływu za modułem wymuszeń dynamicznych z wykorzystaniem metody PIV

Wizualizacje chwilowych pól prędkości w obszarze testowania sond, będących przedmiotem badań przedstawiono na rysunkach 9 oraz 10 w postaci chwilowych pól prędkości z naniesionymi polami skalarnymi poszczególnych składowych dwuwymiarowego pola prędkości. Wyniki przedstawiono dla wybranych pozycji przysłony modułu wymuszeń dynamicznych. Gdy przysłony modułu są otwarte, przepływ w analizowanym obszarze jest stabilny. Stopniowe przysłanie

obszaru pomiarowego powoduje powstawanie ruchu wirowego. W sytuacji gdy przysłony powracają do początkowego położenia, pole prędkości jest zaburzone. Eksperyment z wizualizacją pola prędkości w przestrzeni pomiarowej za modułem wymuszeń dynamicznych wskazał na momenty, w których testowana metoda generowania okresowo zmiennego sygnału prędkości nie spełnia nakładanych na nią kryteriów dotyczących jednorodności pola prędkości w określonych strefach pomiaru, w których testowane mają być czujniki przepływu.

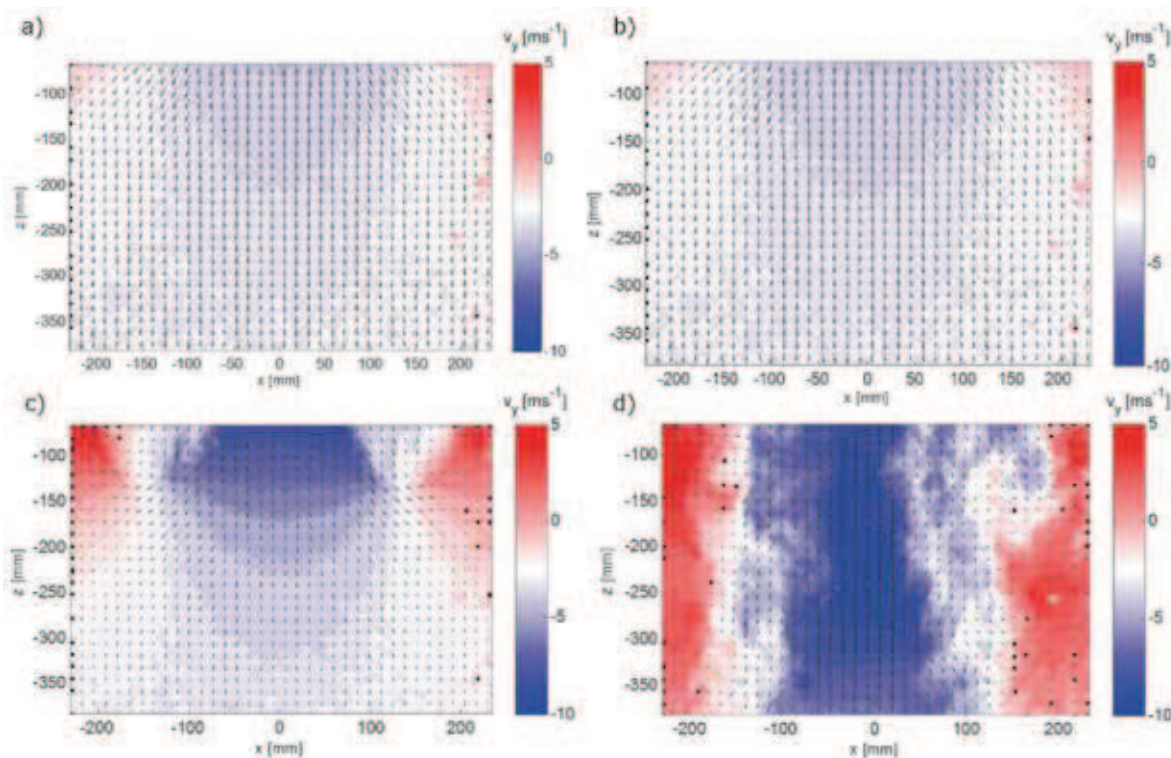
4. Wnioski

Analiza podstawowych cech przepływów uznawanych za wzorcowe w określaniu charakterystyk statycznych oraz dynamicznych ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia wy-



Rys. 9. Skalarne pole składowej prędkości wzdłuż osi x, dla różnych kątów otwarcia przesłony modułu, a – moduł otwarty, b – początek zamknięcia kłap modułu, c – kłapy zamknięte - maksymalne przesłonięcie przekroju przepływu, d – pole po powrocie kłap do początkowego położenia

Fig. 9. Scalar field of the velocity component along x axis for different angles of module diaphragm opening (a) open module (b) beginning of module flap closure (c) closed flaps – maximum diaphragm of the flow section (d) field in the initial position of the flaps



Rys. 10. Skalarne pole składowej prędkości wzdłuż osi z, dla różnych kątów otwarcia przesłony modułu, a – moduł otwarty, b – początek zamknięcia kłap modułu, c – kłapy zamknięte - maksymalne przesłonięcie przekroju przepływu, d – pole po powrocie kłap do początkowego położenia

Fig. 10. Scalar field of the velocity component along z axis for different angles of module diaphragm opening (a) open module (b) beginning of module flap closure (c) closed flaps – maximum diaphragm of the flow section (d) field in the initial position

ników badań prowadzonych z ich wykorzystaniem. Obecność w przepływie takich właściwości jak: intensywność turbulencji, czy anizotropia przepływu może wpływać na różnego typu czujniki w sposób odmienny, powodując, że wyniki badań staną się niemiernodajne i niemożliwe do porównywania między różnymi klasami przyrządów pomiarowych, mierzących tę samą wielkość fizyczną. Przedstawiona metodyka badań takich sygnałów pozwala na dokonanie szczegółowego opisu sygnału prędkości przepływu w przekrojach pomiarowych, a wyniki z takiej analizy pozwalają na dokonywanie właściwych interpretacji wyników badań z ich wykorzystaniem.

Literatura

1. *Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J.*: Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 2013, t. 15, nr 1-2, s. 65-74.
2. *Jamróz P.*: Effect of the Continuous Traverse Trajectory and Dynamic Error of the Vane Anemometer on the Accuracy of Average Velocity Measurements at the Cross-Section of the Mine Heading—Model-Based Testing, Archives of Mining Sciences, vol. 59, issue 4, 2014, s. 1051-1060.
3. *Jamróz P., Ligęza P., Socha K.*: Dynamic properties of hot-wire anemometric measurement circuits in the aspect of measurements in mine condition, Archives of Mining Sciences, vol. 57, issue 3, 2012, s. 699-714.
4. *Krach A.*: Uncertainty of measurement of selected quantities in mine ventilation measurements, Archives of Mining Sciences Monograph No. 8, Kraków 2009.
5. *Kruczkowski J.*: Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym, praca doktorska IMG PAN, Kraków 1999.
6. *Melikov A., Popiolek Z.*: Comparison of different methods for the determination of dynamic characteristics of low velocity anemometers, Measurement Science and Technology, vol. 15, 2004, s. 1709-1715.
7. *Raffel M., Willert Ch., Wereley S., Kompenhans J.*: Particle Image Velocimetry: A practical guide, Springer Science, 2007.
8. *Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J.*: Kopalniane pomiary wentylacyjne, Wydaw. „Śląsk”, Katowice 1992.