

**Henryk FIDOS<sup>1</sup>, Piotr DOMAGALSKI<sup>1</sup>, Paweł FIDEREK<sup>2</sup>, Marek DZIUBIŃSKI<sup>1</sup>**

e-mail: henryk.fidos@p.lodz.pl

<sup>1</sup> Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź<sup>2</sup> Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Elektrotechniki Elektroniki i Automatyki, Politechnika Łódzka, Łódź**Zastosowanie przetworników optoelektronicznych do sterowania przepływem dwufazowym mieszanin ciecz-gaz****Wstęp**

Sterowanie procesami przepływowymi wymaga wiedzy o parametrach zachodzącego aktualnie przepływu. W przypadku jedno-fazowych przepływów cieczy niezbędnymi wielkościami, jakich wartości musimy znać, aby sterować przepływem będą: strumień przepływającej cieczy oraz w pewnych przypadkach ciśnienie w rurociągu. Są to wielkości stosunkowo łatwe do zmierzenia. Sytuacja komplikuje się w przypadku, gdy mamy do czynienia z przepływami wielofazowymi. Parametrów przepływu wielofazowego mieszanin ciecz-gaz, niezbędnych do pełnego scharakteryzowania przepływu, jest znacznie więcej. W pracy przedstawiono możliwości systemu sterowania przepływem wielofazowym mieszanin ciecz-gaz, oparte-go na wykorzystaniu przetworników optoelektronicznych.

**Charakteryzowanie przepływu dwufazowego**

Strumień przepływającej mieszaniny dwufazowej ciecz-gaz może być wstępnie scharakteryzowany w oparciu o takie wielkości, jak prędkości pozorne faz, wyznaczane w oparciu o ich strumienie wlotowe. Do scharakteryzowania strumienia przepływającej w rurociągu mieszaniny niezbędna będzie wiedza o wartości średniego, bądź lokalnego udziału faz, gdyż lokalny skład obu faz w rurociągu będzie inny niż na jego wlocie. Dla uzyskania pełnej wiedzy o zachodzącym przepływie istotne jest także scharakteryzowanie rodzaju przepływu, który zależeć będzie nie tylko od geometrii przewodu i natężeń przepływu obu faz, ale także od wartości parametrów fizykochemicznych – głównie cieczy. W szeregu przypadków będzie dla nas istotne, jaki rodzaj przepływu zachodzi aktualnie, gdyż zwykle ma to związek z rodzajem procesu, w jakim wykorzystujemy przepływ dwufazowy. Jeśli w trakcie tego procesu zachodzić ma napowietrzanie cieczy, będzie nam zależeć na jak największym rozmiarze powierzchni międzyfazowej i w takich przypadkach staramy się prowadzić przepływ w zakresie ruchu pęcherzykowego. Jeśli natomiast chcemy zmniejszyć spadki ciśnienia podczas przepływu cieczy nienewtonowskiej rozrzedzanej ścinaniem z gazem, staramy się uzyskać przepływ rzutowy.

**Metody on-line pomiarów parametrów przepływu dwufazowego**

Pomiar udziałów faz można zrealizować za pomocą szeregu metod, które w wielu przypadkach nie dają jednak możliwości przeprowadzenia pomiarów on-line. W wielu przypadkach nie jest także możliwe jednoczesne wykorzystanie metody pomiarowej do wyznaczenia większości parametrów struktury przepływu, równoległe z pomiarem udziału faz. Dobrym sposobem jest zastosowanie w tym celu pojemnościowej tomografii procesowej [Wajman i in., 2013; Banasiak i in., 2014], ale metoda ta – umożliwiającą przeprowadzenie pomiarów i oszacowanie parametrów struktury w czasie rzeczywistym, jest bardzo kosztowna. Warto zaznaczyć, że jest to metoda w pełni bezinwazyjna. Istnieje także możliwość zastosowania tomografii optycznej [Rahim, 2005; Mosorow, 2006]. Działanie tej metody polega na tym, że na wewnętrznej ścianie przewodu znajdują się usytuowane w tym samym przekroju poprzecznym otwory, w których naprzemiennie umieszczane są elementy optoelektroniczne: diody laserowe jako elementy wytwarzające strumień świetlny oraz fotodiody. Pewna liczba działających niezależnie i położonych przeciwnie par tych elementów tworzących pojedyncze przetwor-

niki jest połączona z tomografem procesowym. Dostarczane do tomografu sygnały z działających sekwencyjnie przetworników są po ich wzmocnieniu rejestrowane, a z uzyskanych danych rekonstruowane są obrazy przedstawiające obszary zajmowane przez każdą z faz przepływających w przekroju poprzecznym przewodu.

Należy odnotować, że metody wykorzystujące przetworniki optoelektroniczne mogą być stosowane głównie w przypadku badania mieszanin dwufazowych z cieczą nie tłumiącą całkowicie promieniowania w zakresie widzialnym.

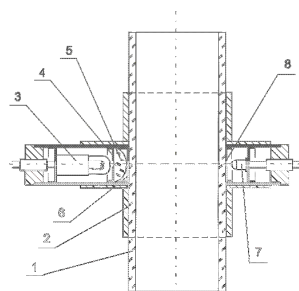
**Zastosowanie przetworników optoelektronicznych**

Metodą nie kosztowną, której zastosowanie może w pewnych przypadkach zastąpić drogi sprzęt tomograficzny, jest metoda oparta na zastosowaniu pojedynczych przetworników optoelektronicznych. Badania przepływów dwufazowych prowadzone na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej [Dziubiński i in., 2003; Fidos i Sowiński, 2006] udowodniły w pełni jej przydatność do charakteryzowania rodzaju przepływu i do pomiaru wartości parametrów struktury przepływu dwufazowego. Badania prowadzone były w rurociągach pionowych, w których w przypadku najczęściej wykorzystywanych przemysłowo rodzajach przepływu występuje symetria osiowa przepływających struktur, ale można je również zastosować do przepływów w przewodach poziomych. Metoda może być całkowicie bezinwazyjna, ale jak stwierdzono podczas badań, bardziej precyzyjne wyniki można otrzymać stosując czujniki niewielkich rozmiarów, ingerujące w przepływ, umieszczone wewnątrz rurociągu, co w bardzo niewielkim – wręcz niezauważalnym stopniu wpływa na zakłócenia przepływu i nie wprowadza istotnych błędów pomiaru.

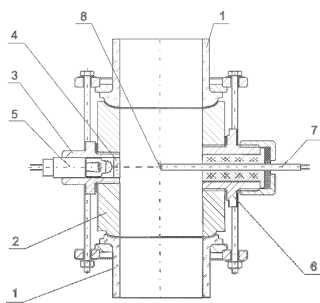
**Konstrukcja przetworników optoelektronicznych**

Konstrukcja przetworników oparta jest na wykorzystaniu elementów światłoczułych – fotodiod i fototranzystorów, które mierzą intensywność zwartej wiązki światła, prześwietlającego rurociąg. Podczas prowadzonych badań wykorzystywano dwa rodzaje przetworników – rys. 1 i 2. Przetworniki pierwszego rodzaju były instalowane na zewnętrznej powierzchni przezroczystego rurociągu. Przetworniki drugiego rodzaju posiadały fototranzystory o bardzo małej średnicy (2 mm) umieszczone w cienkościennych rurkach metalowych i znajdowały się wewnątrz rurociągów, w osi przewodu.

Podczas przepływu przez przetwornik drugiego rodzaju fototranzystor znajdował się bądź w przepływającej aktualnie strukturze gazowej, bądź był zanurzony w cieczy. Zarówno w przypadku przetworników pierwszego, jak i drugiego rodzaju otrzymywano sygnał odpowiadający pojawiającym się naprzemiennie w rurociągu struk-



Rys. 1. Konstrukcja przetworników pierwszego rodzaju:  
1 – szklana sekcja pomiarowa, 2 – oprawa, 3 – żarówka, 4, 6, 8 – przesłona, 5 – soczewka, 7 – fotodiody

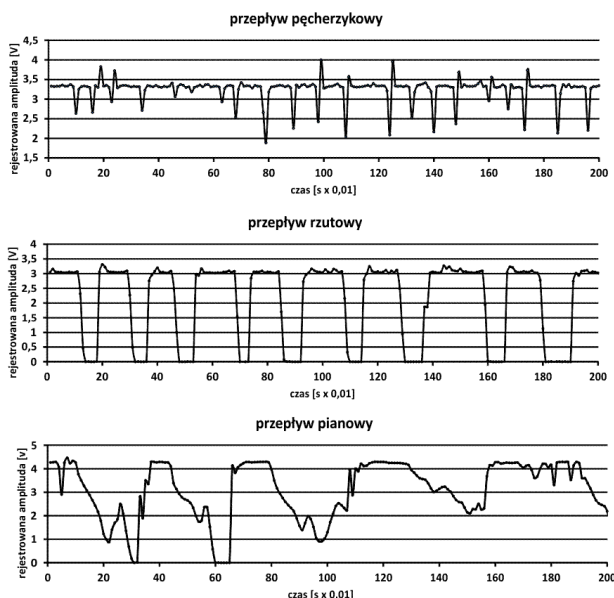


Rys. 2. Konstrukcja przetwornika drugiego rodzaju: 1 – szklane sekcje rurociągu, 2 – pierścienie metalowy, 3 – oprawa żarówki, 4 – przezroczysta zaślepka, 5 – żarówka, 6 – oprawa czujnika, 7 – rurka metalowa, 8 – fototranzystor

turom obu faz mieszaniny – rys. 3. Przedstawione wykresy przedstawiają sygnały zarejestrowane w ten sposób, że maksymalne wartości amplitud odpowiadają stanom całkowitego zalania rurociągu cieczą.

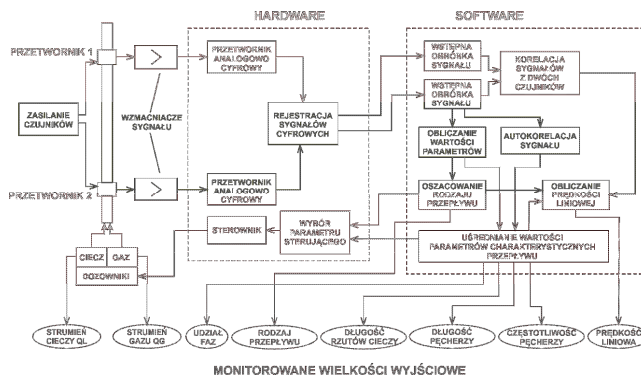
### Przetwarzanie danych eksperymentalnych

Sygnały z przetworników – rejestrowane przez system akwizycji danych eksperymentalnych, w skład którego wchodziły przetworniki analogowo-cyfrowe, można było przedstawiać w postaci oscylogramów cyfrowych – wykresów wykreślanych w oparciu o rejestrowane w bardzo małych przedziałach czasowych dane dyskretne. Surowe wyniki pomiarów były zapisywane w plikach tekstowych, co stwarzało możliwość ich natychmiastowej obróbki w celu określenia charakterystycznych parametrów przepływu. Ze względu na fakt prowadzenia pomiarów *on-line* i uzyskiwania wyników obróbki sygnałów niemal w czasie rzeczywistym (opóźnienie wynika jedynie z szybkości przetworzenia odpowiedniej ilości danych przez komputer i jest niewielkie), obliczane wartości parametrów przepływu dwufazowego – po ewentualnym przetworzeniu danych cyfrowych na sygnał analogowy – można z powodzeniem wykorzystać do monitorowania aktualnych parametrów przepływu oraz do sterowania przepływem w przypadku prowadzenia zautomatyzowanych procesów przepływowych.



Rys. 3. Przykładowe oscylogramy mierzonych sygnałów

Schemat blokowy systemu przetwarzania sygnałów mierzonych przez przetworniki optoelektroniczne przedstawiony jest na rys. 4. Uzyskiwanymi wielkościami, charakteryzującymi strukturę przepływu dwufazowego są: długości rzutów cieczy, długości pęcherzy gazowych, uśrednione wartości częstości przepływu pęcherzy gazowych oraz prędkość liniowa przepływu pęcherzy. W oparciu o znajomość tych parametrów można w pierwszym przybliżeniu oszacować wartość udziału każdej z faz.



Rys. 4. Schemat blokowy systemu przetwarzania sygnałów

### Określanie rodzaju przepływu

Wszystkie wyznaczone parametry charakterystyczne przepływu dwufazowego tworzą specyficzny wektor, opisujący dany rodzaj przepływu dwufazowego. Można zatem uznać, że każdy wyznaczony parametr jest cechą określonego rodzaju przepływu dwufazowego. Rodzaj przepływu dwufazowego jest zatem obiektem w *n*-wymiarowej przestrzeni cech, a jego współrzędne są zapisane w wektorze określających go parametrów.

Zgodnie z powyższym podejściem, aby prawidłowo rozpoznać rodzaj przepływu dwufazowego, należy wyznaczyć wektory parametrów charakterystycznych dla przepływów wzorcowych. Przepływy wzorcowe powinny być wybierane w sposób ekspercki, a ich rodzaj powinien być jednoznacznie określony przez eksperta z dziedziny rozpoznawania przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz. Obiekty reprezentujące poszczególne przepływy wzorcowe powinny zostać umieszczone w *n*-wymiarowej przestrzeni cech, tworząc w ten sposób skupiska (klasy) reprezentujące poszczególne rodzaje przepływów dwufazowych na wzór popularnych map przepływów.

Ostatnim etapem rozpoznawania rodzaju przepływu powinno być porównanie położenia analizowanego przepływu w przestrzeni cech z położeniem przepływów wzorcowych. Narzędziami służącymi do tego typu analizy są klasyfikatory. Dopuszczają się użycie różnego rodzaju klasyfikatorów, których działanie różni się od siebie dokładnością (precyzją) lub złożonością obliczeniową i ilością zasobów potrzebnych do ich implementacji. Podstawowym klasyfikatorem rekomendowanym do powyższej analizy jest klasyfikator *k*-najbliższych sąsiadów (knn). Zasadniczym wyzwaniem związanym z użyciem powyższego narzędzia jest wyznaczenie metody pomiaru odległości między obiektami w przestrzeni cech [Gentle, 2004]. Metodą zalecaną jest użycie zależności

$$D_{id} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{dj} - V_{ij})^2} \quad (1)$$

gdzie:

- $D_{id}$  – odległość pomiędzy analizowanym przepływem, a przepływem wzorcowym,
- $n$  – rozmiar wektora cech charakterystycznych,
- $V_{ij}$  – *j*-ty element wektora cech definiujących rodzaj przepływu wzorcowego
- $X_{dj}$  – *j*-ty element wektora cech charakterystycznych, opisującego badany przepływ.

Kolejnym etapem algorytmu klasyfikacji jest wyznaczenie odległości między analizowanym przepływem umieszczonym w przestrzeni cech, a wszystkimi przepływami wzorcowymi. W następnym kroku należy przeanalizować *n* przepływów wzorcowych położonych najbliżej analizowanego przepływu po kącie ich rodzaju. W zależności od tego, czy wszyscy najbliżsi sąsiedzi są jednego, czy różnych rodzajów, można stwierdzić że analizowany przepływ ma ten sam rodzaj, jaki mają wszyscy sąsiedzi lub wykazuje cechy wspólne z kilkoma rodzajami przepływu (jest przepływem przejściowym).

### Obliczanie podstawowych parametrów charakterystycznych przepływu pęcherzykowego i rzutowego

W przypadku pomiarów prowadzonych w zakresie przepływu rzutowego zarejestrowane sygnały zawierają informację nie tylko o pojawianiu się dłuższych pęcherzy gazowych, których parametry mają być uzyskane, ale zawierają także składową będącą wynikiem obecności drobnitkich pęcherzyków w *ogonach* pęcherzy gazowych. W tym przypadku należy więc wstępnie obrobić sygnały, przeprowadzając ich dyskryminację na pewnym poziomie, aby uzyskać wartości pozwalające prawidłowo oszacować parametry dłuższych pęcherzy i następujących po nich rzutów cieczy oraz usunąć ewentualne zakłócenia będące wynikiem powstawania refleksów świetlnych w układzie optycznym.

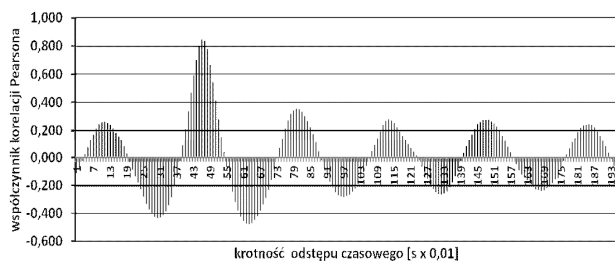
Obliczenie wartości podstawowych parametrów charakterystycznych przepływu dwufazowego (uśrednionych w zadanym przedziale czasowym) umożliwiając niezbędne algorytmy. W oparciu o obliczone wartości można wyznaczyć okresy trwania poszczególnych struktur, a następnie obliczyć ich długości. Wszystkie oszacowane wartości są uśredniane, co daje podstawę do obliczenia średniej częstotliwości pojawiania się struktur w przekroju poprzecznym przewodu.

#### Obliczanie prędkości liniowej przepływu pęcherzy

W przypadku, gdy wymagane jest obliczenie wartości prędkości liniowej, z jaką przepływają pęcherze, niezbędne jest zastosowanie algorytmu umożliwiającego porównanie kształtu tej samej struktury (pęcherza, czy rzutu cieczy) zarejestrowanej niezależnie przez dwa przetworniki umieszczone na rurociągu w różnych miejscach w precyzyjnie zmierzonej wzajemnej odległości od siebie. Należy dokonać krzyżowej korelacji sygnałów zarejestrowanych przez dwa przetworniki. Wynik przykładowej korelacji ocenianej za pomocą współczynnika *Pearsona* przedstawiony jest na rys. 5. Maksimum na tym wykresie potwierdza najlepszą korelację obu przebiegów, która ma miejsce w odstępie czasowym wynikającym z pomnożenia wartości na osi x, przy której występuje maksimum przez wartość odstępu czasowego między dwoma kolejnymi pomiarami. Znajomość przesunięcia czasowego i dystansu między przetwornikami pozwala na wyznaczenie liniowej prędkości przepływu.

Przedstawiony przykład dotyczy badań wykonanych w zakresie przepływu rzutowego. W tym przypadku nie ma problemów z właściwą oceną prędkości przepływu. Korelacja sygnałów zarejestrowanych w tym zakresie zawsze wykazuje istnienie pojedynczego maksimum o wartości zdecydowanie wyższej niż pozostałe, pojawiające się harmonicznie maksima lokalne.

Podobnie jest w przypadku przepływu pęcherzy, których przekrój poprzeczny nie wypełnia całkowicie przekroju poprzecznego przewodu. Dlatego oszacowania prędkości liniowej pęcherzy można dokonać dopiero po przeprowadzeniu oceny rodzaju przepływu. Nie jest możliwe za pomocą tego sposobu analizy sygnału wyznaczenie prędkości liniowej w ruchu drobnopęcherzykowym, pianowym, pierścieniowym i pierścieniowo-mgłowym.



Rys. 5. Przykładowa korelacja sygnałów zarejestrowanych przez dwa czujniki (przepływ rzutowy)

#### Szacowanie udziałów faz

W oparciu o wartości amplitud badanych sygnałów można oszacować wartości udziałów faz – oczywiście przy założeniu, że powstające struktury przepływu są symetryczne, co w przybliżeniu ma

miejsce podczas przepływu pęcherzykowego rzutowego i pierścieniowego. Określenie wartości udziałów faz w przepływie w rurociągach poziomych, gdzie powstające struktury nie są osiowo symetryczne, wymaga pionowego ukierunkowania wiązki światła, przy czym źródło światła powinno być umieszczone w dolnej części przewodu. Przetworniki drugiego rodzaju są w tej sytuacji mniej przydatne. Najlepszym rozwiązaniem zastosowania przetwornika drugiego rodzaju byłoby umieszczenie w tym przypadku fototranzystora na górnej ściance przewodu i oświetlenie go od spodu diodą laserową, wytwarzającą zwartą wiązkę promieniowania. Należy też stosować tutaj przetworniki, których działanie polega na wytwarzaniu sygnału proporcjonalnego do natężenia wiązki świetlnej tłumionej przez warstwę cieczy.

### Wnioski

Przedstawione sposoby oszacowania parametrów przepływu dwufazowego mieszanin ciec-z-gaz bazujące na danych eksperymentalnych uzyskanych podczas badań przepływu przy użyciu przetworników optoelektronicznych pozwalają uzyskać wartości tych podstawowych parametrów przepływu (w tym parametrów jego struktury), które mogą być użyteczne do monitorowania parametrów instalacji, w której zachodzi przepływ dwufazowy oraz do sterowania przepływem.

Prosta konstrukcja przetworników optoelektronicznych daje możliwość częściowego zastąpienia bardzo drogich urządzeń umożliwiających przeprowadzenie badań *on-line*, jakimi są czujniki tomografii procesowej i współpracujące z nimi urządzenia. Proponowane rozwiązanie nie zastępuje w pełni urządzeń wykorzystujących tomografię procesową, ale takie zalety, jak prosta konstrukcja i zdecydowanie niższy koszt rekompensować mogą to rekompensować.

Proponowane rozwiązanie daje możliwość rozpoznawania struktur przepływu w całym zakresie możliwych do zastosowania zmian wejściowych strumieni cieczy i gazu oraz pełnego sterowania przepływem w zakresie przepływu uporządkowanego (przepływu pojedynczych pęcherzy oraz przepływu rzutowego). Oznacza to, że istnieje możliwość doboru parametrów sterujących w taki sposób, aby osiągać nie tylko określony rodzaj przepływu, ale także w ramach zachodzącego przepływu uporządkowanego, np. rzutowego, uzyskiwać określoną proporcję (udział) faz.

### LITERATURA

- Wajman, Fiderek P., Fidos H., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D., Banasiak R., 2013. Metrological evaluation of a 3D electrical capacitance tomography measurement system for two-phase flow fraction determination. *Meas. Sci. Technol.*, **24**, 065302. DOI: 10.1088/0957-0233/24/6/065302
- Banasiak R., Wajman R., Jaworski T., Fiderek P., Fidos H., Nowakowski J., Sankowski D., 2014. Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy logic classification. *Int. J. Multiphase Flow*, **58**, 1-14. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.07.003
- Rahim, R. Abdul, et al., 2005. A hardware development for optical tomography system using switch mode fan beam projection. *Sensors and Actuators A: Physical* 120.1, 277-290. DOI:10.1016/j.sna.2004.11.038
- Mosorow W., Sankowski D., Mohd Zain Rasif., 2006. A dual modality reconstruction algorithm for optical and electrical capacitance tomography. *Automatyka*, 2006, **10**, nr 2, 95-202
- Dziubiński M., Fidos H., Sosno M., 2003. Określanie parametrów charakterystycznych przepływu rzutowego mieszaniny wielofazowej. *Inż. Ap. Chem.*, **42**, nr 5s, 55-56
- Fidos H., Sowiński J., 2006. Wpływ własności reologicznych cieczy na wartości parametrów charakterystycznych przepływu rzutowego mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz w przewodach pionowych. *Inż. Ap. Chem.*, 45, nr 6s, 66-67
- Gentle J. E., 2007. *Matrix algebra: theory, computations, and applications in statistics*. Springer-Verlag. ISBN: 0-387-70872-3

Praca była współfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2012/05/D/ST8/02389