

Mariusz WACŁAWEK

## KOMPUTEROWE BADANIA CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH PRZEPŁYWOMIERZA Z DRGAJĄCĄ KULKĄ

**Streszczenie.** W pracy podano wyniki komputerowej symulacji działania przepływomierza z drgającą kulką. Przedstawiono dwie wybrane charakterystyki statyczne tego przepływomierza oraz przedyskutowano wpływ na ich przebieg zmian wartości czterech wybranych cech konstrukcyjnych. Oceniono charakterystyki ze względu na kryteria: zakresu, czułości i liniowości.

### 1. Cel pracy

Celem niniejszego artykułu jest podanie wyników komputerowej symulacji działania pewnego typu przepływomierza, przeprowadzonej pod kątem jego właściwości statycznych. Zaproponowano model matematyczny przepływomierza i na tej podstawie badano przebieg jego dwóch wybranych rodzajów charakterystyk statycznych. Badano również wpływ czterech wybranych parametrów konstrukcyjnych na te charakterystyki. Wnioski z tych badań mają posłużyć, poza ogólnym rozeznaniem co do właściwości statycznych przepływomierza, stworzeniu przesłanek dla skonstruowania jego modelu fizycznego.

### 2: Koncepcja przepływomierza z drgającą kulką

Koncepcja przepływomierza z drgającą kulką (zwanego również elektronicznym rotametrem lub OBF (od ang.: oscillating ball flowmeter) podana została w pracach [1], [2], [3]. Ideę działania ilustruje rys. 1. Na pionowym odcinku przewodu 1 z przepływającym w górę medium zainstalowano elektromagnes 2 i czujnik fotoelektryczny 3. Do przewodu 1 wprowadzono kulkę 4 wykonaną z ferromagnetyka, która opada pod wpływem swego ciężaru w dół przewodu tym szybciej, im mniejszy jest przepływ medium. W momencie przesłonięcia przez kulkę 4 czujnika fotoelektrycznego 3 uruchomiony zostaje elektromagnes, kulka wraca do położenia wyjściowego w górze przewodu i cykl powtarza się.

Przepływomierz ten jest w pewnym sensie pokrewny tak z przepływomierzem pływakowym 4, z klasycznymi rotametrami, z przepływomierzami kulkowymi [5], jak i z przepływomierzami ze znacznikiem strumienia 6, 7. Możliwości dalszych ulepszeń podanej koncepcji oraz dogodny rodzaj sygnału wyjściowego stanowią argumenty przemawiające za dalszymi nad nim pracami.

## 3. Model matematyczny

Zgodnie z zasadą d'Alemberta można zapisać

$$m\ddot{x} = Q - F_w - F_S - F_d - F_m \quad (1)$$

gdzie:

- $m$  - masa kulki,
- $x$  - pionowa współrzędna położenia kulki (rys. 1),
- $Q$  - ciężar kulki,
- $F_w$  - siła wyporu,
- $F_S$  - siła od ciśnienia statycznego na kulce,
- $F_d$  - siła od ciśnienia dynamicznego wywieranego przez strumień,
- $F_m$  - siła przyciągająca od cewki.

Zauważmy że:

$$Q = mg \quad (2)$$

$$F_w = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho g \quad (3)$$

$$F_S = \Delta p_s \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (4)$$

$$F_d = f_d \cdot \text{sgn}(\dot{x}) = c_x \cdot \frac{\rho v_w^2}{2} \cdot S \cdot \text{sgn}(\dot{x}) = \quad (5)$$

$$= c_x \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot [v + \text{sgn}(\dot{x}) \cdot \dot{x}]^2 \cdot \text{sgn}(\dot{x})$$

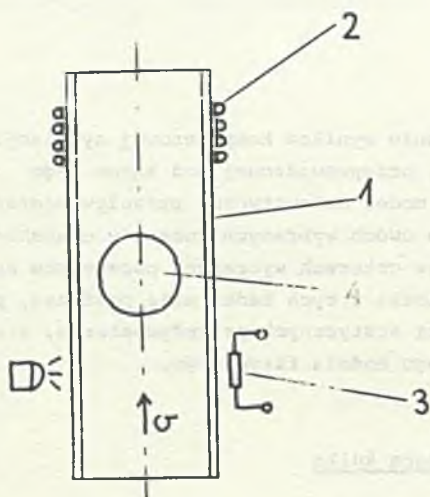
Dla siły  $F_m$  przyjęto za [4]:

$$F_m = \frac{\xi Q}{1} \cdot x \cdot \exp\left[-\left(\frac{x^2}{l^2} - 1\right)\right] \cdot H(t-t_0) \quad (6)$$

gdzie:

- $g$  - przyspieszenie ziemskie,
- $d$  - średnica kulki,

- $\rho$  - gęstość medium,
- $\Delta p_s$  - spadek ciśnienia statycznego na kulce,
- $c_x$  - współczynnik oporu hydrodynamicznego kulki,
- $v_w$  - względna prędkość kulki w stosunku do płynu,
- $S$  - największa z powierzchni przekrojów kulki,
- $v$  - prędkość medium w przewodzie,
- $f_d$  - wartość bezwzględna  $F_d$ ,
- $\xi$  - stosunek siły od cewki do ciężaru kulki w chwili włączenia cewki,



Rys. 1. Idea przepływomierza z drgającą kulka

Fig. 1. The concept of the oscillating ball flowmeter

- $t$  - czas,  
 $t_0$  - czas określający moment załączenia cewki  
 $l$  - długość odcinka pomiarowego,  
 $\text{sgn}(\cdot)$  - funkcja signum (znaku)  
 $\text{exp}(\cdot)$  - funkcja eksponencjalna,  
 $H(\cdot)$  - funkcja Heaviside a.

Ponadto zachodzą zależności:

na podstawie:

$$\Delta p_s = \int_0^d \frac{6 \cdot \nu \cdot \lambda \cdot \rho_k \cdot g}{2 \cdot \varphi^2 \cdot d^2 \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4} dh \quad (7)$$

gdzie:

$$f_1 = \frac{1 - \frac{\sqrt{h(d-h)}}{\varphi d}}{2} \quad (8)$$

$$f_2 = 1 - f_1 \quad (9)$$

$$f_3 = 1 - 2 \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (10)$$

$$f_4 = 1 - \frac{1}{\ln(1 - 2 \cdot f_1)} \quad (11)$$

$\varphi = \frac{D}{d}$  - stosunek średnicy wewnętrznej przewodu  $D$  do średnicy kulki  $d$ ,

$\nu$  - kinematyczny współczynnik lepkości medium,

$\lambda$  - stosunek gęstości medium do gęstości materiału kulki,

$\rho_k$  - gęstość materiału kulki,

$h$  - współrzędna bieżąca, wzdłuż wspólnej osi symetrii kulki i przewodu

oraz

$$c_x = c_x(\text{Re}) \quad (12)$$

gdzie  $\text{Re}$  liczba Reynoldsa.

Dla układu przewód-kulka przyjęto:

$$\text{Re} = \frac{[\nu + \text{sgn}(\dot{x}) \cdot \dot{x}] \cdot d}{\nu} \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \quad (13)$$

Wykres zależności (12) można znaleźć np. w [8].

Po podstawieniu do (1) równań (2) - (6), wydzieleniu obu stron przez  $m$  wyrażoną:  $m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_k$  otrzymujemy równanie ruchu kulki w postaci:

$$\ddot{x} = B - C \cdot \text{sgn}(\dot{x}) \cdot [\nu + \text{sgn}(\dot{x}) \cdot \dot{x}]^2 - A \cdot x \cdot \exp\left[-\left(\frac{x^2}{l^2} - 1\right)\right] \cdot H(t-t_0) \quad (14)$$

gdzie:

$$B = g(1 - \lambda) - 1,5 \cdot \frac{\Delta p_s}{d \cdot \gamma_k} \quad (15)$$

$$C = 0,75 \cdot C_x \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (16)$$

$$A = \frac{\xi \cdot g}{1} \quad (17)$$

Inne oznaczenia jak powyżej.

$\Delta p_s$  i  $C_x$  dane są zależnościami (7) - (11) i (12) - (13).

Prędkość medium  $v$  związana jest ze strumieniem objętości  $V^*$  zależnością:

$$v = \frac{4 V^*}{\pi d^2 \varphi^2} \quad (18)$$

Rozwiązując równanie (14) przy warunkach początkowych

$$x(0) = 0 \quad (19)$$

$$\dot{x}(0) = 0 \quad (20)$$

otrzymamy zależność

$$x = x(t) \quad (21)$$

opisująca położenie kulki w funkcji czasu.

Funkcję (21) możemy rozpatrywać w dwóch przedziałach czasu  $0 \leq t \leq t_0$  i  $t_0 \leq t \leq t_c$ , czyli dla "swobodnego" opadania kulki w płynie i dla etapu jej przyciągania przez cewkę (tzn. od chwili załączenia cewki do momentu powrotu kulki w położenie wyjściowe). Podstawiając  $t = t_0$  i  $x = 1$  oraz rozwikłując (21) względem czasu otrzymamy:

$$t_0 = \Psi(v^*, \varphi, d, 1) \quad (22)$$

Zależność (22) podaje pierwszą z dwóch rozpatrywanych w artykule charakterystyk statycznych przepływomierza, tzn. zależność czasu opadania  $t_0$  od strumienia objętości  $V^*$ , której parametrami są cechy konstrukcyjne  $\varphi$ ,  $d$ ,  $l$ . Podobnie, podstawiając do (21)  $t = t_c$  i  $x = 0$  oraz rozwikłując względem czasu mamy:

$$t_c = \chi_1(v^*, \varphi, d, l, \xi) \quad (23)$$



oraz:

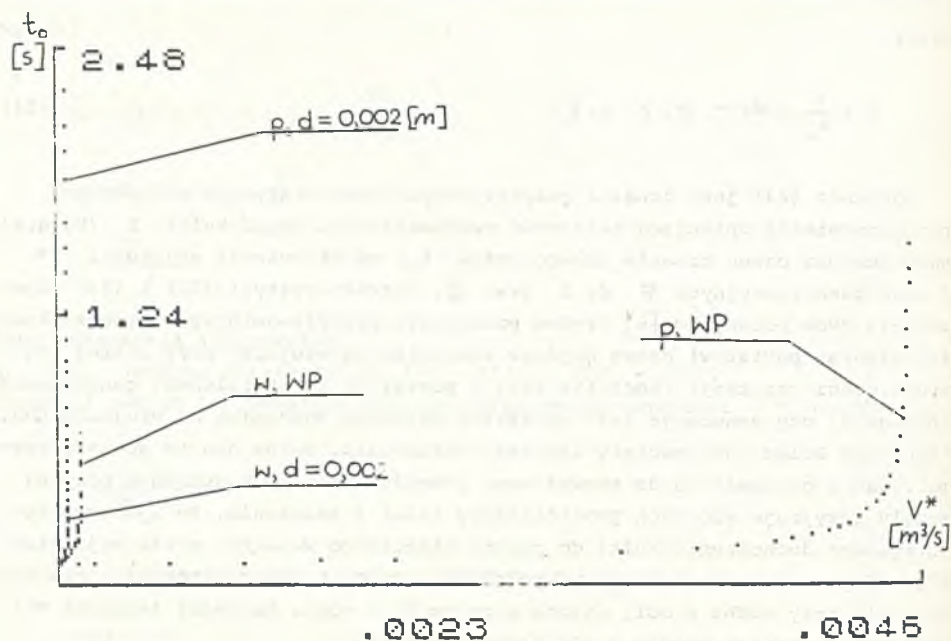
$$f = \frac{1}{t_c} = \mathcal{K}(V^*, \varphi, d, l, \xi) \quad (24)$$

Równanie (24) jest drugą z rozpatrywanych charakterystyk statycznych przepływomierza opisującą zależność częstotliwości drgań kulki  $f$  (będącej odwrotnością czasu trwania całego cyklu  $t_c$ ) od strumienia objętości  $V^*$  i cech konstrukcyjnych  $\varphi$ ,  $d$ ,  $l$  oraz  $\xi$ . Charakterystyki (22) i (24) odpowiadają dwóm podanym w [6] trybom pomiarowym przepływomierzy ze znacznikiem strumienia: pomiarowi czasu dojścia znacznika do czujnika przy stałej częstotliwości generacji znacznika (22) i pomiarowi częstotliwości generowania znacznika, gdy generacja jest wyzwalana dojściem znacznika do czujnika (24). Traktując kulkę jako swoisty znacznik strumienia, można oba te sposoby rozpatrywać w odniesieniu do rozważanego przepływomierza. W opisanym powyżej modelu przyjmuje się ruch prostoliniowy kulki i założenie, że zjawiska towarzyszące dochodzeniu kulki do punktu stabilnego wewnątrz cewki mają czas pomijalny w stosunku do  $t_c$ . Współrzędna  $x$  jest zawsze dodatnia, zaś  $\dot{x}$  dodatnia przy ruchu w dół, ujemna przy ruchu w górę. Wartości lepkości  $\nu$  i gęstości  $\rho$  medium przyjęto dla temperatury 293 K.

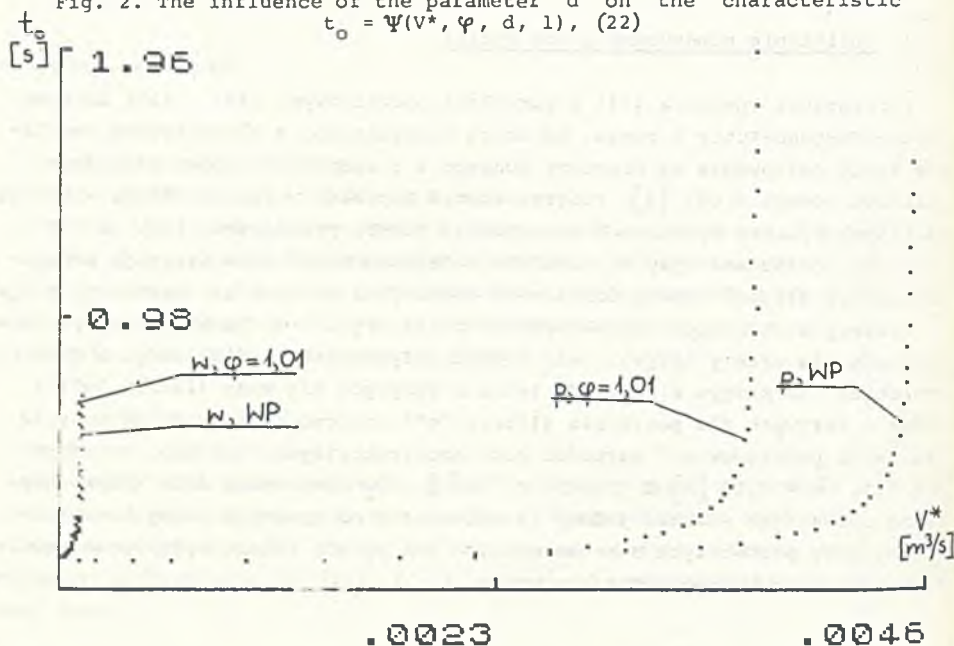
#### 4. Obliczenia numeryczne i ich wyniki

Rozwiązania równania (14) z warunkami początkowymi (19) i (20) dokonano metodą Rungego-Kutty 4 rzędu, wg wzoru klasycznego, z automatyczną regulacją kroku całkowania wg hipotezy Rungego i z założonym błędem względnym obliczeń równym 0,001 [9]. Program został napisany w języku BASIC, w wersji na mikrokomputery Spectrum i Spectrum+. Punkty przełączeń, tzn.  $x = 1$  i  $x = 0$ , obliczane były na zasadzie kolejnych wokół nich iteracji programu, tak by uzyskać żadaną dokładność decydującą o wartości czasów  $t_0$  i  $t_c$ .

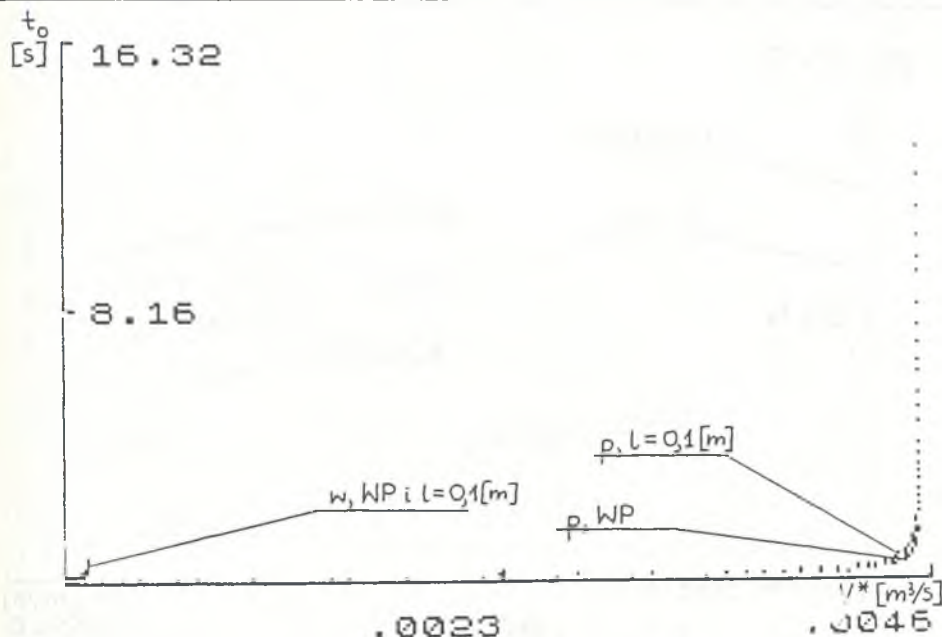
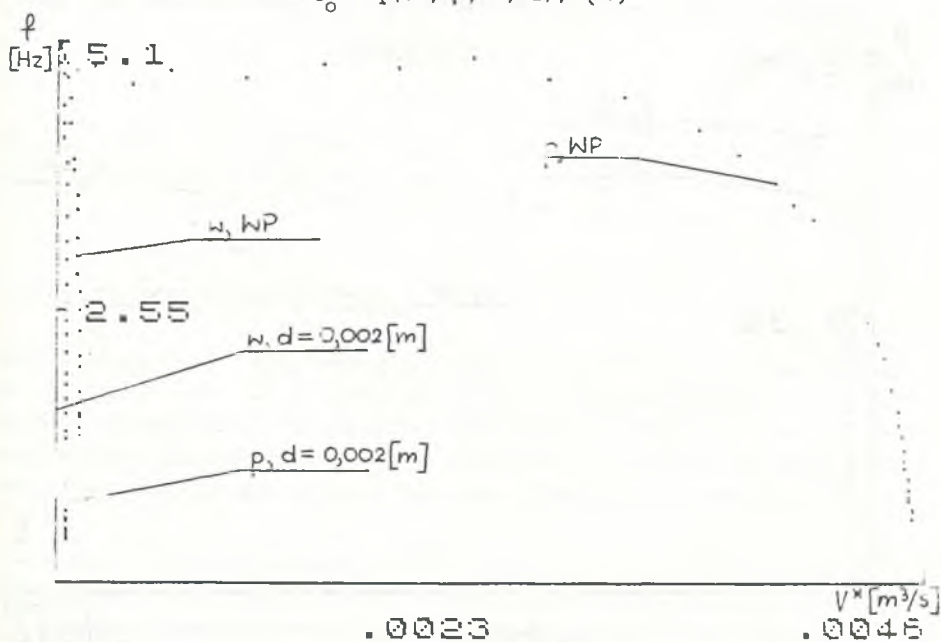
Wykresy otrzymanych charakterystyk podają rys. 2-8. Na każdym z rysunków znajdują się cztery krzywe. Dwie z nich dotyczą jako medium wody, a dwie powietrza. Na każdym z rysunków jedna z krzywych dla wody (litera "w") i jedna z krzywych dla powietrza (litera "p") oznaczone literami WP dotyczą "wariantu podstawowego" wartości cech konstrukcyjnych, takiego, w którym  $\varphi = 1,1$ ,  $d = 0,01$  [m],  $l = 0,05$  m i  $\xi = 5$ . Pozostałe dwie krzywe uzyskano zmieniając wartość jednej (w zależności od rysunku) cechy konstrukcyjnej przy pozostałych niezmiennych. W ten sposób badano wpływ poszczególnych cech na przebiegi charakterystyk.

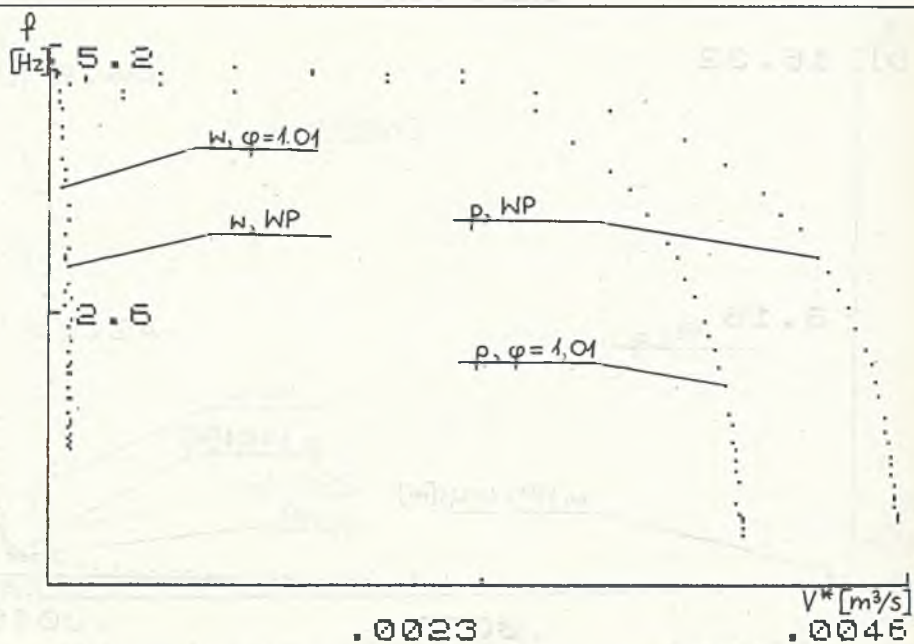


Rys. 2. Wpływ  $d$  na charakterystykę  $t_0 = \Psi(V^*, \varphi, d, 1)$ , (22)  
 Fig. 2. The influence of the parameter  $d$  on the characteristic  $t_0 = \Psi(V^*, \varphi, d, 1)$ , (22)



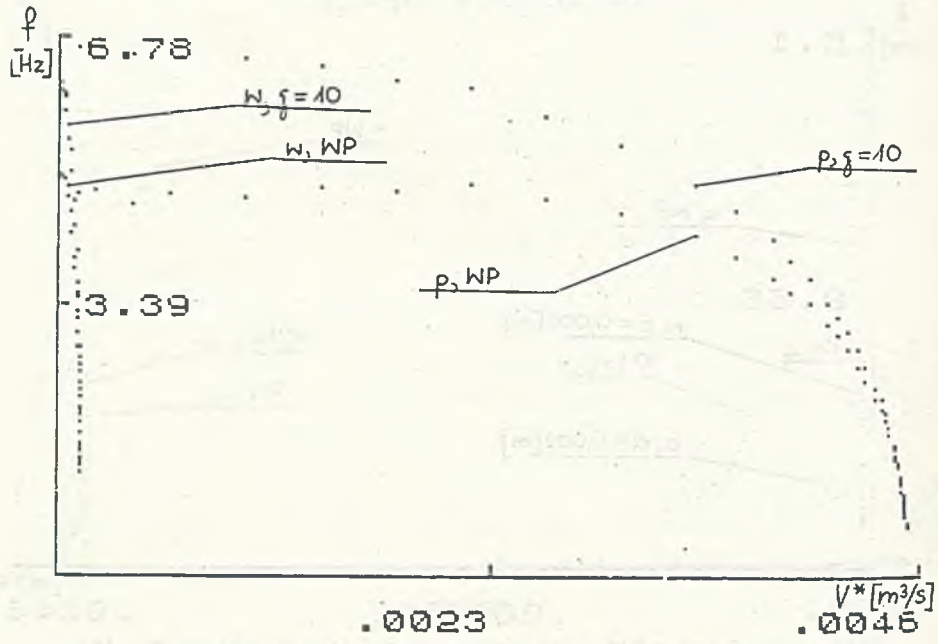
Rys. 3. Wpływ  $\varphi$  na charakterystykę  $t_0 = \Psi(V^*, \varphi, d, 1)$ , (22)  
 Fig. 3. The influence of the parameter  $\varphi$  on the characteristic  $t_0 = \Psi(V^*, \varphi, d, 1)$ , (22)

Rys. 4. Wpływ  $l$  na charakterystykę  $t_0 = \Psi(V^*, \varphi, d, l)$ , (22)Fig. 4. The influence of the parameter  $l$  on the characteristic  $t_0 = \Psi(V^*, \varphi, d, l)$ , (22)Rys. 5. Wpływ  $d$  na charakterystykę  $f = \chi(V^*, \varphi, d, l, \xi)$  (24)Fig. 5. The influence of the parameter  $d$  on the characteristic  $f = \chi(V^*, \varphi, d, l, \xi)$ , (24)



Rys. 6. Wplyw  $\varphi$  na charakterystyce  $f = \mathcal{K}(V^*, \varphi, d, l, \xi)$  (24)

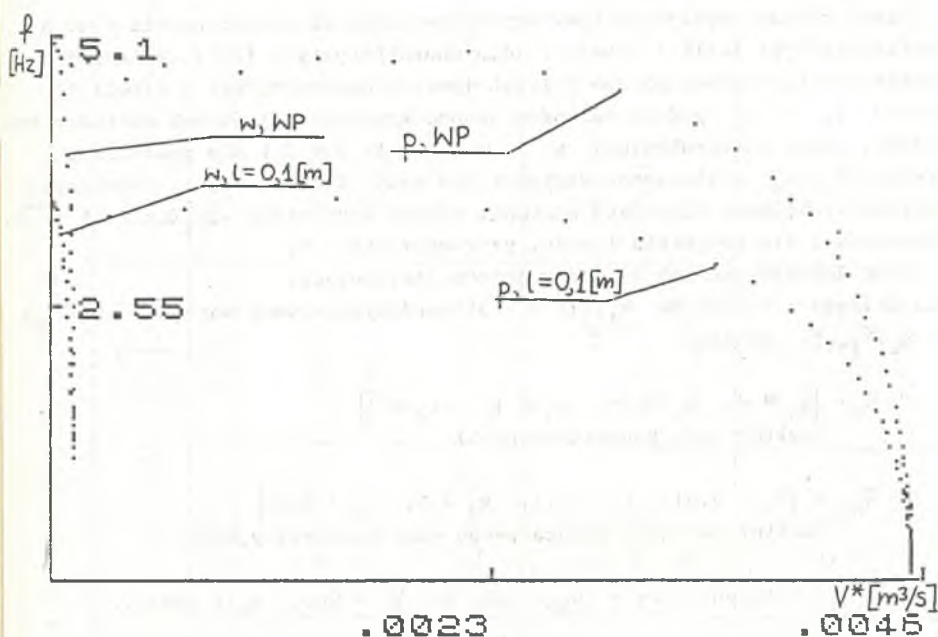
Fig. 6. The influence of the parameter  $\varphi$  on the characteristic  $f = \mathcal{K}(V^*, \varphi, d, l, \xi)$ , (24)



Rys. 7. Wplyw  $\xi$  na charakterystyce  $f = \mathcal{K}(V^*, \varphi, d, l, \xi)$  (24)

Fig. 7. The influence of the parameter  $\xi$  on the characteristic  $f = \mathcal{K}(V^*, \varphi, d, l, \xi)$ , (24)





Rys. 8. Wpływ  $l$  na charakterystykę  $f = k(V^*, \varphi, d, l, \xi)$  (24)

Fig. 8. The influence of the parameter  $l$  on the characteristic  $f = k(V^*, \varphi, d, l, \xi)$ , (24)

### 5. Ocena jakości charakterystyk

Każda z otrzymanych charakterystyk posiada szczególną cechę polegającą na tym, że składa się z dwóch odcinków o różnym nachyleniu. Wychodząc z założenia, że korzystniejsze są odcinki odpowiadające krótszym czasom  $t_0$  i  $t_c$ , a więc większym częstotliwościom drgań kulki, a to ze względu na właściwości dynamiczne przepływomierza, przyjęto następujące kryteria oceny charakterystyk:

- $k_1$  - zakres odcinka odpowiadającego lepszej dynamice, mierzony w [m<sup>3</sup>/s],
- $k_2$  - czułość, rozumiana jako wartość współczynnika kierunkowego prostej aproksymującej rozpatrywany odcinek, mierzona w [s<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] dla rys. 2-4, czyli charakterystyki (22) lub w [1/m<sup>3</sup>] dla rys. 5.8, czyli charakterystyki (24),

$k_3$  - liniowość charakterystyki na rozpatrywanym odcinku, rozumiana w sensie błędu średniokwadratowego, mierzona w [s] dla rys. 2-4 lub [Hz] na rys. 5-8.

Oceny charakterystyk wg powyższych kryteriów zbierają: tabela 1 (dla charakterystyki (22)) i tabela 2 (dla charakterystyki (24)), w każdej z krutek obu tych tabel podano 6 liczb (por. z opisem kratki w tabeli 1). Liczby  $l_1$  i  $l_2$  podają wartości danego kryterium dla dwóch wartości rozważanej cechy konstrukcyjnej  $x$  ( $x \equiv d, \varphi, l$  lub  $\xi$ ) dla powietrza. Liczby  $l_3, l_4$  analogiczne wartości dla wody. Liczby  $l_5, l_6$  przyjmują wartość względnego przyrostu wartości danego kryterium:  $\Delta k_i / \Delta x$ , ( $i = \overline{1,3}$ ), odpowiednio dla powietrza i wody, przy czym  $\Delta x > 0$ .

Plan doświadczeń można ująć w sposób następujący:

Dla każdego z kryteriów  $k_i$ , ( $i = \overline{1,3}$ ) porównywano dwie wartości  $k_i(\bar{x}_{WP})$  i  $k_i(\bar{x}_{(j)})$ , gdzie:

$$\bar{x} = [x_1 \equiv d, x_2 \equiv \varphi, x_3 \equiv \xi, x_4 \equiv l]$$

(wektor cech konstrukcyjnych)

$$\bar{x}_{WP} = [x_1 = 0,01, x_2 = 1,1, x_3 = 5, x_4 = 0,05]$$

(wektor wariantu podstawowego cech konstrukcyjnych)

$\bar{x}_{(j)}$  otrzymuje się z  $\bar{x}_{WP}$  tak, że  $x_j = \text{var}$ ,  $x_k = \text{const.}$ ,

$k \neq j$ ,  $j = \overline{1,4}$  (w stosunku do  $\bar{x}_{WP}$ )

Mówimy, że zmiana cechy  $x_j$  polepszyła kryterium  $k_i$  jeżeli:

$$k_1(\bar{x}_{(j)}) > k_1(\bar{x}_{WP})$$

$$|k_2(\bar{x}_{(j)})| > |k_2(\bar{x}_{WP})|$$

$$k_3(\bar{x}_{(j)}) < k_3(\bar{x}_{WP})$$

## 6. Wnioski końcowe

Analiza tabel 1 i 2 oraz rysunków od 2 do 8 pozwala na wyciągnięcie wniosków co do przebiegu charakterystyk (22) i (24) oraz wpływu wartości cech konstrukcyjnych  $d, \varphi, \xi$  i  $l$  na te charakterystyki. Oba rodzaje charakterystyk można aproksymować dwoma odcinkami linii łamanej: o dużym nachyleniu dla dużych przepływów  $V^*$  i małym dla przepływów małych. Kierując się kryterium dobrych właściwości dynamicznych, rozpatrywano odcinki odpowiadające dużym częstotliwościom drgań kulki, czyli małym przepływowom. Nie stwierdzono prawidłowości rządzącej wpływem wartości  $d, \varphi, \xi$  i  $l$  na li-

Oceny jakości charakterystyk  $t_o = \Psi(V, \varphi, d, l)$  (22)

Cechy konstrukcyjne	Kryteria oceny		$k_1$ zakres $\left[\frac{m^3}{s}\right]$		$k_2$ czułość $\left[\frac{s^2}{m^3}\right]$		$k_3$ liniowość [s]	
	powietrze	woda	powietrze	woda	powietrze	woda	powietrze	woda
d [m]								
0,002	$1_1$ $6,18 \cdot 10^{-5}$	$1_1$ $8,3 \cdot 10^{-7}$	$18,65 \cdot 10^3$	$3,29 \cdot 10^{-7}$	0,404	0,0386		
0,01	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	139,67	$5,76 \cdot 10^{-5}$	0,256	0,112		
Względny przyrost	$1_2$ 0,56 $1_5$	$1_4$ 0,016 $1_6$	$-23,13 \cdot 10^5$	$7,16 \cdot 10^{-3}$	-18,5	9,175		
$\varphi$								
1,01	$3,69 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	196,1	$6,11 \cdot 10^{-5}$	0,31	0,124		
1,1	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	139,67	$5,76 \cdot 10^{-5}$	0,256	0,112		
Względny przyrost	$9,22 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$	-626,98	$-3,9 \cdot 10^{-5}$	-0,6	-0,13		
l [m]								
0,05	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	139,67	$5,76 \cdot 10^{-5}$	0,256	0,112		
0,1	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	1014,74	$5,38 \cdot 10^{-5}$	2,83	0,104		
Względny przyrost	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$-2,1 \cdot 10^{-4}$	$17,5 \cdot 10^3$	$-7,6 \cdot 10^{-5}$	51,46	-0,16		

Oceny jakości charakterystyk  $f = \mathcal{H}(v^*, \varphi, d, l, \xi)$  (24)

Cechy konstrukcyjne	Kryteria oceny	$k_1$ zakres $\left[\frac{m^3}{s}\right]$		$k_2$ czułość $\left[\frac{Hz \cdot s}{m^3}\right]$		$k_3$ liniowość [Hz]	
		powietrze	woda	powietrze	woda	powietrze	woda
d [m]	0,002	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$-7,32 \cdot 10^4$	$-1,957 \cdot 10^{-8}$	0,763	0,724
	0,01	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	-773,947	$-1,038 \cdot 10^{-6}$	0,804	0,625
	Względny przyrost	0,556	0,0138	$9,05 \cdot 10^6$	$-1,27 \cdot 10^{-4}$	5,125	-12,375
$\varphi$	1,01	$3,68 \cdot 10^{-3}$	$10^{-6}$	-932,769	$1,56 \cdot 10^{-10}$	0,793	0,0082
	1,1	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	-773,947	$-1,038 \cdot 10^{-6}$	0,804	0,625
	Względny przyrost	$9,22 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^3$	$-1,15 \cdot 10^{-5}$	0,122	6,85
$\xi$	5	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	-773,947	$-1,038 \cdot 10^{-6}$	0,804	0,625
	10	$4,43 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	-988,431	$-1,037 \cdot 10^{-6}$	0,65	0,945
	Względny przyrost	$-1,6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$	-42,9	$-1,98 \cdot 10^{-8}$	$-3,08 \cdot 10^{-2}$	0,064
l [m]	0,05	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	-773,947	$-1,038 \cdot 10^{-6}$	0,804	0,625
	0,1	$4,53 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	-732,615	$-1,198 \cdot 10^{-6}$	0,677	0,397
	Względny przyrost	$4 \cdot 10^{-4}$	$-1,6 \cdot 10^{-4}$	826,64	$-3,19 \cdot 10^{-6}$	-2,54	-4,56



niowość charakterystyk. Można generalnie stwierdzić, że obliczone wartości błędów średniokwadratowych w stosunku do maksymalnej rzędnej charakterystyki (dla (22) ok. 0,2 s, dla (24) ok. 5 Hz) są korzystniejsze dla charakterystyk określonych zależnością (24), czyli dla pomiaru częstotliwości drgań kulki, a nie dla pomiaru czasu. Wzrost średnicy kulki  $d$  ma znaczny wpływ na wzrost zakresu oraz zmniejszenie się czułości, przy czym im bardziej gęste medium, tym wpływ ten jest mniejszy (czułość rozpatrujemy jako wartości bezwzględny danych z tabeli 1 i 2).

Wzrost stosunku średnic  $\varphi$  powoduje nieznaczny wzrost zakresu oraz dla powietrza znaczne zmniejszenie się czułości. Wzrost długości odcinka pomiarowego  $l$  wpływa na znaczne zmniejszenie czułości w przypadku powietrza. Wzrost stosunku  $\xi$  wpływa na zwiększenie się czułości w przypadku powietrza.

Generalnie, można stwierdzić, że wpływ poszczególnych cech maleje ze wzrostem gęstości i lepkości medium (jest zdecydowanie mniejszy dla wody niż dla powietrza). Otrzymane wyniki sugerują, że rozpatrywany przepływomierz, wg swej pierwotnej koncepcji, najlepiej nadaje się do pomiaru małych przepływów, dla mediów znacznie bardziej lepkich i gęstych od powietrza; powinien pracować w trybie pomiaru częstotliwości drgań kulki (liniowość). Ze względu na zakres powinien się charakteryzować dużym  $d$  i dużym  $\varphi$ . Z kolei zmniejszenie  $d$ ,  $\varphi$ ,  $l$  i wzrost  $\xi$  dodatnio wpływają na wzrost czułości w sensie jej wartości bezwzględnej. Świadczy to o antagonistycznym wpływie cech  $d$  i  $\varphi$  na kryteria  $k_1$  i  $k_2$ , co czyni problem polioptymalnym.

Najbliższe zamierzenia autora - to konstrukcja fizycznego modelu przepływomierza i weryfikacja prezentowanego tu modelu matematycznego oraz płynących z jego badania wniosków.

#### LITERATURA

- [1] Spencer J.L.: Flow Control System US Patent No 3, 662, 598, May 16, 1972.
- [2] Bailey S.J. Oscillating Ball Device Measures Ultra-Low Flows Control Engineering, 1979, Vol. 6, No 5.
- [3] Medlock R.S.: The techniques of flow measurement, Measurement and Control, 1982, 15, No 12.
- [4] Śmigieński J.: Elektromagnetyczne pływakowe przetworniki wydatku i ciśnienia. PWN, Warszawa-Poznań 1980.
- [5] Stępniewski W.: Kulkowy nadajnik objętościowego natężenia przepływu z kompensacją lepkościową. Pomiar - Automatyka - Kontrole 1968, nr 2.
- [6] Katys G.P.: Obiemnyje raschodomiery. Energiya Leningrad - Moskwa 1965.
- [7] Cieślowski K., Lammel L., Roszczyk M.: Niektóre aspekty przemysłowego pomiaru małych natężeń przepływu metodą pojemnościową. Pomiar - Automatyka - Kontrole, 1984, nr 6.
- [8] Bukowski J., Kijkowski P.: Kurs mechaniki płynów, PWN, Warszawa 1980.

- [9] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne. WNT, Warszawa 1982.

Recenzent: Prof. Zdzisław Kabza

Wpłynęło do Redakcji 4.02.86 r.

ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСХОДОМЕРА  
С КОЛБАТЕЛЬНЫМ ШАРИКОМ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Р е з ю м е

В статье представлены результаты моделирования на ЭВМ работы расходомера с колебательным шариком. Рассмотрены две избранные статические характеристики этого расходомера их зависимость от четырёх избранных конструктивных параметров. Проведена оценка характеристики с точки зрения критериев: предела, чувствительности и линейности.

COMPUTER ANALYSIS OF THE STATICAL CHARACTERISTICS  
OF AN OSCILLATING BALL FLOWMETER

S u m m a r y

In the paper some results of a computer simulation of the action of the oscillating ball flowmeter are given. Two static characteristics of the flowmeter and their relations of dependance on four considered design parameters are found and discussed. The evaluation of static characteristics considering three criteria: range, sensivity and linearity is made.

There are four design parameters: the ratio of the tube diameter to the ball diameter the ratio of the magnetic force to the ball weight in the moment of the switching of the electromagnet and lenght of the measurement sector, the ball diameter. The division of two characteristics: the frequency of the ball oscillation and the time of the falling down as a function of the flow into two sectors with small and big slope is presented. The sectors with shorter measurement cycle ie. with better dynamic properties are considered. The range is defined as the maximum value of the flow in those considered sectors and linearity as the mean-square error of this approximation. Analysis leads to the suggestion that escillating ball flowmeter is a good device for the small flows and medium ones which are denser and more viscous than the air.