

Zastosowanie klasycznej analizy widmowej do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego ciecz-gaz w rurociągu

Streszczenie. Artykuł przedstawia propozycję zastosowania absorpcji promieniowania gamma i funkcji wzajemnej gęstości widmowej rejestrowanych sygnałów do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego ciecz-gaz w rurociągu poziomym. Przedstawiono przykładowe wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w zamknięte izotopy ²⁴¹Am i sondy scyntylacyjne z kryształami NaI(Tl).

Abstract. This article presents a proposal of use the gamma absorption and the cross-spectral density function of recording signals to identify a pattern of liquid-gas flow in a horizontal pipeline. For illustration of the proposed method, results of experiments performed on a laboratory stand equipped in ²⁴¹Am isotopes and scintillation probes with NaI(Tl) crystals are presented. (**Application of classical spectral analysis to identify the structure of liquid-gas two-phase flow in a pipeline**)

Słowa kluczowe: Przepływ dwufazowy, Identyfikacja struktury przepływu, absorpcja promieniowania gamma,.

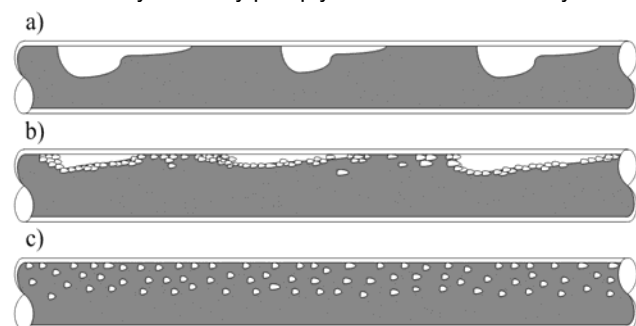
Keywords: Two-phase flow, flow structure identification, gamma-ray absorption, cross-spectral density function.

Wstęp

Przepływy dwufazowe występują najczęściej w takich dziedzinach przemysłu, jak np. petrochemia, energetyka, przetwórstwo chemiczne oraz spożywcze. Szczególnym przypadkiem są przepływy ciecz-gaz, gdzie ta sama objętość gazu może być transportowana w różny sposób, decydujący o jakości procesu. Stąd potrzeba rozwijania metod pomiaru (szczególnie bezkontaktowych) oraz matematycznego opisu takich przepływów.

Obecnie w badaniach przepływów dwufazowych stosuje się coraz częściej takie techniki jak tomografia (np. rezystancyjna, pojemnościowa, promieniowania X), przepływomierze Coriolisa oraz metody optyczne i radioizotopowe. Te ostatnie wykorzystywane są przez autorów artykułu w badaniach przepływów ciecz-gaz i ciecz-cząstki stałe. Rejestrowane w tego typu pomiarach sygnały mogą być analizowane zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości w celu wyznaczenia prędkości i natężenia oraz rozpoznania typu przepływu.

Różnorodność obserwowanych form transportu fazy gazowej przez ciecz w rurociągu poziomym obejmuje umownie siedem przypadków [1]. Na rysunku 1 przedstawiono trzy struktury przepływu analizowane w artykule.



Rys. 1. Wybrane struktury przepływów ciecz-gaz w rurociągu poziomym: a) tłokowy, b) rzutowy, c) pęcherzykowy

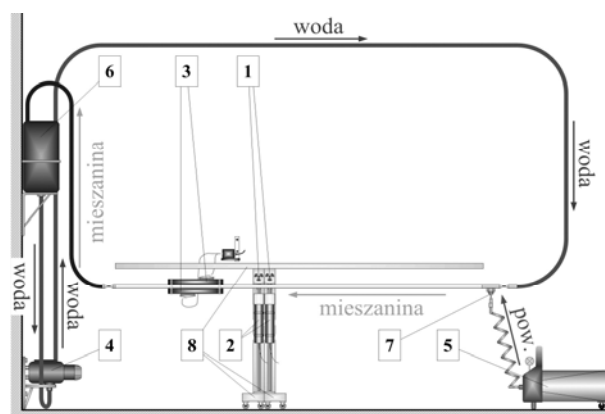
W literaturze przedstawia się metody rozpoznawania struktury przepływu oparte na tomografii lub innych zaawansowanych metodach analizy sygnałów, począwszy od klasycznej analizy widmowej przez transformaty falkową i Hilberta-Huanga po sztuczne sieci neuronowe, logikę rozmytą oraz systemy ekspertowe [2-8].

W artykule wykorzystano ultradźwiękowy pomiar natężenia i prędkości przepływu cieczy oraz absorpcję promieniowania gamma do określania prędkości transportu

fazy gazowej. Zaproponowano identyfikację struktur przepływu na podstawie rozkładu funkcji wzajemnej gęstości widmowej (ang. cross-spectral density function, CSDF) sygnałów otrzymywanych z sond scyntylacyjnych.

Stanowisko laboratoryjne

W pracy wykorzystano wyniki zarejestrowane podczas przepływu mieszaniny gaz-ciecz w instalacji, zbudowanej w Pracowni Radiometrii Przemysłowej Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie [9, 10]. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 2.



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

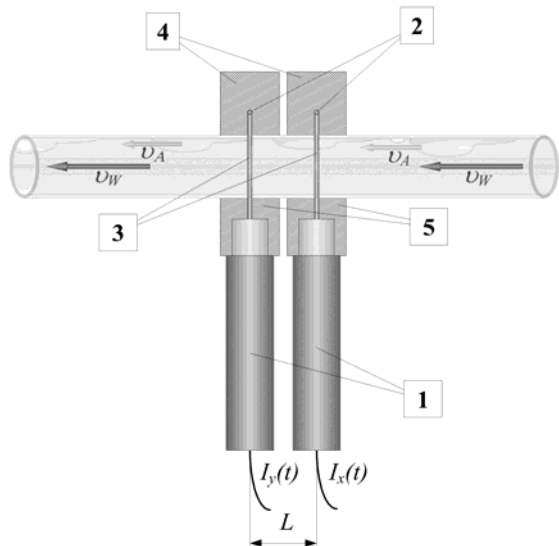
Część pomiarowa instalacji składa się z przezroczystej rury z metapleksu o długości 4,5 m i średnicy wewnętrznej 30 mm, do której za pomocą rotacyjnej pompy 4 tłoczona jest woda oraz powietrze z kompresora 5 poprzez dyszę powietrza 7. Uzyskana w ten sposób mieszanina dwufazowa przepływa przez odcinek pomiarowy i kierowana jest do zbiornika odpowietrzającego 6. Pomiar prędkości powietrza oraz określenie struktury transportu gazu umożliwiał układ składający się z dwóch liniowych źródeł promieniowania 1 o aktywności 100 mCi i energii promieniowania γ - 59,5 keV oraz dwóch detektorów scyntylacyjnych 2 z kryształami NaI(Tl). Zestawy pomiarowe zamocowano na specjalnych wózkach 8, co pozwala na przesuwanie źródeł i sond wzdłuż rurociągu

oraz na zmianę odległości między zestawami. Do pomiaru przepływu wody wykorzystano przepływomierz ultradźwiękowy 3 Uniflow 990. Pompa rotacyjna 4, sterowana falownikiem, pozwala na regulację prędkości obrotowej w zakresie 1000 – 2800 obr/min, umożliwiając uzyskanie prędkości przepływu wody w zakresie 0,5 – 2,5 m/s. Akwizycja danych odbywa się przy zastosowaniu dedykowanej karty liczników, podłączanej do komputera poprzez złącze USB.

Przezroczysty odcinek pomiarowy rurociągu pozwala nie tylko na obserwację charakteru przepływu mieszaniny woda-powietrze, lecz także na wykonywanie dodatkowej dokumentacji fotograficznej.

Metoda absorpcji promieniowania gamma w badaniach przepływów dwufazowych w rurociągu

Stosowana w artykule metoda wykorzystuje absorpcję promieniowania gamma w przepływającej mieszaninie [11 - 14]. Idea pomiaru została przedstawiona na rys. 3. Zamknięte źródła promieniotwórcze 2, umieszczone w odległości L od siebie (w badaniach stosowano $L = 97$ mm), emitują promieniowanie γ , którego wiązki 3 są kształtowane przez kolimatory 4. Wiązki fotonów przechodząc przez rurociąg ulegają częściowemu osłabieniu w przepływającej mieszaninie i trafiają do sond scyntylicyjnych 1 przez kolimatory 5.



Rys. 3. Idea analizy przepływu mieszaniny ciecz-gaz metodą absorpcji promieniowania gamma: 1 – sonda scyntylicyjna, 2 – źródło promieniowania gamma, 3 – wiązka promieniowania, 4 – kolimator źródła, 5 – kolimator detektora

Uzyskiwane na wyjściach sond scyntylicyjnych przebiegi impulsowe $I_x(t)$, $I_y(t)$ określają zmiany natężenia promieniowania, które są związane ze zmianą składu przepływającej mieszaniny. Analiza sygnałów z sond pozwala na określanie prędkości przepływu fazy rozproszonej (w tym przypadku gazu v_A), wyznaczanie jej koncentracji oraz rozpoznawanie struktury przepływu.

Klasyczna analiza widmowa sygnałów z sond scyntylicyjnych

Impulsy $I_x(t)$ i $I_y(t)$, zliczane w zadanym okresie próbkowania Δt (w omawianym przypadku $\Delta t = 1$ ms) tworzą dyskretne sygnały pomiarowe $x(n)$ oraz $y(n)$. Są one przebiegami stochastycznymi, dla których w dziedzinie częstotliwości określa się gęstość widmową mocy (ang. autospectral density function, ASDF) oraz wzajemną gęstość widmową CSDF. Wyznaczane w praktyce (dla zakresu częstotliwości $0 < f < \infty$) jednostronne ASDF $G_{xx}(f)$ i CSDF $G_{xy}(f)$ można przedstawić wzorami [15]:

$$(1) \quad G_{xx}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau,$$

$$(2) \quad G_{xy}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau,$$

gdzie $R_{xx}(\tau)$ i $R_{xy}(\tau)$ to odpowiednio funkcje autokorelacji i korelacji wzajemnej, f – częstotliwość, τ – opóźnienie.

Do wyznaczania gęstości widmowych stosuje się najczęściej szybką transformatę Fouriera bezpośrednio do dyskretnych próbek sygnałów $x(n)$ oraz $y(n)$.

Ponieważ wzajemna gęstość widmowa jest wielkością zespoloną, w praktyce wykorzystuje się moduł i fazę tej funkcji:

$$(3) \quad |CSDF| = \left\{ \text{Re} \left[G_{xy}(f) \right]^2 + \text{Im} \left[G_{xy}(f) \right]^2 \right\}^{0,5},$$

$$(4) \quad \arg(CSDF) = \arctg \left\{ \text{Im} \left[G_{xy}(f) \right] / \text{Re} \left[G_{xy}(f) \right] \right\}.$$

W przepływach mieszanin fazę CSDF można wykorzystać do pomiaru średniej prędkości składnika rozproszonego [16, 17], jednak najczęściej stosuje się w tym celu metodę korelacji wzajemnej. Dodatkowo rozkład CSDF może być przydatny przy doborze filtrów pasmowych, stosowanych do filtracji sygnałów pomiarowych [13, 18].

Gęstości widmowe można wykorzystać również do rozpoznawania struktury przepływu ciecz-gaz. W literaturze najczęściej używa się w tym celu ASDF [2], jednak zdaniem autorów lepsze rezultaty można uzyskać stosując moduł wzajemnej gęstości widmowej |CSDF|.

Zastosowanie |CSDF| do identyfikacji struktury przepływu – przykładowe wyniki

Do zilustrowania proponowanej metody wykorzystano transport powietrza przez wodę, gdy średnia przekrojowa koncentracja objętościowa fazy gazowej w mieszaninie wynosiła około 0,3. Wówczas zmiana prędkości wody v_W pozwoliła na otrzymanie niżej wymienionych przepływów w rurociągu pomiarowym oznaczonych na rysunku 4 literami od a do c:

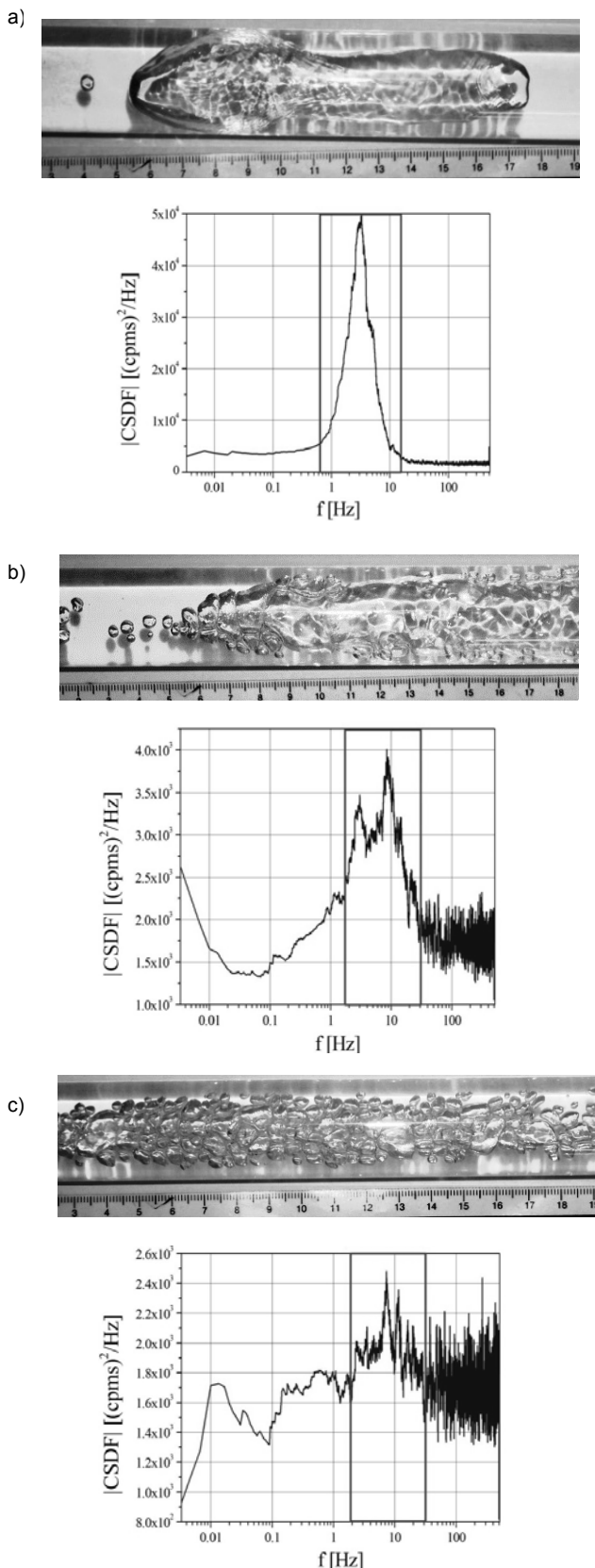
- $v_W = 0,5 \div 1,0$ m/s – przepływ tłokowy,
- $v_W = 1,0 \div 1,6$ m/s – przepływ rzutowy,
- $v_W = 1,6 \div 2,5$ m/s – przepływ pęcherzykowy.

Do prezentowanej analizy wykorzystano własne oprogramowanie „Convolution”. Umożliwiło ono ustalenie zakresu harmonicznych najlepiej reprezentujących transport fazy gazowej. Obszar ten został zaznaczony ramką na rysunku 4, pokazującym wyznaczone rozkłady |CSDF| dla analizowanych przepływów. Przytoczone eksperymenty pokazują jak sfotografowany przepływ jest reprezentowany przez wzajemne gęstości widmowe rejestrowanych sygnałów. Ponadto rysunki ilustrują, jak forma transportu fazy gazowej wpływa na kształt całego rozkładu widma oraz stosunek wybranego ramką zakresu częstotliwości do pozostałych obszarów |CSDF|. Prędkości wody v_W oraz powietrza v_A dla poszczególnych przypadków podano w opisie pod rysunkiem.

Podsumowanie

W pomiarach przepływu ciecz-gaz metodą absorpcji promieniowania gamma można wykorzystać moduł i fazę wzajemnej gęstości widmowej sygnałów z sond scyntylicyjnych. Analiza rozkładu |CSDF| pozwala rozstrzygnąć o sposobie transportu fazy gazowej mieszaniny. Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że badanie rozkładu |CSDF| jest korzystniejsze niż ASDF ze

względu na lepsze dostosowanie do absorpcyjnych badań przepływów. Autorzy kontynuują prace nad rozwojem prezentowanej metody i dostosowaniem jej do sterowania procesami przepływowymi mieszanin.



Rys. 4 Zdjęcia (widok z góry) struktur przepływu i odpowiadające im wykresy |CSDF|: a) przepływ tłokowy: $v_W = 0,90$ m/s, $v_A = 0,710$ m/s; b) przepływ rzutowy: $v_W = 1,36$ m/s, $v_A = 1,066$ m/s; c) przepływ pęcherzykowy: $v_W = 1,92$ m/s, $v_A = 1,446$ m/s

LITERATURA

- [1] Dziubiński M., Prywer J. *Mechanika płynów dwufazowych*. WNT, Warszawa 2010
- [2] Liebenberg L., Meyer J.P., The characterization of flow regimes with power spectral density distributions of pressure fluctuations during condensation in smooth and micro-fin tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, (2006), 127–140
- [3] Hao Ding, Zhiyao Huang, Zhihuan Song, Yong Yan, Hilbert–Huang transform based signal analysis for the characterization of gas–liquid two-phase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 18, (2007), 37–46
- [4] Elperin T., Klochko M., Flow regime identification in a two-phase flow using wavelet transform. *Experiments in Fluids*, Vol. 32, (2002), 674–682
- [5] Rosa E.S., Salgado R.M., Ohishi T., Mastelari N., Performance comparison of artificial neural networks and expert systems applied to flow pattern identification in vertical ascendant gas–liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, (2010), 738–754
- [6] Banasiak R., Wajman R., Jaworski T., et al. Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 58, (2014), 1–14
- [7] Rząsa M.R., The measuring method for tests of horizontal two-phase gas–liquid flows, using optical and capacitance tomography. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, (2009), n. 4, 699-707
- [8] Mosorov V., A method of transit time measurement using twin plane electrical tomography. *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, (2006), 753-760
- [9] Petryka L., Zych M., Hanus R.: Stanowisko do badań metod pomiaru przepływu cieczy w rurociągu. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 54 (2008), n. 12, 863-865.
- [10] Hanus R., Szlachta A., Kowalczyk A., Petryka L., Zych M., Radioisotope Measurement of Two-Phase Flow in Pipeline Using Conditional Averaging of Signal. Proc. 2012 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON 2012, Medina Yasmine-Hammamet, Tunisia, 144-147 (2012)
- [11] Johansen G., Jackson P., Radioisotope gauges for industrial process measurements, Wiley, New York, (2004)
- [12] Yu Z., Qin Cheng B., Richa H., Recognition and measurement in the flow pattern and void fraction of gas-liquid two-phase flow in vertical upward pipes using the gamma densitometer. *Applied Thermal Engineering* Vol. 60 (2013), 398-410
- [13] 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 (2014), Art. ID 012042, doi:10.1088/1742-6596/530/1/012042
- [14] 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
- [15] Bendat J.S., Piersol A.G., *Random data - analysis and measurement procedures*. 4th ed. John Wiley, New York (2010)
- [16] Hanus R., Petryka L., Zych M., Zastosowanie fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy w radioizotopowych pomiarach przepływów dwufazowych w rurociągach. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 58, (2012), n. 3, 236-239
- [17] 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
- [18] Zych M., Petryka L., Kępiński J., Hanus R., Bujak T., Puskarczyk E., Radioisotope investigations of compound two-phase flows in an open channel, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 35, (2014), 11–15

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, AGH 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, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: Leszek.Petryka@fis.agh.edu.pl.