ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria: AUTOMATYKA z. 71 Nr kol. 772

Stanisław WALUŚ

# MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WYBRANYCH NOWOCZESNYCH PRZEPŁYWOMIERZY W UKŁADACH AUTOMATYKI

Streszczenie. W artykule omówiono kilka rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy: z tarczą naporową, rurka uśredniająca, turbinowy typu sonda, wirowy i laserowy doplerowski. Dokonano porównawczej analizy ich właściwości metrologicznych oraz omówiono przykłady stosowania mikroprocesorów w przepływomierzach.

## 1. WSTĘP

Przepływomierzom stosowanym w układach automatyki stawia się wymagania, z których najważniejsze to niezawodność i dokładność. Często wymagana jest dokładność około 0,5%, podczas gdy obecnie strumienie objętości czy masy są mierzone w przemyśle z dokładnością 3-5% [26]. Dalszym wymaganiem będzie minimalizacja zużycia energii i kosztów eksploatacji oraz możliwość instalowania i sprawdzania przepływomierza podczas pracy rurociągu.

O nowoczesności przepływomierzy danego typu może świadczyć wielkość produkcji w krajach rozwiniętych gospodarczo, zapotrzebowanie (przemysłu, gospodarki wodnej, ...) oraz liczba współczesnych publikacji im poświęcona. W tablicy 1 przykładowo zestawiono procentowy udział treści odnoszącej się

Tablica 1

Procentowy udział treści poświęconej danemu typowi przepływomierzy w stosunku do treści przedstawiającej wszystkie przepływomierze (dla pomiaru przepływu w rurociągach)

| Lp. | Typy przepływomierzy | Pozycja literatury rok wydania | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [16] 1963 | [22] 1978 | [19] 1972 | [20] 1975 | [21] 1978 |
| 1 | zwężkowe | 44 | 51 | 20 | 0 | 32 |
| 2 | rotametry | 11 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | anubary | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 |
| 4 | bezwładnościowe | 6 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | kalorymetryczne | 6 | 3 | 4 | 0 | 5 |
| 6 | indukcyjne | 8 | 6 | 8 | 0 | 23 |
| 7 | turbinowe | 8 | 16 | 8 | 0 | 10 |
| 8 | wirowe i oscylacyjne | 0 | 6 | 0 | 43 | 4 |
| 9 | ultradźwiękowe | 6 | 0 | 8 | 29 | 11 |
| 10 | laserowe doplerowskie | 0 | 0 | 8 | 0 | 7 |
| 11 | wykorzystujące zasadę zastrzyku i korelacyjną | 5 | 0 | 28 | 14 | 7 |
| 12 | inne | 6 | 0 | 16 | 0 | 0 |

do poszczególnych typów przepływomierzy. W podręcznikach [16, 22] najwięcej miejsca zajmują przepływomierze zwężkowe, dalej: rotametry, indukcyjne i turbinowe. W materiałach konferencyjnych [19, 20, 21] oprócz zwężkowych pojawiają się często przepływomierze turbinowe, wirowe, ultradźwiękowe i rurki uśredniające (rurki spiętrzące z uśrednieniem ciśnienia dynamicznego).

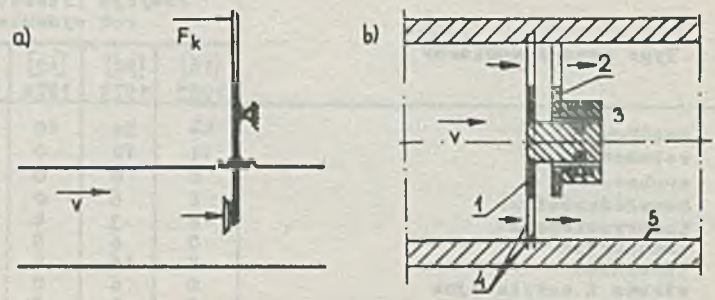
## 2. NOWE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE PRZEPŁYWOMIERZY

Wobec dużej liczby nowych typów przepływomierzy (np. tylko w gospodarce ściekowej może być użyte 70 różnych przyrządów, czy metod pomiarowych [25]) zostanie przedstawionych przykładowo kilka rozwiązań:

1) przepływomierz z tarczą naporową,
2) przepływomierz typu rurka uśredniająca,
3) przepływomierz turbinowy typu sonda,
4) przepływomierz wirowy,
5) przepływomierz laserowy doplerowski,
6) przepływomierz ultradźwiękowy.

Pierwsze dwa typy stanowią modyfikację klasycznej zasady pomiaru spadku ciśnienia, natomiast przepływomierze turbinowe są znane od 20 lat [24] i jako młynki hydrometryczne były wykorzystywane w hydrologii znacznie wcześniej, natomiast od kilku lat są stosowane do pomiaru rozkładu prędkości w rurociągach bez konieczności ich opróżniania dla zainstalowania przyrządu. Na rys. 1 przedstawiono zasadę działania przepływomierza z tarczą naporową, natomiast na rys. 1b przykładowe rozwiązanie techniczne. Siła działająca na tarczę wyraża się wzorem [21]:

$$F = 0,5 \cdot A_S (\alpha \varepsilon A)^{-2} \dot{V}^2, \qquad (1)$$




Rys. 1. Przepływomierz z tarczą naporową
a – zasada działania, b – realizacja techniczna
$F_p$ – siła od przepływu, $F_k$ – siła kompensująca, 1 – cewka wbudowana w tarczę, 2 – cewka, 3 – transformator różnicowy, 4 – równoległe płyty sprężyste, 5 – ściana rurociągu

gdzie:

$A = \pi (D^2 - d^2)/4$,

$A_S = \pi d^2/4$,

$\alpha$ - liczba przepływu,

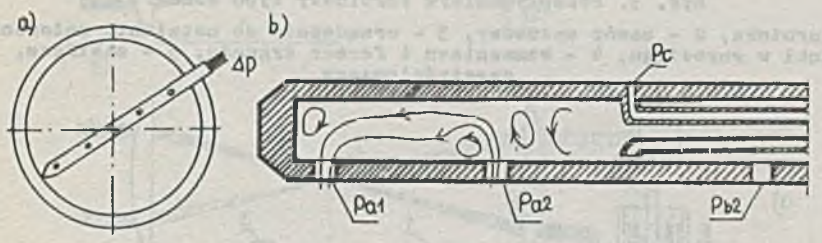
$\varepsilon$ - liczba ekspansji,

$\varrho$ - gęstość,

D - średnica rurociągu,

d - średnica tarczy,

$\dot{V}$ - strumień objętości.




Rys. 2. Przepływomierz typu rurka uśredniająca
a - zainstalowany w rurociągu, b - przekrój

Rurka uśredniająca typu Annubar [20] jest wykonana w postaci rury umiejscowionej w średnicy rurociągu z czterema otworami od strony przepływu i jednym w środku rurociągu z przeciwnej strony, co pokazano na rys. 2. Ciśnienie różnicowe na wyjściu wynosi:

$$\Delta p = a_1 p_{a1} + a_2 p_{a2} + b_1 p_{b1} + b_2 p_{b2} - p_c, \tag{2}$$

gdzie:

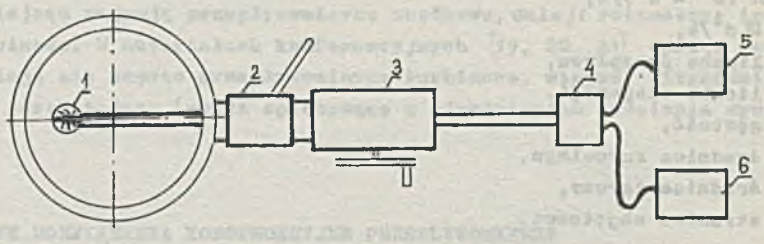
$p_{a1}, p_{a2}, p_{b1}, p_{b2}$ - ciśnienia, jakie byłyby w każdym z czterech otworków, gdyby był izolowany od reszty,

$p_c$ - ciśnienie w tylnym otworze,

$a_1, a_2, b_1, b_2$ - współczynniki wagi zależne od konstrukcji rury i położenia otworków.

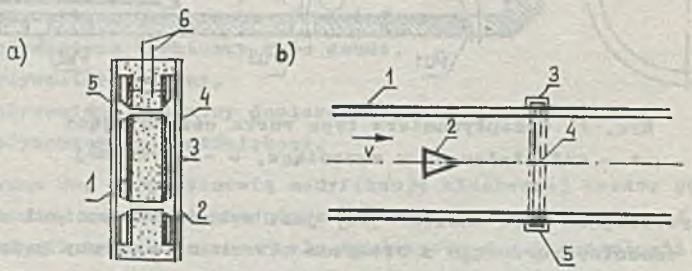
Rurkę Pitota czy sondę cylindryczną zastępuje przepływomierz turbinowy typu sonda [22] (rys. 3). Wyjście w postaci impulsów prostokątnych o częstotliwości do kilkuset Hz pozwala na szybki pomiar rozkładu prędkości wzdłuż sondowanej drogi.

W przepływomierzach wirowych wykorzystywane jest zjawisko powstawania wirów, gdy płyn omywa nieopływowe ciało umieszczone w rurociągu [11, 15]. Struga odrywa się od tego ciała i powstają wiry o częstotliwości proporcjonalnej do prędkości przepływu. Detekcja częstotliwości wirów może się odbywać mechanicznie, cieplnie [11], przez zmianę pojemności [18] (rys.4a)




Rys. 3. Przepływomierz turbinowy typu sonda:

1 - turbinka, 2 - zawór zasuwowy, 3 - urządzenie do ustalania położenia turbinki w rurociągu, 4 - wzmacniacz i former sygnału, 5 - zasilacz, 6 - częstościomierz




Rys. 4. Detektory przepływomierzy wirowych:

a - pojemnościowy

1 - elektroda metalowa, 2 - metalowa membrana, 3 - izolator, 4 - ciecz dielektryczna, 5 - kanał łączący, 6 - wyprowadzenie

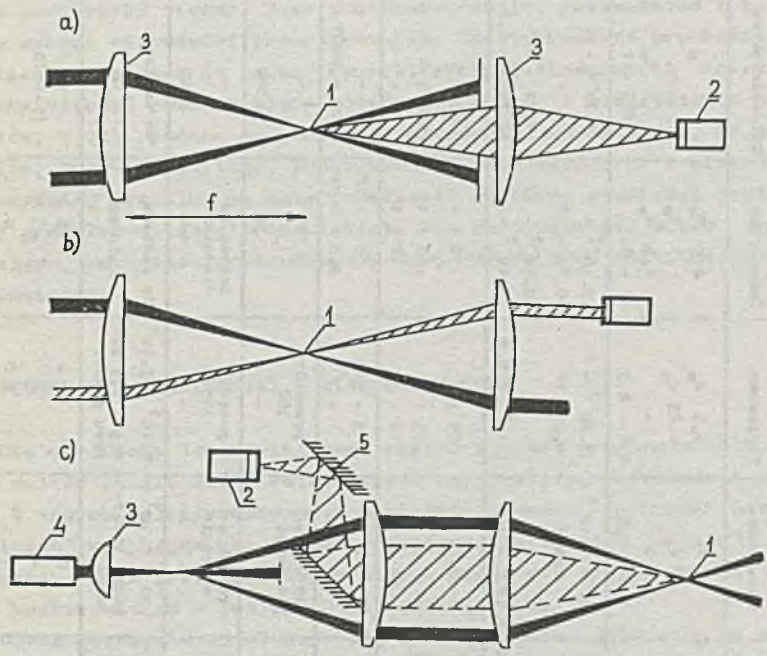
b - ultradźwiękowy

1 - ściana, 2 - ciało zaburzające, 3 - nadajnik ultradźwiękowy, 4 - wiązka ultradźwiękowa, 5 - odbiornik ultradźwiękowy

lub za pomocą ultradźwięków [4] (rys. 4b). Zwykle uzyskuje się zakresy częstotliwości 10 - 1000 i 50 - 2000 Hz [7]. Stosunek przepływu maksymalnego do minimalnego może wynosić 100 : 1 przy zachowaniu dobrej liniowości i błędzie - 1% wielkości mierzonej. Dalszą zaletą jest to, że nie wymaga obsługi przez dłuższy czas, np. od momentu zainstalowania w 1976 roku [9].

Zasada działania przepływomierza laserowego doplerowskiego [21] polega na pomiarze zmiany częstotliwości światła rozproszonego na małych cząstkach, które poruszają się z płynem. Przepływomierz składa się ze źródła laserowego, układu optycznego, fotodetektora i przetwornika sygnału. W większości systemów optycznych tego przepływomierza wiązka z lasera jest dzielona na dwie równoległe, które są skupiane w miejscu, gdzie chcemy mierzyć prędkość (rys. 5). W przypadku, gdy jest dostęp tylko z jednej

strony, wykorzystuje się rozpraszanie wsteczne. W celu obliczenia całkowitego strumienia objętości należy wyznaczyć cały rozkład prędkości lub przynajmniej prędkość w wielu punktach. Przykładowo na rys. 5 pokazano uzyskane profile prędkości [21].




Rys. 5. Podstawowe układy przepływomierza laserowego doplerowskiego: a - z rozpraszaniem w przód, b - z wiązką odniesienia, c - z rozpraszaniem wstecznym
1 - punkt pomiaru, 2 - detektor, 3 - soczewka, 4 - laser, 5 - zwierciadło

Przepływomierze ultradźwiękowe stanowią grupę najbardziej zróżnicowaną, jednak i tu konstrukcje są ciągle ulepszane w celu osiągnięcia większej dokładności, lepszych właściwości eksploatacyjnych oraz nowych zastosowań, jak np. do pomiarów szybkozmiennych strumieni [5].

## 3. PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH

Zbiory właściwości metrologicznych istotne dla przepływomierzy i podawane przez różnych autorów różnią się znacznie między sobą [3,7,10,18,22, 25]. Liczą one zwykle po kilkanaście cech, maksymalnie 23 [25]. W tablicy 2 przytoczono dla 6 wybranych typów przepływomierzy najbardziej istotne parametry, przy czym autorzy podają nie te same zbiory parametrów

Tablica 2

Zestawienie niektórych parametrów wybranych przepływomierzy

| Parametr | Poz. lit. | Zwężkowe | Rotametry | Turbinowe | Indukcyjne | Ultradźwiękowe | Wirowe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dokładność w %-ach<br>$k_s$ - końca skali<br>$w_m$ - wielkości mierzonej | [7] | 1 $k_s$ | 2 $k_s$ | 0,5 $w_m$ | 0,5 $w_m$ | 1 $w_m$ | 1 $w_m$ |
| | [14] | 1 $w_m$ | 2 $k_s$ | 0,25 $w_m$ | 1 $w_m$ | - | 0,5 $w_m$ |
| | [10] | 1,2 $k_s$ | - | - | 1,5 $k_s$ | 1 $w_m$ | - |
| | [5] | 1,5 - 2,5 | 1,0 - 2,5 | 0,2 - 2,5 | 1 - 2,5 | 0,6 - 2,5 | - |
| Zakres<br>[$m^3/s$] | [7] | 10,9 | $10^{-9}$ - $10^{-2}$ | $7.10^{-3}$ - 7 | $7.10^{-3}$ - 7 | $7.10^{-3}$ - 7 | $7.10^{-4}$ - 0,1 |
| | [14] | różny | różny | 0,9 - 10 | 0,06 - 18 | - | Re = $10^4$ do kawitacji |
| | [10] | $8.10^{-5}$ - 30 | - | - | $2.10^{-3}$ - 17 | 0,02 - 170 | - |
| | [6] | $3.10^{-3}$ - 20 | $8.10^{-5}$ - 200 | $3.10^{-3}$ - 0,2 | $3.10^{-5}$ - 7 | $3.10^{-5}$ - 1,4 | - |
| $\dot{V}_{max}$ / $\dot{V}_{min}$ bez regulacji zakresu | [7] | 4 : 1 | 10 : 1 | 15 : 1 | 10 : 1 | 25 : 1 | 15 : 1 |
| z regulacją zakresu | [7] | 12 : 1 | - | 15 : 1 | 100 : 1 | 100 : 1 | 15 : 1 |
| | [14] | 4 : 11 | 10 : 1 | 10 : 1 | 10 : 1 | - | 12 : 1 |
| Średnica<br>[mm] | [14] | 25 | - | 5 - 500 | 3 - 1800 | - | 50 - 150 |
| | [10] | 15 - 2000 | - | - | 2,5 - 2000 | 100 - 5000 | - |
| Maks. temperatura<br>[°C] | [14] | przeszło 300 | 100 szkło<br>350 metal | przeszło 300 | 120 | - | 120 |
| | [10] | 600 | - | - | 150 | 100 | - |
| Maksymalne ciśnienie<br>[$10^5$ Pa] | [14] | powyżej 105 | 10 szkło<br>70 metal | powyżej 105 | zależy od średnicy | - | 120 |
| | [10] | 500 | - | - | 100 | 100 | - |
| Maksymalna trwała strata ciśnienia<br>[Pa] | [7] | 2500 - $5.10^4$ | 700 - $7.10^3$ | $7.10^3$ - $3.10^4$ | do zaniedb. | do zaniedb. | 700 - $4.10^4$ |
| | [14] | różna | różna i niedużą | 0,5 - 1,5 naporu prędk. | nie ma | - | równa podw. napor. pr. |
| Długość prost. odcinka przed przepływomierzem | [14] | (15-60)D | 0 | 10 D | 5 D | -- | (10-30)D |
| | [10] | > 10 D | - | - | >3 D | (7-10)D | - |
| za przepływomierzem | [14] | 5 D | 0 | 5 D | 0 | - | 5 D |

oraz wartości tych parametrów różnią się między sobą. Stąd nie jest możliwa ocena, który przepływomierz jest "najlepszy" czy "najbardziej nowoczesny" bez znajomości wymagań, jakie ma spełniać i warunków, w jakich będzie pracował. W [18] podano praktyczny diagram, który na podstawie takich parametrów cieczy, jak: zanieczyszczenie, przewodność i lepkość pozwala wybrać odpowiedni przepływomierz. Często rozkład prędkości jest zniekształcony, a więc do pełnej charakterystyki właściwości metrologicznych należy włączyć również błędy metody, na ogół nie uwzględniane przez producentów. W [21] podano na podstawie przeprowadzonych badań, że spośród kryzy ISA, dyszy Venturiego, przepływomierza indukcyjnego i ultradźwiękowego najbardziej wrażliwy na zniekształcenia rozkładu prędkości jest jednodrogowy przepływomierz ultradźwiękowy. Dla dwudrogowego błędy są znacznie mniejsze, natomiast czterodrogowy jest jednym z najdokładniejszych przepływomierzy.

## 4. STOSOWANIE ELEKTRONIKI I MIKROPROCESORÓW

Dla uzyskania dokładniejszego wyniku pomiaru w przepływomierzu zwężkowym należy uwzględnić w obliczeniach temperaturę, ciśnienie i skład płynu. W innych przepływomierzach zachodzi również potrzeba uwzględnienia wielkości wpływających. Dzięki rozwojowi elektroniki [19] było możliwe np. skonstruowanie przepływomierzy ultradźwiękowych o dokładności pozwalającej konkurować im z innymi dotychczas stosowanymi.

Coraz powszechniej stosuje się mikroprocesory połączone na stałe z przepływomierzami, np. w firmie ONERA [1] skonstruowano automatyczny system pomiarowy sterowany mikroprocesorem model LSI-11 firmy DEC dla szybkodziałającego przepływomierza ultradźwiękowego. Innym przykładem jest zastosowanie mikroprocesora typ MC 6800 w przepływomierzu, w którym wykorzystano aktywne źródło pozytonów [8]. Zasada pomiaru przepływu opiera się na pomiarze czasu przechodzenia pozytonów między detektorami oddalonymi od siebie o 1 [m] wzdłuż rurociągu. Firmy ITT Barton i Honeywell [2] wykorzystały mikroporocesory w przepływomierzach z korekcją, przy czym w przepływomierzu TDC 2000 firmy Honeywell wykorzystuje się zwężkę z półprzewodnikowym przetwornikiem ciśnienia różnicowego oraz przetwornik temperatury i ciśnienia absolutnego.

## 5. PODSUMOWANIE

Omówione wyżej nowe metody stanowią tylko przykłady. Można tu dodać przepływomierz strumieniowy [7] oraz wykorzystanie przepływomierza indukcyjnego do pomiaru strumienia w niepełnych rurociągach [21] . Efektywne wykorzystanie wielu zjawisk w przepływomierzach stało się możliwe dzięki nowym układom elektronicznym. Dalsze przetwarzanie informacji odbywa się

ze względu na wykorzystanie jej do sterowania lub uzyskania dużej dokładności [11]. W okresie rozwoju zastosowań mikroprocesorów (które jednak nie rozwiążą wszystkich problemów związanych z dokładnością pomiarów) przepływomierz musi być przystosowany do współpracy z końcówką systemu sterowania.

LITERATURA


[1] Appel J., Bruere A., Dunand F., Haziza E.: Microcomputer-Controlled Measurement Systems Application to Flow Measurements and to Spectrometry. IEEE Trans. Instrum. and Meas., nr 4, 1979. Ekspress-informacija, KIT, nr 29, 1980.

[2] Bailey S.J.: Flowmeters 77: Technical Glamor Vs. "Good Old Ways". Control Engineering, nr 1, 1978, Ekspress-informacija, KIT, nr 44, 1978.

[3] Birjukow B.W., Danilow M.A., Żeleznikowa M.F., Kiwilis S.S.: Normirowanije charaktieristik raschodomierow. Izmieritielnaja Tiechnika, nr 11, 1980.

[4] Bonfig K.W.: Wirbelfrequenz-Durchflussmessung. Messen und Prufen, nr 12, 1978. Ekspress-informacija. KIT, nr 29, 1980.

[5] Dorden Dz.: Charaktieristiki izmierienij stacjonarnogo i niestacjonarnogo raschoda i ekspluatacjonnyje charaktieristiki ultrazwukogo raschodomiera. VIII Kongres IMEKO, Moskwa, 1979, Preprint nr 12: Izmierienija skorosti i raschoda, s. 42-51.

[6] Garszin P.A., Smirnow B.E., Tupiczenkow A.A.: Gidrodinamiczeskije faktory pri izmierienii raschoda. Izmieritielnaja Tiechnika, nr 8, 197 .

[7] Hall J.: Flowmeters-matching applications and devices. Instruments and Control Systems, nr 2, 1978.

[8] Heusala H., Myllylä R.: Microprocessor-Based Flow Measurement Using a Positron Active Tracer. IEEE Trans. Instrum. and Meas., nr 4, 1979. Ekspress-informacija. KIT, nr 43, 1980.

[9] Higginson E.: Vortex schedding flowmeters help control ordorization system. Instruments and Control Systems, nr 3, 1981.

[10] Hoene E., Kaulfersch H.: Flow Metering-Methods and Applications. Siemens Review, nr 5, 1978.

[11] Jonas J.S.: Flowmeters. Control and Instrumentation. 1981/11.

[12] Kabza Z., Kremlewski P.: O potrzebie i kierunkach rozwoju prac naukowo-badawczych dotyczących pomiaru natężenia przepływu. Prace naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej Nr 15, Studia i Materiały nr 11. 1978, ss. 3-13.

[13] Kabza Z.: Metrological analysis of mathematical models of obstruction meters. Acta IMEKO, 1979, ss. 741-749.

[14] Kabza Z.: Zagadnienia pomiarów natężenia przepływu w systemach komputerowych. Materiały Konferencyjne Sympozjum "Metrologia wielkości mechanicznych", stan obecny i perspektywiczny w odniesieniu do potrzeb gospodarki narodowej. Politechnika Warszawska, Instytut Metrologii i Budowy Przyrządów Pomiarowych, Warszawa 1976, s. 16.

[15] Korybut-Daszkiewicz O., Otowski W.: Przepływomierz Vortex - problemy teoretyczne i techniczne związane z projektowaniem. PAK, 1980, nr 7.

[16] Kremlewskij P.P., Raschodomiery. Maszgiz, Moskwa, Leningrad 1963.

[17] Kremlewskij P.P., Raschodomiery.i szczetczyki koliczestwa. Maszinostrojenije. Leningrad, 1975.

[18] Lomas D.J.: Selecting the right flowmeter. Part I. The six favorites. Instrumentation Technology, nr 5, 1977. Ekspress-informacija,KIT, nr 3, 1978.

[19] Modern developments in flow measurement. Peter Peregrinus, Harwell 1972.

[20] Proceedings of ISA's Industry Oriented Conference and Exhibit, Milwauke, 1975. Instrument Society of America, Bittsburg 1975.

[21] Proceedings of FLOMEKO 1978, North-Holland Publisching Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1978.

[22] Romer E.: Miernictwo przemysłowe. WNN, Warszawa 1978.

[23] Sąsiadek M., Teisseyre M., Kabza Z.: Przepływomierz z tarczą spiętrzającą do cieczy zanieczyszczonych. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 1965, nr 9, ss. 377-379.

[24] Scott M.J., Cousins T.: Turbine insertion flowmeters: their applications reviewed. Control and Instrumentation, 1981/2.

[25] Shelley E., Kirkpatric A.: Sewer flow measurement - state - of-the--art assessment. Municipal Environmental Research Laboratory. Cincinnati, 1975.

[26] Tupiczenkow A.A.; Uslowija wosproiswodimosti izmierienij raschoda. Izmieritielnaja Tiechnika, 1976, nr 6.

[27] Waluś St.: Przepływomierze ultradźwiękowe - własności metrologiczne. PAK, 1978, nr 1.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Zdzisław Kabza

Wpłynęło do Redakcji 20.05.1982 r.

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ РАСХОДОМЕРОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье описано несколько конструктивных решений расходомеров: с напорным щитом, с интегральной напорной трубкой, с трубинным зондом, вихревых и лазерных допплеровских. Проведено сравнительный анализ метрологических свойств и описано применение микропроцессоров для построения расходомеров.

## THE POSSIBILITIES OF APPLICATION OF CHOOSEN MODERN FLOWMETERS IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

S u m m a r y

In the article some constructional solutions of the flowmeters are described: the static-plate flowmeter, the Annubar, the static insection flowmeter, the vortex flowmeter and the laser-Doppler flowmeter. The comparative analysis of the metrological properties is accomplished and the examples of microprocessors application in flowmeters are given.