

## Różnicowe i złożone metody analizy sygnałów w radioizotopowych pomiarach prędkości fazy rozproszonej w przepływie ciecz-gaz w rurociągu poziomym

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono przykład zastosowania absorpcyjnej metody radioizotopowej w badaniach przepływów dwufazowych typu ciecz - gaz w rurociągu poziomym. Zasadniczą część pracy poświęcono przedstawieniu zastosowanych metod analizy sygnałów uzyskiwanych z detektorów scyntylacyjnych. Ponieważ sygnały te są przebiegami stochastycznymi, do ich analizy zastosowano metody statystyczne wykorzystujące średni moduł różnicy amplitud, średni kwadrat różnicy amplitud, funkcję korelacji wzajemnej oraz metody złożone będące połączeniem metod różnicowych i korelacyjnej.

**Abstract.** This paper presents an application of the gamma absorption method for two-phase liquid-gas flow evaluation in a horizontal pipeline. For analysis of stochastic signals obtained from the scintillation detectors such methods as the average magnitude difference function, the average square difference function, the cross-correlation function and methods based on a combination of the above mentioned functions were applied. (Differential and combined methods of signal analysis in radioisotope measurements of dispersed phase velocity in a liquid-gas flow through a horizontal pipeline)

**Słowa kluczowe:** Pomiar przepływów dwufazowych, metody radioizotopowe, analiza sygnałów stochastycznych, korelacja wzajemna.  
**Keywords:** Two-phase flow measurement, radioisotope methods, stochastic signal analysis, cross-correlation.

### Wstęp

Pomiary parametrów przepływów dwufazowych typu ciecz-gaz, ciecz-cząstki stałe czy gaz-cząstki stałe w rurociągach wymagają zastosowania zaawansowanych, zwykle nieinwazyjnych technik pomiarowych. W badaniach tego typu mediów od ponad 50 lat znajdują zastosowanie metody wykorzystujące izotopy promieniotwórcze wprowadzane w określonych warunkach do przepływu (metoda radioznacznikowa), lub oparte na zastosowaniu zamkniętych źródeł promieniowania gamma (metoda absorpcyjna) [1 - 6].

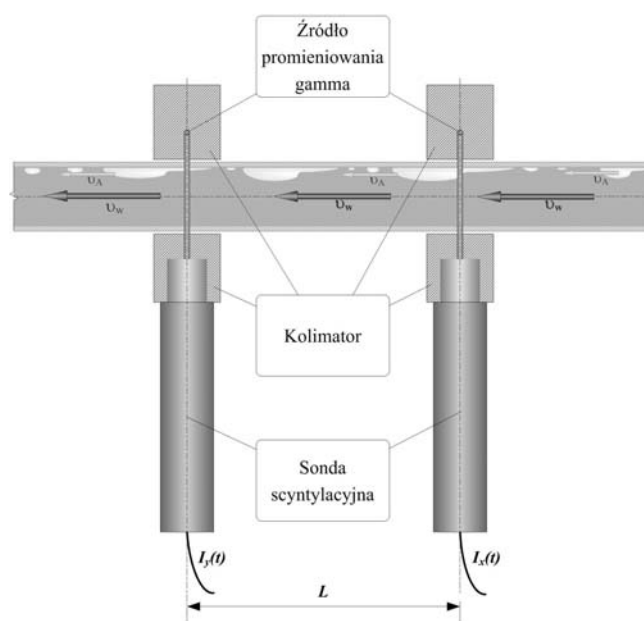
W niniejszej pracy zastosowano metodę absorpcyjną do pomiaru średniej prędkości pęcherzyków powietrza transportowanych przez ciecz w rurociągu poziomym. W badaniach zastosowano źródła <sup>241</sup>Am i sondy z kryształami scyntylacyjnymi NaI(Tl). W artykule wykorzystano wyniki pomiarów uzyskane na stanowisku badawczym zbudowanym w Pracowni Radiometrii Przemysłowej Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Do analizy sygnałów z sond zastosowano funkcję korelacji wzajemnej (ang. cross-correlation function, CCF), metody różnicowe: średni moduł różnicy amplitud (average magnitude difference function - AMDF), średni kwadrat różnicy amplitud (average square difference function - ASDF) oraz zaproponowane przez autorów do tej aplikacji metody złożone, będące kombinacją wyżej wymienionych funkcji różnicowych i CCF.

### Radioizotopowa absorpcyjna metoda pomiaru prędkości przepływu dwufazowego w rurociągu

Ideę zastosowania absorpcji promieniowania gamma do pomiaru prędkości transportu gazu przez ciecz w rurociągu poziomym pokazano na rysunku 1. Typowy zestaw do pomiaru absorpcyjnego składa się z zamkniętego źródła promieniowania gamma oraz sondy scyntylacyjnej z odpowiednimi kolimatorami. Łączne zastosowanie dwóch takich zestawów, umieszczonych w odległości  $L$  od siebie, umożliwia wyznaczanie prędkości przepływu fazy rozproszonej. Przepływ badanej mieszaniny przez odcinek pomiarowy rury powoduje zmiany absorpcji promieniowania i pozwala uzyskać z sond wzajemnie opóźnione sygnały

stochastyczne. Opisują one chwilowe stany strumienia w badanych przekrojach [2, 5, 8].



Rys. 1. Zasada pomiaru absorpcyjnego mieszanki gaz - ciecz w rurociągu poziomym.

Analiza tych sygnałów metodami statystycznymi umożliwia wyznaczenie opóźnienia transportowego  $\tau_0$  i średniej prędkości pęcherzyków powietrza  $v_A$  z zależności:

$$(1) \quad v_A = L / \tau_0$$

### Hydrauliczna instalacja badawcza

Schemat hydraulicznej instalacji doświadczalnej, zbudowanej w Pracowni Radiometrii Przemysłowej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie przedstawiono na rysunku 2. Instalacja służy do badań przepływów typu ciecz - gaz, symulujących typowe procesy obserwowane w przemyśle petrochemicznym. Zakres regulacji prędkości przepływu mieszaniny przez odcinek pomiarowy o długości

4,5 m i średnicy wewnętrznej 30 mm wynosi od 0,5 do 2,5 m/s. W pomiarach wykorzystano dwa liniowe źródła promieniowania  $^{241}\text{Am}$  emitujące fotony o energii 59,5 keV oraz dwie sondy z kryształami scyntylacyjnymi NaI(Tl) rozmieszczone w odległości  $L = 110$  mm. W skład stanowiska badawczego wchodzi także m.in. układ akwizycji danych, komputer z oprogramowaniem umożliwiającym analizę sygnałów z detektorów oraz miernik ultradźwiękowy do pomiaru prędkości przepływu cieczy  $v_w$ . Szczegółowy opis całej instalacji i geometrii stosowanego zestawu absorpcyjnego przedstawiono w artykułach [6, 8].

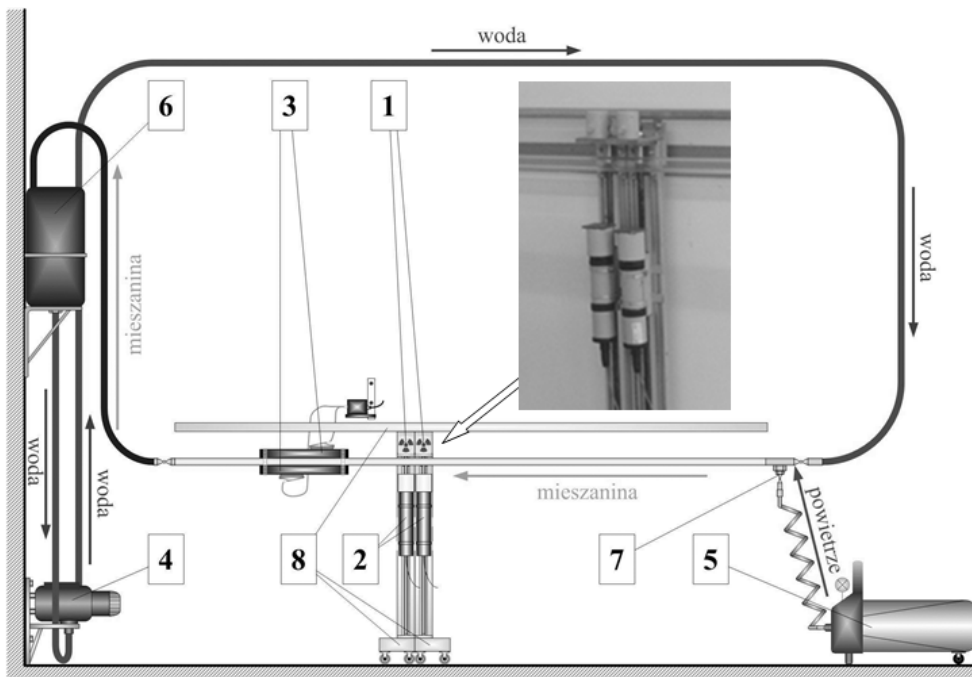
### Metody analizy sygnałów

Otrzymywane z sond scyntylacyjnych przebiegi impulsowe  $I_x(t)$  i  $I_y(t)$  są zliczane w określonym czasie próbkowania  $\Delta t$  tworząc dyskretne stochastyczne sygnały pomiarowe  $x(n)$  oraz  $y(n)$ . Przykładowe realizacje takich sygnałów dla przepływu ciecz-gaz oraz ich histogramy przedstawione są w pracy [6]. Tego typu przebiegi mogą być analizowane różnymi metodami w dziedzinie czasu i częstotliwości [7 – 19]. Najbardziej znanymi i często stosowanymi są metody wykorzystujące funkcję korelacji wzajemnej i fazę wzajemnej gęstości widmowej. Do wyznaczania opóźnienia sygnałów losowych w dziedzinie czasu wykorzystać można również m.in. metody różnicowe [14, 15], korelację wzajemną z zastosowaniem transformaty Hilberta [16, 17] a także warunkową wartość średnią modułu sygnału [6, 18 – 19].

### Metoda korelacji wzajemnej

Dyskretny estymator funkcji korelacji wzajemnej można obliczyć z zależności [11]:

$$(2) \quad \hat{R}_{CCF}(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+l)$$



Rys. 2. Schemat instalacji do badania przepływu mieszaniny ciecz - gaz w rurociągu poziomy; 1- źródła promieniowania gamma, 2 – detektory scyntylacyjne, 3 – sondy ultradźwiękowe, 4 - pompa, 5 – kompresor, 6 – zbiornik odpowietrzający, 7 – dysza powietrzna, 8 – układ przesuwu sond.

gdzie:  $N$  – liczba próbek sygnałów  $x(n)$  oraz  $y(n)$ ,  $n = t/\Delta t$ ,  $l$  - dyskretna wartość opóźnienia  $l = \tau/\Delta t$ ,  $\tau$  – opóźnienie.

Opóźnienie transportowe (estymator  $\hat{\tau}_0$ ) określa się na podstawie lokalizacji głównego maksimum CCF [11 - 15]. W przypadku zastosowania funkcji korelacji wzajemnej oraz pozostałych opisywanych w niniejszym artykule metod konieczne jest centrowanie i filtracja sygnałów pomiarowych z sond w celu eliminacji zakłóceń (m.in. fluktuacji rozpadów jądrowych i szumu tła radiacyjnego). Zrealizowano to stosując odpowiednie cyfrowe filtry pasmowe. Aplikację do analizy sygnałów opracowano w środowisku LabVIEW. Przykładowy przebieg CCF otrzymanej dla przepływu woda – powietrze w pomiarze LUT 003 ( $N = 180000$ ,  $\Delta t = 1$  ms) pokazano na rysunku 3.

### Metody różnicowe

Dyskretny estymatory funkcji AMDF i ASDF można przedstawić odpowiednio wzorami [14]:

$$(3) \quad \hat{R}_{AMDF}(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - y(n+l)|$$

$$(4) \quad \hat{R}_{ASDF}(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) - y(n+l)]^2$$

W obydwu przedstawionych wyżej metodach różnicowych wyznaczanie opóźnienia transportowego polega na lokalizacji położenia głównego minimum odpowiedniej funkcji. Wykresy funkcji AMDF i ASDF dla pomiaru LUT003 pokazano na rysunku 4.

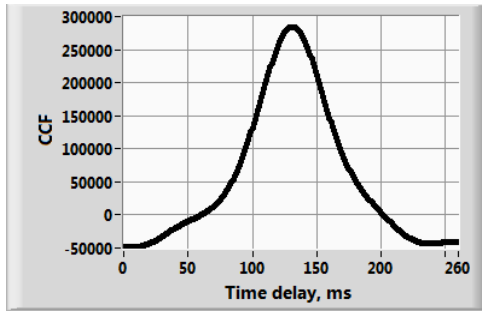
### Metody złożone

Zdaniem autorów niniejszej pracy dobre właściwości metrologiczne można uzyskać przez zastosowanie do analizy sygnałów otrzymywanych z sond scyntylacyjnych metod złożonych będących połączeniem CCF oraz funkcji różnicowych AMDF i ASDF według wzorów:

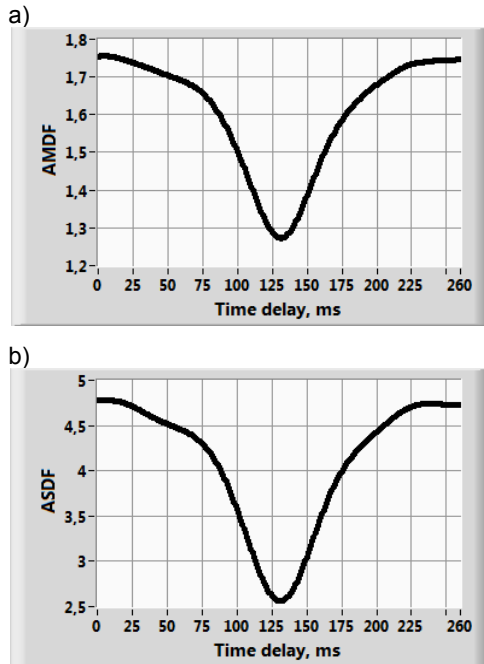
$$(5) \quad \hat{R}_{CCF/AMDF}(l) = \frac{\hat{R}_{CCF}(l)}{\hat{R}_{AMDF}(l)}$$

$$(6) \quad \hat{R}_{CCF/ASDF}(l) = \frac{\hat{R}_{CCF}(l)}{\hat{R}_{ASDF}(l)}$$

Stosując funkcje (5) i (6) do analizy sygnałów uzyskanych w pomiarze LUT003 otrzymano przebiegi przedstawione na rysunku 5. Na rysunku 5a pokazano funkcje nieunormowane a na rys. 5b unormowane w stosunku do wartości maksymalnych. Na podstawie tego ostatniego rysunku łatwo zauważyć, że uzyskane charakterystyki CCF/AMDF i CCF/ASDF posiadają nieco większą stromość w otoczeniu punktu ekstremum niż CCF.



Rys. 3. Funkcja korelacji wzajemnej CCF otrzymana w eksperymencie LUT003



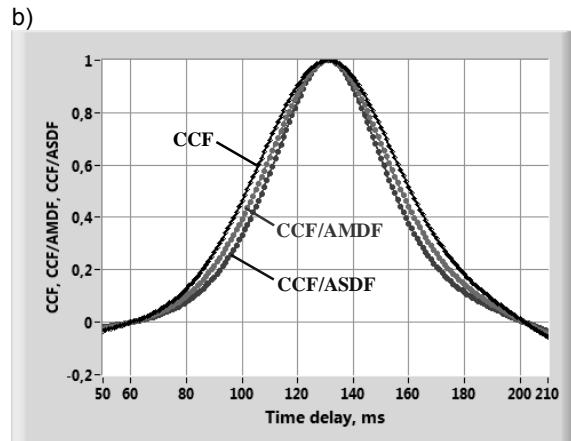
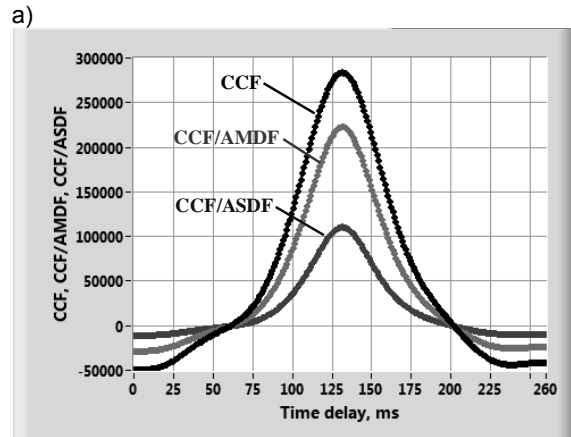
Rys. 4. Wykresy funkcji różnicowych: AMDF (a) i ASDF (b) uzyskanych w eksperymencie LUT003

### Przykładowe wyniki pomiarów

Dla wszystkich funkcji przedstawionych na rysunkach 3 - 5 zastosowano procedurę wyznaczania położenia głównego ekstremum polegającą na aproksymacji funkcją Gaussa wybranego fragmentu danej charakterystyki. W takim przypadku estymator opóźnienia transportowego  $\hat{\tau}_0$  wyznacza się jako pierwszy moment dopasowanego rozkładu, a niepewność standardowa opóźnienia  $u(\hat{\tau}_0)$  jest równa odchyleniu standardowemu średniej. Wybrane aproksymacje (w każdym przypadku stosowano tę samą liczbę punktów) pokazano na rysunku 6. Średnią prędkość  $v_A$  fazy mniejszościowej (pęcherzyków powietrza) można obliczyć z zależności (1). Niepewność złożona  $u_c(v_A)$  [20] przy pomijalnie małych niepewnościach toru pomiarowego zależy od niedokładności wyznaczenia nieskorelowanych ze sobą wielkości  $L$  i  $\hat{\tau}_0$ :

$$(7) \quad u_c(v_A) = \sqrt{\left(\frac{\partial v_A}{\partial L}\right)^2 u^2(L) + \left(\frac{\partial v_A}{\partial \hat{\tau}_0}\right)^2 u^2(\hat{\tau}_0)}$$

gdzie:  $u(L)$  - niepewność pomiaru odległości pomiędzy sondami,  $u(\hat{\tau}_0)$  - niepewność wyznaczania średniego czasu opóźnienia transportowego.



Rys. 5. Nieunormowane (a) i unormowane (b) przebiegi CCF oraz funkcji złożonych CCF/AMDF i CCF/AMDF otrzymane w eksperymencie LUT003

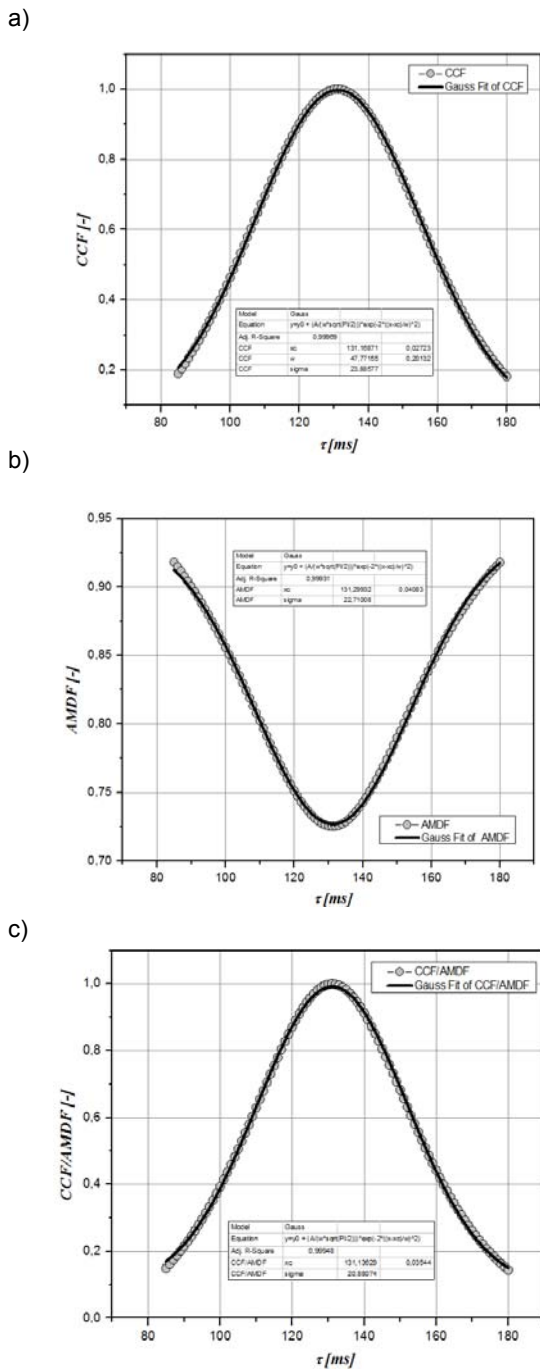
Wyniki pomiarów średniej prędkości  $v_A$  oraz niepewności złożone  $u_c(v_A)$  otrzymane w eksperymencie LUT003 zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów w eksperymencie LUT003

Metoda	$v_A$ , m/s	$u_c(v_A)$ , m/s
CCF	0,839	0,014
AMDF	0,839	0,014
ASDF	0,838	0,013
CCF/AMDF	0,839	0,012
CCF/ASDF	0,839	0,011

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono przykład zastosowania metody absorpcji promieniowania gamma do pomiaru prędkości fazy gazowej przepływu dwufazowego ciecz-gaz w rurociągu poziomym. Do analizy sygnałów pomiarowych z sond scyntylicyjnych (po wstępnej obróbce) zastosowano, obok znanej i często stosowanej funkcji korelacji wzajemnej, stosunkowo mniej popularne w analizie sygnałów losowych metody różnicowe: średni modułu różnicy amplitud i średni kwadrat różnicy amplitud. Zaproponowano także zastosowanie w absorpcyjnych pomiarach radioizotopowych dwóch metod złożonych: CCF/AMDF i CCF/ASDF, będących połączeniem korelacji wzajemnej CCF i metod różnicowych AMDF oraz ASDF. Porównanie wyników pomiarów otrzymanych w analizowanym eksperymencie LUT003 pozwala stwierdzić, że najmniejsze wartości niepewności pomiaru średniej prędkości pęcherzyków powietrza uzyskano w kolejności dla metod: CCF/ASDF, CCF/AMDF, ASDF, CCF i AMDF.



Rys. 6. Aproksymacje unormowanych funkcji CCF (a), AMDF (b) i CCF/AMDF (c) w eksperymencie LUT003

Podobne wyniki otrzymano w innych pomiarach, np. zaprezentowanych na konferencji XXI Fluid Mechanics [21]. Przedstawione metody analizy sygnałów, w szczególności metody złożone, mogą być przydatne także w radioizotopowych badaniach innych typów przepływów dwufazowych, np. ciecz-cząstki stałe w rurociągu [5].

#### LITERATURA

[1] G. Johansen, P. Jackson, Radioisotope gauges for industrial process measurements, Wiley, New York, (2004)  
 [2] Jung S.H., Kim J.S., Kim J.B., Kwon T.Y., Flow-rate measurements of a dual-phase pipe flow by cross-correlation technique of transmitted radiation signals. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 67 (2009), 1254-1258  
 [3] Yu Z., Qincheng B., Richa H., Recognition and measurement in the flow pattern and void fraction of gaseliquid two-phase flow

in vertical upward pipes using the gamma densitometer. *Applied Thermal Engineering* Vol. 60 (2013), 398-410  
 [4] Zych M., et al, Radioisotope investigations of compound two-phase flows in an open channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 35 (2014), 11-15  
 [5] Hanus R., Petryka L., Zych M., Velocity measurement of the liquid-solid flow in a vertical pipeline using gamma-ray absorption and weighted cross-correlation. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 40 (2014), 58-63  
 [6] Hanus R., et al, Radioisotope measurement of two-phase flow in pipeline using conditional averaging of signal. *Proc. 2012 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf. MELECON 2012*, Yasmine-Hammamet, Tunisia, 25-28 March 2012, 144-147  
 [7] Mosorov V., A method of transit time measurement using twin plane electrical tomography. *Measurement Science and Technology*, Vol. 17(2006), 753-760  
 [8] Petryka L., Hanus R., Zych M., Zastosowanie metody absorpcji promieniowania gamma w pomiarach przepływów dwufazowych w rurociągach. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 88 (2012), n. 1b, 185-188  
 [9] Hanus R., Porównanie statystycznych błędów estymacji czasu opóźnienia przy zastosowaniu funkcji korelacji wzajemnej i fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 84(2008), n. 12, 301-303  
 [10] Świsulski D., Metody równoczesnej akwizycji w systemach z napięciowymi i częstotliwościowymi torami pomiarowymi. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 88 (2012), n. 10b, 29-31  
 [11] Beck M.S., Płaskowski A., Cross-correlation flowmeters. Adam Hilger, Bristol (1987)  
 [12] Bendat J.S., Piersol A.G., Random data - analysis and measurement procedures. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley, New York (2010)  
 [13] Soo S.L. (ed.), Instrumentation for fluid-particle flow. Noyes Publications, New Jersey (1999)  
 [14] Jacovitti G., Scarano G., Discrete time technique for time delay estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 41 (1993), n. 2, 525-533  
 [15] Chen J, Benesty J, Huang Y., Performance of GCC-and AMDF-based time-delay estimation in practical reverberant environments. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2005, Article ID 498964, 25-36  
 [16] Hanus R., Estymacja czasu opóźnienia sygnałów losowych z wykorzystaniem transformaty Hilberta i sygnału analitycznego. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 88, Nr 10a/2012, str. 46-48  
 [17] Hanus R., Badanie właściwości korelacyjnej metody estymacji czasu opóźnienia wykorzystującej transformatę Hilberta sygnału pomiarowego. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 88 (2012), n. 10b, 39-41  
 [18] Kowalczyk A., Hanus R., Szlachta A., Investigation of the statistical method of time delay estimation based on conditional averaging of delayed signal. *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 18 (2011), n. 2, 335-342  
 [19] Hanus R., Porównanie niepewności standardowych estymacji czasu opóźnienia przy zastosowaniu funkcji korelacji wzajemnej i funkcji warunkowej wartości średniej modułu sygnału opóźnionego. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 86 (2010), n. 6, 232-235  
 [20] *Wyrażanie niepewności pomiaru - przewodnik*. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999  
 [21] Hanus R., Zych M., Petryka L., Velocity measurement of two-phase liquid-gas flow in a horizontal pipeline using gamma densitometry. *Journal of Physics: Conference Series* Vol. 530 Article ID 012042, 2014

**Autorzy:** dr inż. Robert Hanus, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów. E-mail: rohan@prz.edu.pl, dr inż. Marcin Zych, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: zych@geol.agh.edu.pl, dr inż. Leszek Petryka, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: Leszek.Petryka@fis.agh.edu.pl