

Wojciech BŁOTNICKI, Witold ILEWICZ, Grzegorz PYRZ
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice

Wyznaczanie czasu przejścia w znacznikowej metodzie pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym

Mgr inż. Wojciech BŁOTNICKI

Ukończył studia na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej uzyskując dyplom na kierunku Automatyka i Robotyka – w zakresie specjalności systemy pomiarowe (2007). Student trzeciego roku studiów doktoranckich na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. W swoich pracach zajmuje się pomiarami strumienia płynu metodami znacznikowymi.



e-mail: wojciech.blotnicki@polsl.pl

Dr inż. Witold ILEWICZ

Ukończył studia na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w 1996 r. Stopień doktora uzyskał w 2004 r. Pracuje jako adiunkt w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół algorytmów analizy złożonych sygnałów chromatograficznych i ich automatyzacji. Członek Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach.



e-mail: witold.ilewicz@polsl.pl

Streszczenie

W metodzie czasu przejścia dokonuje się krótkotrwałej iniekcji znacznika, a następnie rejestruje się rozkład stężenia znacznika w dwóch punktach pomiarowych rozmieszczonych w znanej odległości. Z otrzymanych rozkładów stężeń oblicza się czas przejścia medium pomiędzy punktami pomiarowymi, a następnie prędkość strugi. W przypadku, gdy sygnały pochodzące z sond są znacznie zaszumione metody wyznaczania czasów charakterystycznych podane w normie ISO 2975 dają wyniki o małej powtarzalności. Autorzy zaproponowali nową metodę wyznaczania czasów charakterystycznych, która pozwoliła na zwiększenie powtarzalności wyników pomiarów prędkości metodą czasu przejścia.

Słowa kluczowe: pomiar strumienia objętości, metody znacznikowe, czas przejścia znacznika.

Determination of the transit time in the tracer method of open channel flow measurement

Abstract

The tracer method of channel flow measurement depends on the injection of the short lasted tracer to the medium in the channel. The transit time of the tracer is measured when the concentration distribution of the tracer in two measurement points placed in the known distance is registered. From the given concentration distribution the transit time between measurement points of the medium can be calculated and then the water velocity. In the case when the signals coming from the probes are "significantly with noise", methods for determination characteristic times given by the standard ISO 2975 give results with little repeatability. Authors proposed a new method for determination of the characteristic times. The signals coming from the tracer detectors are approximated to a model (Fig. 1). In this research three different models are used: a Gaussian-type function and two modifications of Gaussian function. The characteristic times are obtained using approximated model of tracers concentration. The transit time, which is the difference between characteristic times, is used to a water velocity determination. This determination way of the transit time allows increased repeatability of the measurement results of velocity, and the value of the flow rate obtained from the method of transit time.

Keywords: flow measurement, tracer methods, transit time.

Mgr inż. Grzegorz PYRZ

Absolwent Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. W 2008 roku uzyskał dyplom na kierunku Automatyka i Robotyka – w zakresie specjalności systemy pomiarowe.



e-mail: grzegorz.pyrz@gmail.com

1. Wstęp

Zgodnie z normą PN-EN 24006 [1] metody znacznikowe definiuje się jako metody pomiaru strumienia objętości wymagające „wtryskiwania i wykrywania znacznika (na przykład substancji chemicznej lub radioaktywnej) w przepływającym płynie”. Zgodnie z powyższą normą znacznikowe metody pomiaru strumienia objętości dzieli się na: metody rozcieńczania (dilution methods) oraz metodę czasu przejścia (transit time method). W niniejszym opracowaniu autorzy opisują problem wyznaczania czasu przejścia znacznika.

Metoda czasu przejścia, zwana też metodą zastrzyku, opiera się na pomiarze czasu przejścia znacznika między dwoma przekrojami poprzecznymi, na podstawie którego wylicza się dalej wartość strumienia objętości płynu. Prawidłowe wyznaczenie czasu przejścia jest jednym z podstawowych warunków otrzymania poprawnego wyniku pomiaru strumienia objętości. Dotychczasowe metody wyznaczania czasu przejścia zdefiniowane w normie ISO 2975 [2] cechowały się stosunkowo małą odpornością na zaszumienie sygnałów pomiarowych pochodzących z detektorów znacznika. Przeprowadzone badania miały na celu opracowanie algorytmu wyznaczania czasu przejścia, który poprawiłby dokładność oraz powtarzalność otrzymywanych wyników pomiaru strumienia objętości.

2. Metoda zastrzyku – klasyczne podejście

Pomiar strumienia objętości metodą zastrzyku polega na rejestracji rozkładów stężeń wstrzykniętego znacznika w dwóch lub więcej punktach pomiarowych umieszczonych w znanej odległości L [1, 3]. Na podstawie otrzymanych rozkładów stężeń znacznika w punktach pomiarowych wyznacza się czas przejścia znacznika Δt , który z kolei jest wykorzystany do wyznaczenia prędkości strugi z wzoru (1):

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

gdzie: L – odległość od miejsca wprowadzenia do miejsca detekcji znacznika lub odległość pomiędzy detektorami, Δt – czas od momentu wprowadzenia do momentu detekcji znacznika, lub czas pomiędzy detekcją sygnału w pierwszym i drugim detektorze.

Strumień objętości oblicza się z wzoru (2):

$$q_V = \frac{k L S}{\Delta t} \quad (2)$$

gdzie: S – pole przekroju strugi, k – współczynnik zdefiniowany wzorem (3).

$$k = \frac{v_s}{v} \quad (3)$$

gdzie: v_s – prędkość średnia po przekroju strugi płynu w kanale otwartym (rurociągu), v – średnia prędkość płynu między detektorami ($v = L/\Delta t$).

Ponadto, aby pomiar strumienia objętości w kanale był wiarygodny, musi być spełniony szereg warunków, takich jak: całkowite wymieszanie znacznika z medium na drodze od iniekcji do pierwszego punktu pomiarowego oraz prawidłowe i dokładne określenie pola przekroju przepływowego w sekcji pomiarowej. Odległość między przekrojami pomiarowymi powinna być tak dobrana, aby uwzględnić fizyczne właściwości zaburzenia oraz długość jego występowania. Zwiększając tę odległość uzyskuje się poprawę dokładności pomiaru czasu, jednak wzrasta rozmycie chmury znacznika, co utrudnia analizę sygnału pochodzącego z detektora [4, 5].

Prawidłowe wyznaczenie czasu przejścia chmury znacznika pomiędzy detektorami ma znaczący wpływ na dokładność wyliczonej wartości strumienia objętości. Sygnały pochodzące z detektorów przyjmują kształt pików, których kształt zależy od takich czynników jak: ilość oraz stężenia wstrzykniętego znacznika, odległość sond od miejsca iniekcji, dokładność wymieszania znacznika, prędkość strugi oraz innych. Na podstawie otrzymanych pików wyznacza się czas przejścia. W klasycznym podejściu czas ten jest wyznaczony za pomocą jednej z metod podanych w normie ISO 2975 [2]:

- czas odpowiadający środkowi ciężkości krzywej,
- czas odpowiadający połowie stężenia krzywej znacznika,
- czas odpowiadający środkowi odcinka równoległego do osi odciętych,
- czas odpowiadający punktowi maksimum stężenia krzywej stężenia.

Metody te są dokładnie opisane oraz wykorzystane w aplikacjach na stanowisku pomiarowym [4, 6, 7]. W pracach [7] i [8] autorzy pokazali, że w przypadku gdy sygnały pochodzące z detektorów są znacznie zaszumione, metody podane w normie ISO 2975 [2] nie zawsze dają satysfakcjonujące wyniki. Zaproponowali oni dwa różne wstępne sposoby modyfikacji sygnałów pochodzących z sond konduktometrycznych. Woldon [8] zaproponował aproksymacje otrzymanych wyników do funkcji wielomianowej drugiego, trzeciego oraz czwartego stopnia, z kolei Pyrz [7] zastosował metodę filtracji wygładzania wielomianowego Savitzky'ego-Golay'a. Oba rozwiązania posiadają pewne wady. Przebieg czasowy stężenia znacznika przechodzącego przez przekrój pomiarowy kształtem przypomina pik, który można aproksymować do krzywej Gaussa, przez co trudno jest do takich danych dopasować wielomian aproksymujący. Błędy powstałe w wyniku aproksymacji do źle dobranej funkcji będą przekładały się na błąd czasu przejścia, a co za tym idzie - błąd pomiaru strumienia objętości. Filtracja metodą Savitzky'ego-Golay'a wygładza przebieg, jednakże może zmienić wielkości charakterystyczne pików, takie jak np. czas maksimum.

3. Wyznaczanie czasu przejścia

Poniższe rozważania zostały doświadczalnie zweryfikowane na stanowisku pomiarowym, które znajduje się w Zakładzie Pomiarów i Systemów Sterowania. Na stanowisku tym modelem kanału otwartego jest poziomo usytuowana rynnna, do której woda doprowadzana jest z instalacji do wzorcowania przepływomierzy wody metodą objętościową. Rozwiązanie to zapewniło możliwość pomiaru odniesienia – za pomocą wywzorcowanych przepływomierzy. W roli znacznika wykorzystano wodny roztwór chlorku sodu (NaCl). Natomiast do jego detekcji użyto pary konduktometrów dedykowanych do pomiaru zasolenia wód i gleby, przy czym dokonano modyfikacji czujników – aby szybciej reagowały na zmiany stężenia. Sygnał z konduktometrów rejestrowany był za pomocą karty pomiarowej DAQ i zapisywany w cyfrowej postaci na dysku komputera.

W ramach tego opracowania autorzy zaproponowali nową metodę wyznaczania czasu przejścia: najpierw aproksymację sygnałów pochodzących z detektorów do modelu pików (np. pochodnych funkcji Gaussa), a następnie wyznaczanie czasów przejścia zgodnie z normą ISO 2975.

3.1. Usunięcie tła

Sygnałem użytecznym, na podstawie którego wyznaczano czas przejścia, był sygnał pochodzący z dwóch konduktometrów przedstawiający przewodność elektryczną wody w dwóch punktach pomiarowych.

Woda w instalacji (bez znacznika) posiada przewodność różną od zera, stąd piki sygnalizujące obecność znacznika nie zaczynają się od zera. Z uwagi na fakt, że część metod podanych w normie ISO 2975 [2] polega na obliczeniu powierzchni pod krzywą stężenia, konieczne jest uwzględnienie poziomu tła. W tym celu sprawdzono dwa sposoby eliminacji tła: obniżenie sygnału do zera oraz odcięcie sygnału na poziomie, który przyjęto jako potrójne odchylenie standardowe sygnału zarejestrowanego dla czystej wody.

Badania przeprowadzone na 9 seriach pomiarowych (każda seria składała się z 10 pomiarów) pokazały, że lepszy efekt – mniejsze odchylenie standardowe dla otrzymywanych czasów przejścia uzyskano dla obniżenia tła do zera. Oprócz mniejszego odchylenia standardowego otrzymanych czasów przejść metoda ta ma jeszcze jedną ważną zaletę – nie tracą się informacje o przebiegu linii zerowej oraz dokładnego czasu zaniku znacznika (tzw. ogona pików). Jednakże w tym przypadku nie jest możliwa (lub daje złe wyniki) aproksymacja otrzymanych przebiegów do funkcji wielomianowej, co w przypadku metody odciążenia było możliwe [8].

3.2. Aproksymacja oraz ocena dopasowania modelu

Kolejny etap to aproksymacja danych pomiarowych (z usuniętym tłem) do modelu pików. W tym opracowaniu autorzy przebadali 3 modele [9]:

- symetryczny pik - funkcja Gaussa opisana wzorem (4):

$$f(x) = h \cdot e^{-\frac{\log 256 \cdot (x-t)^2}{2w^2}} \quad (4)$$

gdzie: h – wysokość pików, t – czas maksimum pików, w – szerokość w połowie wysokości pików.

- wielomianowa modyfikacja funkcji Gaussa opisana wzorem (5):

$$f(x) = h \cdot e^{-\frac{\log 256 \cdot (x-t)^2}{2(w_1+w_2 \cdot x)^2}} \quad (5)$$

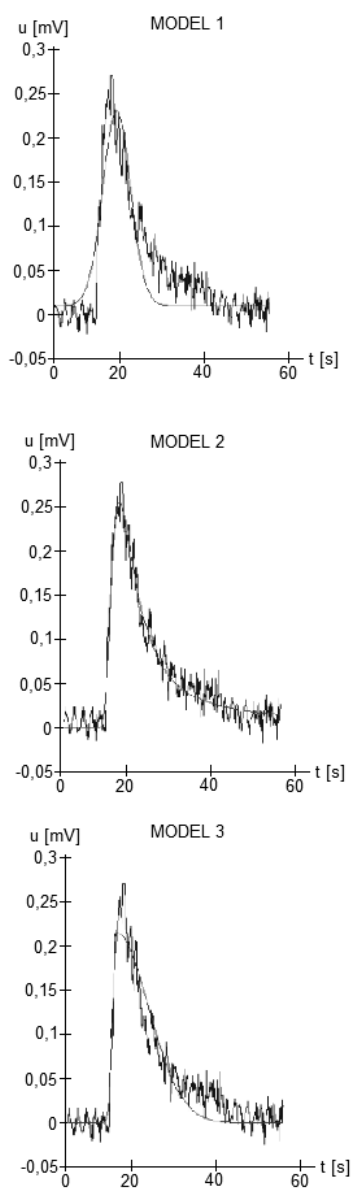
gdzie: h – wysokość pików, t – czas maksimum pików, w_1, w_2 – parametry opisujące szerokość pików.

- asymetryczny pik - złożenie dwóch funkcji Gaussa opisane wzorem (6):

$$f(x) = \begin{cases} h \cdot e^{-\frac{\log 256 \cdot (x-t)^2}{2w_1^2}}, & x \leq t \\ h \cdot e^{-\frac{\log 256 \cdot (x-t)^2}{2w_2^2}}, & x > t \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: h – wysokość pików, t – czas maksimum pików, w_1, w_2 – szerokości pików w połowie wysokości.

Przyjęto trzy kryteria oceny dopasowania danych do zaproponowanych modeli: ocena wzrokowa; porównanie sum kwadratów różnic modelu i danych; analizę sygnału będącego różnicą danych pomiarowych oraz modelu. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki aproksymacji do poszczególnych modeli dla przykładowego zbioru danych (dla jednego pik). Z uwagi na brak symetrii rejestrowanego rozkładu stężenia, model w postaci funkcji Gaussa najgorzej się dopasował do zarejestrowanego przebiegu.



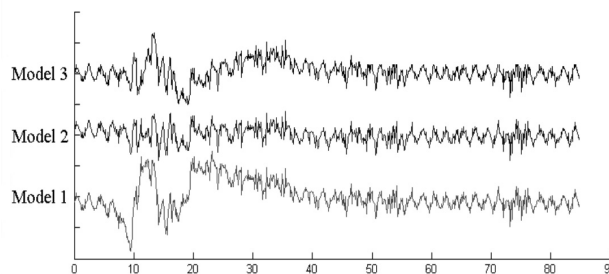
Rys. 1. Aproksymacja zaproponowanych modeli dla przykładowego ciągu danych (1 pik)

Fig. 1. Approximation the proposed models to exemplary data (1 signal)

Innym sposobem oceny dopasowania modelu było policzenie sum kwadratów różnicy sygnału pomiarowego i modelu. Porównanie otrzymanych sum kwadratów różnicy potwierdziło wyniki obserwacji wzrokowej przebiegów i dopasowanych do nich modeli: najlepsze rezultaty uzyskano dla modelu drugiego, natomiast najgorsze dla modelu pierwszego.

Ostatnim kryterium oceny jakości dopasowania modelu do zarejestrowanych sygnałów była analiza sygnału będącego różnicą sygnału zarejestrowanego oraz jego modelu, co przedstawiono na rysunku 2.

Oprócz oceny wzrokowej otrzymanych przebiegów wykonano dla każdego sygnału różnicy test zgodności χ^2 sprawdzający hipotezę, że populacja należy do rozkładu normalnego [10]. Zarówno w przypadku modelu pierwszego jak i trzeciego w znaczącej ilości przypadków hipoteza ta okazywała się nieprawdziwa. Natomiast w przypadku modelu drugiego test χ^2 wykazywał w około 65%, że hipoteza ta była prawdziwa.



Rys. 2. Porównanie sygnałów będących różnicą sygnału pomiarowego i modelu

Fig. 2. Comparison of signal differences of the signal and the model

Wszystkie przeprowadzone doświadczenia mające na celu ocenę jakości dopasowania przedstawionych modeli do przebiegów stężenia znacznika pokazały jednoznacznie, że najlepszym modelem jest model nr 2 (asymetryczna, wielomianowa modyfikacja pik Gaussa). Sygnał resztowy (dla modelu 2), będący różnicą sygnału i jego modelu w ponad połowie wypadków miał rozkład normalny, co potwierdza dobre dopasowanie modelu.

Mimo zadowalającego dopasowania drugiego modelu do danych doświadczalnych autorzy planują przebadать inne dodatkowe modele np.: funkcję gęstości prawdopodobieństwa rozkładu gamma.

3.3. Wyznaczenie czasu przejścia - wyniki

Ostatnim etapem wyznaczenia czasu przejścia jest wybór punktów charakterystycznych pików oraz obliczenie różnicy czasu pomiędzy tymi dwoma punktami charakterystycznymi. W ramach poniższego opracowania autorzy zdecydowali się sprawdzić punkty charakterystyczne podane przez normę ISO 2975 [2]. Norma ta nic nie mówi o filtracji, czy też o aproksymacji sygnału pomiarowego, sposoby te mają być odporne na zakłócenia (w szczególności te wykorzystujące całkowanie po powierzchni pik). Jednak wyniki badań pokazały, że zakłócenia pomiaru stężenia znacznika mają znaczny wpływ na powtarzalność i dokładność wyznaczania czasu przejścia.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie (dla dwóch przykładowych serii pomiarowych) czasów przejścia i ich odchyień standardowych wyznaczonych w sposób podany w normie ISO 2975 [2] (obliczenia na „surowych” danych) oraz wyznaczonych na podstawie aproksymowanych modeli pików (czasy charakterystyczne również były obliczane na podstawie normy ISO 2975). W wierszach oznaczonych jako b.a., co oznacza bez aproksymacji, czasy przejścia wyznaczono na podstawie „surowych” danych, natomiast w trzech następnych wierszach przedstawiono wyniki uzyskane zaproponowaną metodą. Pogrubioną czcionką oznaczono wyniki o najmniejszym odchyleniu standardowym.

Otrzymane wyniki pokazują, że niezależnie od przyjętego punktu charakterystycznego największą powtarzalność (najmniejsze odchylenie standardowe) uzyskano stosując aproksymację danych do modelu drugiego.

Tab. 1. Porównanie czasów przejścia i ich odchyłeń standardowych dla trzech modeli kształtu piku

Tab. 1. Comparison of transit times and their standard deviations for three models of pick shape

	Środek ciężkości		Połowa krzywej stężenia	
	ΔT_{SR}	$std(\Delta T_{SR})$	ΔT_{SR}	$std(\Delta T_{SR})$
Seria 1				
b.a.	11,73	1,16	12,07	1,37
Mod 1	7,3	1,63	11,2	1,36
Mod 2	10,6	1,03	11,7	1,32
Mod 3	12,9	1,42	12,3	1,61
Seria 2				
b.a.	16,26	1,39	16,37	1,40
Mod 1	10,9	1,55	15,2	1,32
Mod 2	14,0	1,30	16,0	1,39
Mod 3	17,4	1,42	16,6	1,60

	Połowa odcinka do t		Maksimum piku	
	ΔT_{SR}	$std(\Delta T_{SR})$	ΔT_{SR}	$std(\Delta T_{SR})$
Seria 1				
b.a.	11,68	1,62	9,53	1,86
Mod 1	11,7	1,60	11,7	1,41
Mod 2	11,5	1,62	13,6	1,36
Mod 3	11,4	1,49	9,1	1,40
Seria 2				
b.a.	16,45	2,05	14,41	2,65
Mod 1	15,8	1,62	15,9	1,62
Mod 2	11,9	1,19	13,6	1,02
Mod 3	13,8	1,72	11,8	1,31

4. Podsumowanie

Dokładne wyznaczenie czasu przejścia znacznika ma kluczowe znaczenie dla osiąganych dokładności pomiaru strumienia objętości metodą zastrzyku. Dlatego też, autorzy zaproponowali modyfikację metod wyznaczania czasu przejścia podanych w normie ISO 2975 [2].

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych dokonano oceny dopasowania zaproponowanych modeli kształtu piku do czasowych przebiegów stężenia znacznika. Następnie wykorzystano powyższe modele do wyznaczenia czasu przejścia. Zastosowanie zaproponowanej metody pozwoliło na zmniejszenie odchylenia standardowego obliczanych czasów przejścia. Ponad to dysponując modelem piku aproksymowanym do danych, można określać i wyliczać dokładne punkty charakterystyczne takie jak wysokość czy początek piku. Istnieje możliwość wykonania doświadczeń mających na celu określenie doboru optymalnego punktu charakterystycznego, doboru takiego punktu charakterystycznego, który odpowiadałby prędkości maksymalnej oraz prędkości średniej strugi. W literaturze można spotkać wskazówkę, że gdy chce się wyznaczyć prędkość maksymalną w przekroju przepływowym to należy obliczać różnicę czasów między początkami pików, natomiast różnica czasów między środkami ciężkości

odpowiada prędkości średniej – autorzy będą starali się ją zweryfikować na podstawie wyników większej liczby wyników uzyskanych dla różnorodnych warunków pomiarowych.

W niniejszym opracowaniu celowo nie przedstawiono wyników obliczeń strumienia objętości metodą czasu przejścia. Ograniczono się jedynie do przedstawienia metod poprawiających dokładność oraz powtarzalność wyznaczanego czasu przejścia. Czas ten jest jedną z głównych wielkości potrzebnych do wyliczenia wartości strumienia objętości. Pozostałymi, równie istotnymi wielkościami są: współczynnik wzorcowania, określający stosunek prędkości średniej strugi do prędkości punktowej, która jest mierzona w metodzie zastrzyku oraz średnie pole przekroju poprzecznego strugi. Elementy te będą przedmiotem dalszych badań autorów. Zupełnie innym aspektem metody czasu przejścia oraz pozostałych metod znacznikowych jest dobór substancji znaczącej oraz sposób jej podawania oraz jej detekcji. Czynniki te mają wpływ na wszystkie pozostałe elementy metody, dlatego też dobór znacznika powinien odbyć się na początku eksperymentu pomiarowego. Jak wynika z poprzednich prac prowadzonych w Zakładzie Pomiarów i Systemów Sterowania [11] znacznik w postaci wodnego roztworu chlorku sodu może być z powodzeniem wykorzystywany do pomiarów strumienia objętości metodami znacznikowymi dla nie zanieczyszczonej wody.

5. Literatura

- [1] PN-ISO 24006: Pomiar strumienia płynu i objętości przepływającego płynu w przewodach.
- [2] ISO 2975: Measurement of water flow in closed conduits – Tracer Methods – 1974.
- [3] Rossi G.L.: Error analysis based development of a bubble velocity measurement chain. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 7, Number 1 March 1996, pp. 39-47.
- [4] Waluś S.: Procedury pomiarowe oraz wybrane metody pomiarowe. BK-208/RAu1/2006/temat 10, Zadanie 10.2, Pomiar strumienia objętości metodą znacznikową, Politechnika Śląska, Instytut Automatyki, Zakład Systemów Pomiarowych.
- [5] Iler E.: Badania znacznikowe w inżynierii procesowej. WNT, Warszawa 1992.
- [6] Błotnicki W., Waluś S.: Porównanie metod pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym. BW-431/RAu1/2008/36, Politechnika Śląska, Instytut Automatyki, Zakład Pomiarów i Systemów Sterowania.
- [7] Pyrz G.: Laboracyjne badanie metody znacznikowej zastosowanej do pomiaru strumienia objętości wody w kanale otwartym. Praca dyplomowa magisterska, promotor: dr hab. inż. Stanisław Waluś, Instytut Automatyki, Gliwice 2008.
- [8] Woldon M.: Studium możliwości zastosowania metody zastrzyku i rozcieńczania do pomiaru strumienia objętości płynu. Praca dyplomowa magisterska, promotor: dr hab. inż. Stanisław Waluś, Instytut Automatyki, Gliwice 2006.
- [9] Ilewicz W.: Estymacja parametrów złożonych sygnałów analitycznych z zastosowaniem wzorca zdefiniowanego numerycznie. Rozprawa doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Piotrowski, Gliwice, 6.04.2004 r.
- [10] Greń J.: Statystyka matematyczna modele i zadania. Wydanie VIII, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984.
- [11] Waluś S., Żeleźnik J.: Zadanie odwrotne w wybranych przepływomierzach, praca naukowo-badawcza. BK-14/RAu1/94, temat 12, Politechnika Śląska, Instytut Automatyki, Zakład Systemów Pomiarowych, Gliwice 1994.