

Leszek PETRYKA¹, Robert HANUS², Marcin ZYCH¹

¹AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ZASTOSOWAŃ FIZYKI JĄDROWEJ

²POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Analiza statystyczna sygnałów w radioizotopowych pomiarach przepływów dwufazowych

Dr inż. Leszek PETRYKA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od ukończeniu studiów w 1969 r. nauczyciel akademicki w AGH, obecnie adiunkt na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Zainteresowania naukowe: przepływy wielofazowe i analiza procesów przepływowych, zastosowania techniki jądrowej oraz analiza sygnałów.



e-mail: petryka@novell.fj.agh.edu.pl

Dr inż. Robert HANUS

Adiunkt w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się głównie zagadnieniami związanymi z modelowaniem i analizą sygnałów losowych oraz statystycznymi metodami pomiaru opóźnień. Autor lub współautor kilkudziesięciu publikacji, członek Sekcji Aparatury i Systemów Pomiarowych KMİAN PAN.



e-mail: rohan@prz.edu.pl

Dr inż. Marcin ZYCH

Absolwent Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W 2007 roku obronił pracę doktorską z zakresu zastosowań metod fizyki jądrowej w badaniach przepływów wielofazowych. Zainteresowania naukowe: zastosowanie technik pomiarowych w badaniach procesów przemysłowych, analiza sygnałów, projektowanie i budowa instalacji laboratoryjnych.



e-mail: zych@novell.fj.agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule omówiono wybrane metody analizy sygnałów stosowane w radioizotopowych absorpcyjnych pomiarach parametrów przepływów dwufazowych: metodę korelacji wzajemnej i metodę fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy. Na wybranych przykładach pokazano wykorzystanie obydwu metod do pomiaru prędkości przepływu fazy gazowej w mieszaninie woda-powietrze transportowanej rurciągiem poziomym. Wyznaczono i porównano niepewności wyników pomiarów prędkości uzyskane przy zastosowaniu prezentowanych metod.

Słowa kluczowe: pomiary przepływów dwufazowych, metody jądrowe, metoda źródeł zamkniętych, korelacja wzajemna, faza wzajemnej gęstości widmowej mocy.

Statistical signal analysis in the radioisotope two-phase flow measurements

Abstract

The paper presents gamma absorption methods applied to two-phase flow evaluation by advanced statistical analysis of the recorded stochastic signals. Two selected methods based on the cross-correlation function and the phase of the cross-spectral density distributions are considered. The examples illustrate application of the specified functions to measurement of velocity of the gas phase transported by water in a horizontal pipe. Moreover, the uncertainties of the velocity measurement results obtained by using both statistical methods presented are calculated and compared.

Keywords: two phase flow measurement, radioisotopes, sealed sources method, cross-correlation, phase of cross-spectral density function.

1. Wstęp

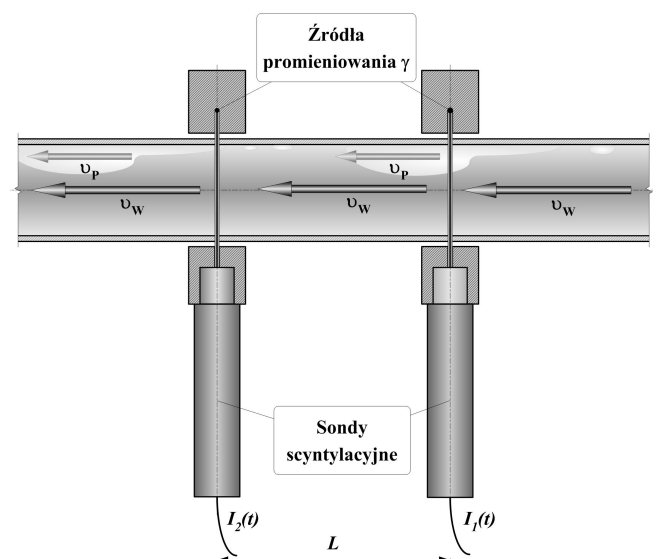
Transport rurociągowy jest bardzo często stosowany w przemyśle do przesyłu mieszanin wielofazowych. W takich przypadkach metody jądrowe, a zwłaszcza transmisja promieniowania gamma, oferuje możliwość bezstykowego pomiaru prędkości przepływu całej mieszaniny lub wybranego jej składnika.

Artykuł prezentuje zastosowanie dwóch wybranych metod statystycznej analizy sygnałów, wykorzystujących funkcję korelacji wzajemnej (FK) i fazę wzajemnej gęstości widmowej mocy (WGWM), do wyznaczania prędkości przepływu składnika mniejszościowego na przykładzie mieszaniny woda – powietrze. Pomiary wykonywane były z wykorzystaniem metody absorpcyjnej na doświadczalnym stanowisku laboratoryjnym [1].

2. Zasada pomiaru parametrów przepływu metodą absorpcyjną

Lokalne właściwości przepływającego strumienia mogą być z zewnątrz analizowane przez wiązkę fotonów o odpowiednio dobranej energii. Typowe źródła promieniowania, o aktywności 3,7 GBq (100 mCi) emitują w pełnym kącie bryłowym prawie $4 \cdot 10^9$ fotonów na sekundę. Część promieniowania, po przejściu przez badany strumień, trafia do sondy scyntylicyjnej, usytuowanej z drugiej strony rury (rys. 1).

Drugi zestaw źródło - sonda umieszcza się w określonej odległości L od pierwszego. Na wyjściu sond uzyskuje się przebiegi impulsowe $I_1(t)$ i $I_2(t)$, zależne od natężenia promieniowania γ padającego na detektory. Zliczanie impulsów w zadanym czasie pozwala uzyskać sygnały stochastyczne, opisujące chwilowy stan analizowanego strumienia w danym przekroju [2].



Rys. 1. Zasada pomiaru absorpcyjnego
Fig. 1. Principle of the sealed sources measurement

Analiza omawianych sygnałów metodami statystycznymi umożliwia wyznaczenie opóźnienia i prędkości przemieszczenia się lokalnych niejednorodności przepływu (w tym przypadku pęcherzyków powietrza, które stanowią fazę mniejszościową), przez odcinek pomiarowy L . Średnią prędkość pęcherzyków powietrza v_p określa się z zależności:

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

gdzie τ_0 - opóźnienie transportowe. W razie potrzeby prędkość przepływu wody v_w może być wyznaczona np. przy zastosowaniu metody radioznacznikowej, opisanej m.in. w [1].

3. Metody analizy sygnałów

Sygnały rejestrowane w pomiarach jądrowych zawierają nie tylko informacje statystyczne o analizowanym przepływie, ale także zakłócenia spowodowane tłem radiacyjnym, szumami aparatury i fluktuacjami rozpadów jądrowych. Przez odpowiedni dobór aktywności źródeł, energii promieniowania, geometrii pomiaru i czasu próbkowania można wprawdzie obniżyć poziom szumów w rejestrowanych sygnałach, ale nie jest możliwa ich całkowita eliminacja. Ponadto sygnały otrzymywane bezpośrednio z sond nie są ergodyczne i nie nadają się do określania opóźnienia transportowego przy zastosowaniu klasycznej analizy korelacyjno-widmowej [3]. Właściwe dobranie warunków pomiaru umożliwia wybór zakresów częstotliwości rejestrowanych sygnałów, w których udział szumów będzie zaniedbywalny, a analizowane fragmenty staną się ergodyczne [4].

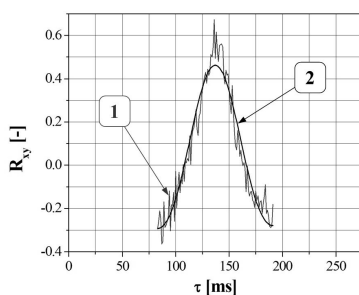
3.1. Korelacja wzajemna

Przebiegi impulsowe $I_1(t)$ i $I_2(t)$, uzyskiwane na wyjściu sond scyntylacyjnych, zliczane w zadanym czasie próbkowania Δt tworzą dyskretne sygnały pomiarowe $x(n)$ oraz $y(n)$. Odpowiednio długie, ergodyczne fragmenty tych sygnałów o liczbie próbek N_{total} posłużyły do wyznaczenia estymatora FK z zależności:

$$\hat{R}_{xy}(\tau) = \frac{1}{N_{total} - l} \sum_{n=1}^{N_{total}-l} x(n)y(n+l) \quad (2)$$

gdzie: $l = \tau/\Delta t$, τ - opóźnienie transportowe.

Główne maksimum rozkładu $R_{xy}(\tau)$ pozwala określić najbardziej prawdopodobne opóźnienie transportowe (estymator $\hat{\tau}_0$) [5]. Przykładowy przebieg FK dla sygnałów uzyskanych w eksperymencie BUB0006 ($N_{total} = 300\,000$, $\Delta t = 1$ ms) pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcja korelacji wzajemnej na odcinku pomiarowym L w eksperymencie BUB0006; 1 - FK bez filtracji, 2 - FK po zastosowaniu filtracji

Fig. 2. Cross-correlation distribution in the distance L in experiment BUB0006; 1 - original FK distribution, 2 - filtrated FK distribution

Można na nim obserwować skutek usuwania zakłóceń o wysokiej częstotliwościach, spowodowanych fluktuacjami promieniowania γ oraz lokalnymi własnościami przepływającej mieszaniny.

Łatwo zauważyć, że aby uniknąć niejednoznaczności wyznaczenia opóźnienia transportowego konieczna jest redukcja szu-

mów. Początkowo cel taki osiągnano przy pomocy metody średnich kroczących [6], a obecnie realizowany jest głównie przez stosowanie filtrów pasmowych, doboranych na podstawie analizy widma rejestrowanych sygnałów [7].

Najbardziej prawdopodobne opóźnienie transportowe może być wyznaczone na podstawie rozkładu FK kilkoma sposobami [8]. W niniejszej pracy zastosowano aproksymację FK rozkładem normalnym [6]. Wówczas opóźnienie $\hat{\tau}_0$ wyznacza się, jako pierwszy moment $\bar{\tau}_0$ dopasowanego rozkładu.

3.2. Faza wzajemnej gęstości widmowej mocy

Wzajemna jednostronna gęstość widmowa mocy $G_{xy}(f)$ związana jest z funkcją korelacji wzajemnej przekształceniem Fouriera. Faza WGWM $\Phi_{xy}(f)$ jest liniową funkcją częstotliwości (dla prędkości v niezależnej od f) i może być zastosowana do wyznaczenia opóźnienia z zależności:

$$\tau_0 = -\Phi_{xy}(f)/2\pi f \quad (3)$$

Do wyliczania gęstości widmowych najczęściej stosuje się algorytmy DFT/FFT bezpośrednio dla ciągów dyskretnych fragmentów sygnałów i procedurę nazywaną metodą Welcha. Procedura ta wymaga podziału zbiorów próbek N_{total} na N_d niezależnych segmentów, każdy o liczebności N . Wartość N_d powinna być na tyle duża, aby ograniczyć fluktuacje statystyczne estymacji WGWM [3]. Zastosowanie dyskretnej transformaty Fouriera daje k użytecznych wartości częstotliwości f_k ($k = 0..(N-1)/2$), a rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości wynosi: $\Delta f = 1/N\Delta t$. Opóźnienie wyznaczone jest z wygładzonego estymatora fazy WGWM $\tilde{\Phi}_{xy}(f)$ po zastosowaniu procedury rozwijania fazy. Ponieważ charakterystyka $\tilde{\Phi}_{xy}(f)$ jest nominalnie liniowa i przechodzi przez początek układu współrzędnych, estymator opóźnienia można wyznaczyć na podstawie współczynnika kierunkowego a prostej regresji fazy WGWM względem częstotliwości [9, 10]:

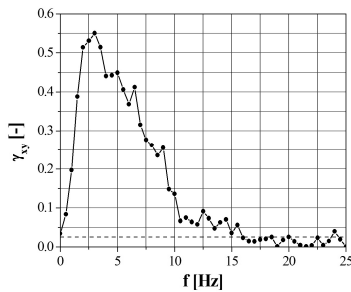
$$\hat{\tau}_0 = -\frac{1}{2\pi} \hat{a} = -\frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum_{k=1}^m f_k \tilde{\Phi}_{xy}(f_k)}{\sum_{k=1}^m f_k^2} \right] \quad (4)$$

gdzie m jest liczbą par wartości fazy i częstotliwości stosowaną do wyznaczenia prostej regresji. Wybór odpowiedniego zakresu częstotliwości przy linearyzacji jest istotny, szczególnie w przypadku sygnałów o wysokim poziomie szumów, ze względu na zniekształcenia charakterystyki fazowej. W tym przypadku przydatna może być funkcja koherencji $\gamma_{xy}(f)$, która jest unormowaną WGWM [3]. W praktyce wykorzystuje się kwadrat modułu tej funkcji, który dla wszystkich częstotliwości przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 1. Podstawę wyboru m może stanowić przebieg tej funkcji - wybiera się zakres częstotliwości, dla których $\gamma_{xy}(f)$ osiąga istotne wartości [11]. Na rysunku 3 pokazano przebieg funkcji koherencji sygnałów uzyskanych w eksperymencie BUB0006 przy $N_d = 150$. Linia przerywaną zaznaczono granicę jednostronnego przedziału ufności wyznaczonego dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Rysunek 4 przedstawia przebieg fazy WGWM w tym samym eksperymencie dla zakresu częstotliwości 0 - 16 Hz. Opóźnienie transportowe obliczane jest na podstawie równania (4).

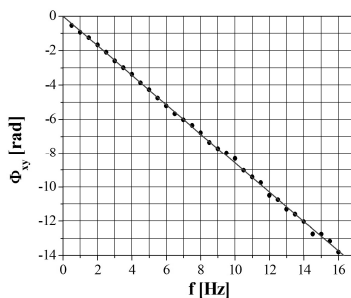
4. Ocena niepewności pomiarów

Niepewność złożona $u_c(v_p)$ pomiaru prędkości omawianymi metodami, zależy od niedokładności wyznaczenia nieskorelowanych ze sobą wielkości L i $\hat{\tau}_0$:

$$u_c(v_p) = \sqrt{\left(\frac{\partial v_p}{\partial L} \right)^2 u_B^2(L) + \left(\frac{\partial v_p}{\partial \hat{\tau}_0} \right)^2 u_A^2(\hat{\tau}_0)} \quad (5)$$



Rys. 3. Funkcja koherencji w eksperymencie BUB0006
Fig. 3. The coherence function in the experiment BUB0006



Rys. 4. Przebieg fazy WGWM w eksperymencie BUB0006
Fig. 4. Phase of the cross-spectral density distribution in experiment BUB0006

W zależności (5) indeksy A i B oznaczają, odpowiednie niepewności wyznaczone metodami typu A oraz B [12]. Niepewność $u_B(L)$ pomiaru L można określić z zależności:

$$u_B(L) = \Delta L_{gr} / \sqrt{3} \quad (6)$$

gdzie ΔL_{gr} jest wartością graniczną odchyień wskazań przyrządu od wartości mierzonej, wyznaczaną na podstawie danych producenta (dla stosowanej w pomiarach suwmiarki elektronicznej ΔL_{gr} wynosi 0,02 mm). Niepewność wyznaczania opóźnienia $u_A(\hat{\tau}_0)$ dla FK może być przedstawiona wzorem [6]:

$$u_A(\hat{\tau}_0)_{FK} = \sqrt{\frac{\sigma^2(\bar{\tau}_0)}{N_{FK}(N_{FK}-1)}} \quad (7)$$

gdzie: N_{FK} jest liczbą punktów FK, stosowaną do aproksymacji krzywą rozkładu normalnego, a $\sigma(\bar{\tau}_0)$ jest odchyleniem standardowym dopasowanego rozkładu.

Dla fazy WGWM niepewność opóźnienia $u_A(\hat{\tau}_0)$ można określić ze wzoru [9]:

$$u_A(\hat{\tau}_0)_{WGWM} = \left\{ \frac{1}{4\pi^2(m-1)\sum_{k=1}^m f_k^2} \left[\sum_{k=1}^m \tilde{\Phi}_{xyk}(f_k) - \frac{\left[\sum_{k=1}^m f_k \tilde{\Phi}_{xyk}(f_k) \right]^2}{\sum_{k=1}^m f_k^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Rozszerzoną niepewność pomiaru prędkości powietrza obliczono z zależności:

$$U(v_p) = k \cdot u_c(v_p) \quad (9)$$

W celu określenia wartości współczynnika rozszerzenia obliczono dla obydwu metod wypadkową liczbę stopni swobody ze wzoru Welch-Satterwaite'a [12]. Następnie przyjmując $p = 95\%$ z tablic rozkładu t-Studenta odczytano wartości k równe odpowiednio 2,09 dla FK i 2,04 dla fazy WGWM. Obliczone ze wzoru (9) wartości niepewności rozszerzonej $U_{0,95}(v_p)$ zestawiono

w tabeli 1. Dodatkowo w tabeli pokazano wyniki obliczeń niepewności $U_{0,95}(v_p)^*$ uzyskane przy założeniu normalnego rozkładu v_p (dla poziomu ufności 0,95).

Tab. 1. Wyniki uzyskane w eksperymencie BUB0006
Tab. 1. Results obtained in the experiment BUB0006

	FK	WGWM
v_p [m/s]	0,7104	0,7098
$U_{0,95}(v_p)$ [m/s]	0,0030	0,0017
$U_{0,95}(v_p)^*$ [m/s]	0,0029	0,0017

Porównanie uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że w omawianym przypadku wartość niepewności rozszerzonej pomiaru prędkości powietrza dla metody fazowej jest prawie dwukrotnie mniejsza niż dla FK. Wartości niepewności otrzymane przy założeniu normalnego rozkładu v_p nieznacznie odbiegają od otrzymanych metodą zalecaną przez [12].

5. Podsumowanie

W pracy omówiono dwie reprezentatywne metody analizy sygnałów w absorpcyjnych pomiarach parametrów przepływów dwufazowych: metodę korelacji wzajemnej oraz metodę fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy. Przedstawiono ich zastosowanie do wyznaczania średnich prędkości pęcherzyków powietrza transportowanych przez wodę w rurociągu poziomym. Wyznaczono i porównano niepewności uzyskanych wyników prędkości dla każdej z omawianych metod. Stwierdzono, że w rozważanym przypadku niepewność wyniku pomiaru prędkości powietrza dla metody fazowej była prawie dwukrotnie mniejsza niż dla metody korelacji wzajemnej.

6. Literatura

- [1] Petryka L., Zych M., Hanus R.: Stanowisko do oceny metod pomiaru przepływu cieczy w rurociągu. *Pomiary Automatyka Kontrola*. Vol. 54, Nr. 12, 2008.
- [2] Clayton C.G.: The measurement of flow liquids and gases using radioactive isotopes. *J. Brit. Nucl. Energy Soc.*, October 1964, 252-268.
- [3] Bendat J.S., Piersol A.G.: *Random data - analysis and measurement procedures*. John Wiley, New York 2000.
- [4] Proakis J.G., Manolakis D.G.: *Digital signal processing*. Macmillan Publishing Company, New York 1992.
- [5] Mesch M., Fritsche R., Kipphan H.: Transit time correlation. A survey on its applications to measuring transport phenomena. *Trans of the ASME*. Vol. 96, series G, No. 4, Dec. 1974, 414 - 420.
- [6] Petryka L. and Oszejec J.: The cross-correlation method of solid particle velocity measurements in industry. *Nuclear Geophysics* Vol. 7, No. 2, 1993, 323 - 333.
- [7] Petryka L., Zych M., Murzyn R.: Nonstationary two phase flow evaluation by radioisotopes. Tracers and tracing methods, *Proc. of third intern. conf.*, Ciechocinek 22 - 24 June 2004, 34-39.
- [8] Beck M.S., Płaskowski A.: *Cross-correlation flowmeters*. Adam Hilger, Bristol 1987.
- [9] Hanus R.: Statystyczne błędy estymacji czasu opóźnienia przy zastosowaniu fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 12/2006, 10-13.
- [10] Piersol A. G.: Time delay estimation using phase data. *IEEE Transactions on ASSP*, Vol. 29, No. 3, June 1981.
- [11] Halliday D.M. et al: A framework for the analysis of mixed time series. *Prog. Biophys. Molec. Biol.* Vol. 64, No 2/3, 1995, 237-278.
- [12] Wyrażanie niepewności pomiaru - przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.