

mgr inż. JAN ŁUKASZEWICZ  
mgr inż. STEFAN KOSZTOWSKI

Przemysłowy Instytut  
Automatyki i Pomiarów MERA-PIAP

Warszawa

## KOREKTORY PRZEPŁYWU ELEKTRONICZNEGO SYSTEMU AUTOMATYKI INTELEKTRAN

*W artykule omówiono sposoby realizacji i zastosowania elektronicznych korektorów przepływu.*

### 1. Wstęp

W nowoczesnym przemyśle coraz większą rolę odgrywa dokładność pomiaru parametrów procesu, zarówno ze względów ekonomicznych jak i kryteriów technologicznych. Jednym z ważniejszych pomiarów parametrów procesu technologicznego jest pomiar przepływu cieczy lub gazów.

Często stosowaną metodą pomiaru przepływu jest pomiar z wykorzystaniem różnicy ciśnień na organie spiętrzającym. Metoda ta charakteryzuje się dużą prostotą ze względu na brak ruchomych części mechanicznych w przewodzie, a także wysoką dokładnością.

Omawiane korektory przepływu, przy pomiarze w/w metodą, pozwalają wprowadzić korekcję od zmian parametrów mierzonych mediów takich jak woda, para wodna, powietrze i gaz ziemny w energetyce, czy gaz ziemny i gaz koksowniczy w gazownictwie. Szczególnie istotne znaczenie ma bardzo dokładny pomiar przepływu gazu ze względów rozliczeniowych.

### 2. Analiza praw przepływu

#### 2.1. Podstawowe prawa i pojęcia przepływu

Warunkiem koniecznym wystąpienia zmiany ciśnienia medium płynącego w przewodzie jest istnienie zmiany przekroju tego przewodu. Wynika to z zasady ciągłości strugi, która stwierdza, że iloczyn prędkości medium i przekroju przewodu jest stały. Całkowita energia przepływającego medium składa się z energii cieplnej, energii kinetycznej oraz energii potencjalnej, przy czym ta ostatnia składa się z energii ciśnienia i energii położenia.

Pomijając zmiany energii cieplnej z prawa zachowania energii wynika:

energia położenia + energia ciśnienia + energia kinetyczna = const

Wyrażając to matematycznie dla elementu objętości  $\Delta V$  otrzymamy [1]:

$$\Delta V \cdot \rho \cdot h + \Delta V \cdot P + \frac{\Delta V \cdot \rho}{2g} \cdot w^2 = \text{const}$$

Przekształcając powyższą zależność otrzymamy postać równania Bernoulliego:

$$h + \frac{P}{\rho} + \frac{w^2}{2g} = \text{const} \quad /1/$$

Poszczególne człony odpowiadają kolejno wymienionym energiom i oznaczają:

h — wysokość położenia przewodu

$\frac{P}{\rho}$  — wysokość słupa cieczy dającego ciśnienie hydrostatyczne P

$\rho$  — ciężar właściwy

$\frac{w^2}{2g}$  — wysokość, z której ciecz musi swobodnie spaść, aby osiągnąć prędkość w

g — przyspieszenie ziemskie

Z zasady ciągłości przepływu dla cieczy nieściśliwych wynika, że prędkości przepływu są odwrotnie proporcjonalne do przekrojów przewodów

$$S \cdot w = \text{const} \quad /2/$$

gdzie

S — przekrój przewodu

w — prędkość

Fakt zmiany prędkości pozwala nam napisać równania /1/ dla dwóch różnych przekrojów w następującej postaci:

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2g} = h_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2g} \quad /3/$$

Ponieważ w praktyce przewody są poziome, więc  $h_1 = h_2$

Po przekształceniu:

$$P_1 - P_2 = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \cdot \rho \quad /4/$$

Z wyrażenia /2/ i /4/ wynika, że zwężenie przekroju powoduje zwiększenie prędkości a więc spadek ciśnienia.

Równanie /2/ możemy napisać w postaci:

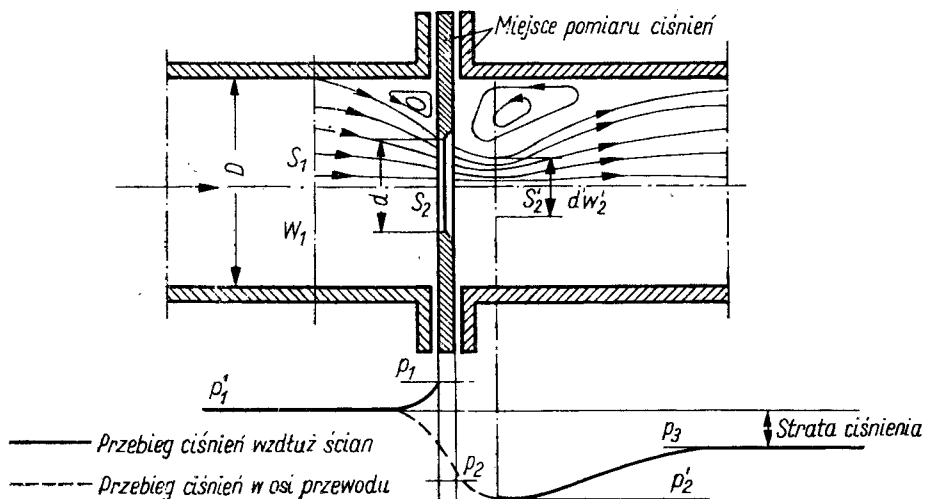
$$S_1 \cdot w_1 = S_2 \cdot w_2 \quad /5/$$

Wstawiając zależność /5/ do zależności /4/ i oznaczając  $\frac{S_2}{S_1} = m$ , otrzymamy:

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad /6/$$

## 2.2. Zależności określające przepływ, przy pomiarze metodą różnicy ciśnień

Zwężenie przewodu w praktyce osiąga się znormalizowanymi organami spiętrzającymi, takimi jak zwężka (kryza), dysza oraz dysza Venturiego. Stosowanie tych organów powoduje, że praktycznie zamiast ciśnień  $P'_1$  i  $P'_2$  mierzymy  $P_1$  i  $P_2$ . Dalsze odchyłki wynikają z różnicy przekrojów zwężki  $S_2$  i strugi  $S'_2$ , ze zmiany prędkości przed zwężką, spowodowanej lepkością czynnika. Odchyłki te są ujęte poprawką zwaną liczbą przepływu  $\alpha$ . Dla par i gazów na pomiar ciśnień  $P_1$  i  $P_2$  ma wpływ zmiana ciężaru właściwego za zwężeniem, stosunek  $\frac{P_1}{P_2}$ , stosunek przekrojów m oraz wykładnik adiabaty  $\kappa$ , według którego czynnik się rozpręża.



Rys.1. Rozkład strumienia i przebieg ciśnień w czasie przepływu przez zwężkę

Wpływy te są ujęte poprawką zwaną liczbą ekspansji  $\epsilon$ . Przepływ objętościowy ogólnie ma postać:

$$V = S_1 \cdot w_1 = S_2 \cdot w_2 \quad /7/$$

Uwzględniając równanie /7/, równanie /6/ oraz liczby  $\alpha$  i  $\epsilon$  otrzymamy wzór na przepływ objętościowy

$$V = \alpha \cdot \epsilon \cdot S_2 \cdot \sqrt{\frac{2g}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad /8/$$

przy czym  $\rho$  jest mierzone przed zwężeniem.

Przepływ masowy ma postać:

$$G = V \cdot \rho \quad /9/$$

Po podstawieniu zależności /8/ do zależności /9/ otrzymamy:

$$G = \alpha \cdot \epsilon \cdot S_2 \cdot \sqrt{2g \rho \cdot (P_1 - P_2)} \quad /10/$$

W praktyce wykorzystuje się następujące zależności [1]:

$$V = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot d_2^2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \text{ m}^3/\text{h} \quad /11/$$

$$G = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot d_2^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot (P_1 - P_2)} \text{ kg/h} \quad /12/$$

gdzie:

V — objętościowe natężenie przepływu w stanie ruchowym w  $\text{m}^3/\text{h}$

G — natężenie przepływu w jednostkach ciężaru w  $\text{kg/h}$

- $\alpha$  — liczba przepływu
- $\epsilon$  — liczba ekspansji
- $d_t$  — średnica otworu zwężki przy danej temperaturze czynnika w mm
- $\rho$  — ciężar właściwy czynnika w stanie ruchowym przed zwężeniem w  $\text{kg/m}^3$
- $P_1 - P_2$  — różnica ciśnień przed i za zwężeniem w  $\text{kg/m}^2 = \text{mm H}_2\text{O}$

Zależności /11/ i /12/ określają ogólnie przepływ objętościowy i masowy dla cieczy, par i gazów. Wartości liczb  $\alpha$  i  $\epsilon$  w tych wzorach są zależne, jak wspomniano, od parametrów mechanicznych przewodu i zwężki, od rodzaju przepływającego czynnika i jego parametrów statycznych i dynamicznych. Liczba przepływu  $\alpha$  zależy od liczby Reynoldsa wiążącej prędkość z lepkością czynnika. Przy dostatecznie dużych liczbach Reynoldsa, tzn. przy dużych prędkościach przepływającego czynnika, liczba przepływu  $\alpha$  zależy tylko od stosunku przekrojów  $m$  ( $m = \frac{S_2}{S_1}$ ). W praktyce przemysłowej mamy do czynienia prawie wyłącznie z przepływami burzliwymi, tzn. dużymi liczbami Reynoldsa. Istniejące normy narzucają geometrię zwężki, określającą granicę stałości liczby  $\alpha$ . Liczba ekspansji  $\epsilon$  dla cieczy, równa jest 1, zaś dla gazów i par jej wartość należy odczytywać z wykresów. Gazy i pary w odróżnieniu od nieściśliwych cieczy, zmieniają ciężar właściwy przy zmianach ciśnienia i temperatury, zgodnie z równaniami termodynamiki.

Z praw gazów wynika następujące równanie stanu gazu

$$\rho = \rho_N \frac{P \cdot T_N}{P_N \cdot T \cdot K} \text{ kg/m}^3 \quad /13/$$

oraz dla gazu doskonałego

$$\rho = \rho_N \frac{P \cdot T_N}{P_N \cdot T} \text{ kg/m}^3 \quad /14/$$

gdzie:

- $\rho, P, T$  — ciężar właściwy, ciśnienie, temperatura bezwzględna w stanie ruchowym przed zwężeniem
- $\rho_N, P_N, T_N$  — parametry gazu w normalnym stanie fizycznym ( $T_N 273,15^\circ\text{K} = 0^\circ\text{C}, P_N = 760 \text{ mm Hg}$ )
- $K$  — współczynnik nadściśliwości gazu

### 3. Techniczne podstawy wyboru funkcji korektora przepływu

#### 3.1. Spotykane zakresy parametrów mediów

Woda wykorzystywana w elektrowniach

woda chłodząca  $\vartheta = 0^\circ \dots 100^\circ\text{C}, P \text{ ok. } 1 \text{ at}$

woda zasilająca  $\vartheta = 20^\circ \dots 360^\circ\text{C}, P \text{ ok. } 200 \text{ at}$

Są to graniczne wartości występujących temperatur i ciśnień. Praktyczne zakresy ich zmienności są niewielkie np.  $240^\circ \dots 320^\circ\text{C}$ , oraz  $180 \dots 220 \text{ at}$ , a w stanie ustalonym dla danego obiektu zmiany temperatury są np. rzędu  $20^\circ\text{C}$ .

## Para wodna wykorzystywana w elektrowniach

zakres temperatury  $\vartheta = 460^{\circ}\dots 600^{\circ}\text{C}$

ciśnienie  $P = 110\dots 150 \text{ at}$

W stanie pracy zmiany temperatury są rzędu  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ , zaś zmiany ciśnienia  $\pm 10\%$ .

### Powietrze

powietrze zimne  $\vartheta = 10^{\circ}\dots 50^{\circ}\text{C}$

powietrze gorące  $\vartheta = 50^{\circ}\dots 400^{\circ}\text{C}$

### Gaz ziemny

zakres temperatury  $\vartheta = 8^{\circ}\dots 18^{\circ}\text{C}$

ciśnienie  $P = 1\dots 60 \text{ at}$

### Gaz koksowniczy

zakres temperatury  $\vartheta = 10^{\circ}\dots 40^{\circ}\text{C}$

ciśnienie  $P = 1\dots 32 \text{ at}$

## 3.2. Analiza pomiaru natężenia przepływu

Biorąc pod uwagę stwierdzenia z punktu 2.2., można wysnuć następujące wnioski, dotyczące praktycznych zależności określających przepływy.

### 3.2.1. Pomiar przepływu wody

Woda jest w zasadzie cieczą nieściśliwą, dlatego można przyjąć, że jej ciężar właściwy zależy jedynie od temperatury. W praktyce interesuje nas przepływ wody w jednostkach ciężaru.

Ponieważ  $\epsilon = 1$  z zależności /12/ otrzymamy:

$$G = 0,01252 \cdot \alpha \cdot d_g^2 \cdot \sqrt{\Delta P \cdot \rho_g} \text{ kG/h} \quad /15/$$

gdzie:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$\rho_g$  - ciężar właściwy wody w danej temperaturze

Zależność ciężaru właściwego od temperatury jest dość złożoną funkcją, dlatego dla dokładnego pomiaru przepływu należy mierzyć gęstość właściwą wody  $\gamma (\rho = \gamma \cdot \rho)$ , zwłaszcza w zakresie wysokich temperatur  $200^{\circ}\dots 360^{\circ}\text{C}$ . Jednak przy małych wahanich temperatury  $\rho$  można uznać za stałe i ustalić jego wartość na podstawie tablic. Ponieważ  $\rho$  występuje pod pierwiastkiem, względny błąd ciężaru właściwego wpływa w połowie na wielkość przepływu. Na przykład w zakresie temperatury  $0^{\circ}\dots 100^{\circ}\text{C}$  zmiana  $\rho$  powoduje błąd pomiaru przepływu rzędu 2,2%. Tak więc w wymienionym wyżej zakresie temperatury, błąd pomiaru przepływu mieści się w rozsądnych granicach, nawet przy dość dużych wahanich wokół temperatury ustalonej. W zakresie temperatury  $300^{\circ}\dots 320^{\circ}\text{C}$  zmiana  $\rho$  powoduje błąd pomiaru ok. 3%, a więc przy zmianach temperatury rzędu  $20^{\circ}\text{C}$  w stanie ustalonym błąd pomiaru jest praktycznie do przyjęcia.

Tablica 1

Ciężary właściwe wody

Temperatura °C	Ciężar właściwy $\gamma_1$ kG/m <sup>3</sup>	$\sqrt{\gamma_1}$ $\sqrt{\text{kG/m}^3}$	Temperatura °C	Ciężar właściwy $\gamma_1$ kG/m <sup>3</sup>	$\sqrt{\gamma_1}$ $\sqrt{\text{kG/m}^3}$
0	999,8	31,62	120	943,1	30,71
4	1000,0	31,63	140	926,1	30,43
10	999,6	31,62	160	907,4	30,12
20	998,6	31,59	180	886,9	29,78
30	995,6	31,55	200	864,7	29,40
40	992,2	31,50	220	840,3	28,99
50	988,0	31,43	240	813,6	28,52
60	983,2	31,36	260	784,0	28,00
70	977,7	31,27	280	750,7	27,40
80	971,8	31,17	300	712,5	26,69
90	965,3	31,07	320	667,0	25,83
100	958,3	30,96	370	448,0	21,17
110	951,0	30,84			

Przy wymaganej wyższej dokładności należałoby stosować skomplikowany pomiar gęstości właściwej wody, co jest niekiedy stosowane. Jeśli podane reżimy są utrzymywane na obiekcie, pomiar  $\rho$  jest zbyt precyzyjny i do pomiaru przepływu można stosować funktor o następującej zależności:

$$G = k \sqrt{\Delta P} \quad /16/$$

spełnionej przez przetwornik różnicy ciśnień o charakterystyce pierwiastkowej, powszechnie stosowany w przemyśle.

3.2.2. Pomiar przepływu pary wodnej

Stosowana w energetyce para przegrzana podlega takim samym prawom jak gazy. Wstawiając zależność /13/ do /11/ uzależnimy przepływ objętościowy od zmian temperatury i ciśnienia oraz przeliczając wielkość przepływu objętościowego na normalny stan fizyczny według zależności

$$V_N = V_1 \frac{P_1 \cdot T_N}{P_N \cdot T_1} \text{ Nm}^3 \quad /17/$$

otrzymamy [1]:

$$V_N = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot d_D^2 \sqrt{\frac{1}{\rho_N} \frac{T_N}{P_N} \cdot \frac{\Delta P}{T} \frac{P}{K}} \text{ Nm}^3 \quad /18/$$

Dla pary wodnej zależność /18/ oznacza objętość hipotetycznej pary w warunkach normalnych.

W praktyce interesuje nas produkt pary, a więc woda w jednostkach ciężaru. Uwzględniając ten fakt, jak również to, że przy wysokich temperaturach i ciśnieniach duży wpływ ma współczynnik nadsyciłości  $K$ , oraz uwzględniając dodatkowo, że blisko obszaru nasycenia pary wodnej, nie podlega ona prawom gazu doskonałego, rozsądnie jest mierzyć przepływ pary wodnej w jednostkach ciężaru wychodząc ze średnich warunków ustalonych na obiekcie, dla których ciężar właściwy pary można odczytać z tablic.

Posługując się zależnością /14/ otrzymamy:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \text{ kg/m}^3 \quad /19/$$

gdzie  $\rho_0$  – ciężar właściwy pary przy temperaturze  $T_0$  i ciśnieniu  $P_0$

Ponieważ w tablicach występuje objętość właściwa  $V_0 = \frac{1}{\rho_0}$ , po wstawieniu zależności /18/ do /12/ otrzymamy:

$$G = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot d_g^2 \cdot \sqrt{\frac{T_0}{V_0 \cdot P_0}} \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{T}} \text{ kg/h} \quad /20/$$

Przeanalizujemy zależność /20/ dla pary w warunkach podanych w punkcie 3.1. Jeżeli punkt odniesienia  $P_0, T_0, V_0$  umieścimy pośrodku podanego obszaru zmienności ciśnienia i temperatury, to według zależności /20/ otrzymamy błędy poniżej 1 %, w porównaniu do wielkości przepływu obliczonego za pomocą wybranych z tablic wartości  $\sqrt{V}$  [1]. Dodatkowy wpływ na błąd pomiaru ma jak wiadomo liczba ekspansji  $\epsilon$ . Zakładając możliwość zmiany przepływu od zera do wartości maksymalnej i błąd od liczby  $\epsilon$  w granicach 1 % dla pary wodnej, oraz stosunek przekrojów  $m = 0,5$ , wartość  $\frac{\Delta P}{P}$  powinna być mniejsza niż 0,055.

Tablica 2

Pierwiastki kwadratowe  $\sqrt{V}$  z objętości właściwej pary wodnej

Temperatura, °C		470	480	490	500	510	520	530
Ciśnienie, at	$\sqrt{V}$							
	100	0,1780		0,1830				0,1876
	110							
	120			0,1655				
	130							
140	0,1470		0,1518				0,1561	

W praktyce stosunek ten jest jeszcze mniejszy. Jest możliwe zaprojektowanie zwężki do danego przekroju przewodu i przetwornika różnicy ciśnień w ten sposób, aby błąd od zmiany  $\epsilon$  przy zmianach przepływu był do pominięcia.

### 3.2.3. Pomiar przepływu gazu

Dla pomiarów przepływu gazu ważna jest w całej rozciągłości zależność /18/ oraz uwagi dotyczące liczby ekspansji  $\epsilon$ , opisane w punkcie 3.2.2. Ponieważ w zależności /18/ występuje współczynnik nadciśliwości  $K$  wskazane jest, aby w korektorze przepływu istniała możliwość nastawiania tej wielkości.

### 3.3. Wybór funkcji realizowanej przez korektor przepływu

Z analizy pomiaru przepływu wynika konieczność rozpatrzenia następujących wariantów funkcjonalnej struktury korektora przepływu:

$$1) \quad G = k_1 \cdot \sqrt{\Delta P \cdot \rho} \quad \text{lub} \quad G = k_2 \cdot \sqrt{\Delta P \cdot P}$$

w przypadku pomiaru gęstości lub przy niewielkich wahanach temperatury czynnika przepływającego,

$$2) \quad G = k_3 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{T}} \quad \text{przepływ masowy dla pomiaru przepływu pary wodnej,}$$

$$3) \quad V = k_4 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{T}} \quad \text{przepływ objętościowy dla pomiaru przepływu gazów przy niskich ciśnieniach i temperaturach}$$

$$\text{oraz} \quad V = k_4 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{K \cdot T}} \quad \text{przepływ objętościowy dla pomiaru przepływu gazów przy wysokich ciśnieniach i temperaturach.}$$

Ze względu na powszechne stosowanie w przemyśle przetworników różnicy ciśnień  $\Delta P$  o charakterystyce pierwiastkującej, można analogicznie do poprzednich utworzyć następujące warianty:

$$1') \quad G = k_1 \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\rho} \quad \text{lub} \quad G = k_2 \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{P}$$

$$2') \quad G = k_3 \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\frac{P}{T}}$$

$$3') \quad V = k_4 \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\frac{P}{T}} \quad \text{oraz} \quad V = k_4 \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\frac{P}{T \cdot K}}$$

Z podanych wariantów wynikają dwa podstawowe funkctory matematyczne, z których pozostałe warianty można utworzyć jako pochodne:

$$Q = X \sqrt{\frac{Y}{KZ}} \quad \text{oraz} \quad Q = \sqrt{\frac{XY}{KZ}}$$

Podane warianty wyczerpują stosowane metody korekcji przepływu.



#### 4. Statystyczna analiza błędów układu korekcji przepływu

Dla analizy przyjmujemy następującą postać funkcji realizowanej przez korektor przepływu:

$$V = k \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{T}} \quad /21/$$

Błąd pomiaru przepływu jest zależny od następujących błędów systematycznych:

- a) błędu przetwarzania różnicy ciśnień  $\delta_{(\Delta P)}$  składającego się z błędu pochodzącego od tolerancji konstrukcyjnych zwężki  $\delta_z$  oraz błędu przetwornika różnicy ciśnień  $\delta_v$
- b) błędu przetwarzania ciśnienia  $\delta_p$
- c) błędu przetwarzania temperatury  $\delta_g$
- d) błędu wnoszonego przez korektor przepływu  $\delta_k$

Dla statystycznej analizy błędów należy przyjąć rozkłady prawdopodobieństwa uchybów systematycznych oraz rozkłady sygnałów. Korektor przepływu pracuje z reguły, przy ustalonych optymalnych sygnałach, a więc ich rozkłady można dla uproszczenia pominąć w analizie [3].

Błędy systematyczne podawane dla urządzeń, określają dopuszczalne ich granice. Można przyjąć rozkłady prostokątne (jednostajne) dla tych błędów, co jest wygodne ze względów obliczeniowych jak i częściowo uzasadnione technicznie, gdyż praktycznie można założyć, że każda wartość błędu w określonych przez producenta granicach jest jednakowo prawdopodobna. Jeżeli każdy element układu ma prostokątny rozkład błędów, to suma dwóch błędów ma rozkład trójkątny a sumę już ponad 3 rozkładów prostokątnych można uznać za rozkład normalny, przy czym sumować można rozkłady prostokątne o tych samych granicach. Sumując prostokątne rozkłady o różnych granicach popełniamy błąd, który jak wskazują dokładne analizy nie zmniejsza błędu wypadkowego, zwłaszcza gdy granice rozkładów są zbliżone. Takie przybliżenie pozwala na prostą statyczną analizę błędów. Z definicji, dla rozkładu prostokątnego

$$\sigma = \frac{\delta}{\sqrt{3}} \quad /22/$$

gdzie:

- $\sigma$  – odchylenie standardowe
- $\delta$  – przedział zmienności

Odchylenie standardowe całego układu wyraża się następującą zależnością dla rozkładu normalnego:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots} \quad /23/$$

Kładąc  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  itd. dla rozkładu prostokątnego można napisać

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots} \quad /24/$$

gdzie:

$\delta_1, \delta_2 \dots$  itd. są błędami systematycznymi.

Uwzględniając zasady statystyki matematycznej w praktycznych zastosowaniach, możemy przyjąć przedział ufności  $2\sigma$  jako całkowity błąd systematyczny układu. Przyjęcie przedziału  $2\sigma$  oznacza 95,5 procentowy przedział ufności tzn. na 1000 układów korekcji, 955 będzie miało następujący błąd pomiaru

$$\delta_c = 2\sigma = 1,155 \cdot \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots} \quad /25/$$

Układ nieliniowy opisany zależnością  $V = f(x, y, z)$  ma błąd określony różniczką zupełną

$$dV = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz \quad /26/$$

gdzie pochodne cząstkowe są tu współczynnikami wagi błędów  $\delta$ , przy przyjęciu  $\delta$  w miejsce różniczek zgodnie z zasadami statystyki. Na podstawie powyższych rozważań, błąd całkowity przy uwzględnieniu błędu  $\delta_f$  wprowadzanego przez funkcyj jest następujący [3]:

$$\delta_c = 1,155 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \cdot \delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \cdot \delta_z\right)^2 + \delta_f^2} \quad /27/$$

W ten sposób, błąd dla zależności /21/ ma postać następującą:

$$\delta_c = 1,155 \sqrt{\frac{k^2 \cdot P}{4T \cdot \Delta P} \cdot \delta_{(\Delta P)}^2 + \frac{k^2 \cdot \Delta P}{4TP} \cdot \delta_P^2 + \frac{k^2 \cdot \Delta P \cdot P}{4T^3} \delta_\theta^2 + \delta_k^2} \quad /28/$$

przy czym  $\delta_{(\Delta P)}^2 = \delta_z^2 + \delta_r^2$

Ponieważ największe dokładności osiąga się przy maksymalnych sygnałach wejściowych i wyjściowych korektora, można założyć  $\Delta P = 100\%$ ;  $P = 100\%$ ;  $T = 100\%$ ;  $V = 100\%$ , jako wielkości zbliżone do zakładanych przez projektanta. Uwzględniając te założenia otrzymamy z zależności /21/ przy  $k = 1$ , następujący błąd całkowity:

$$\delta_c = 1,155 \sqrt{\frac{1}{4} \delta_{(\Delta P)}^2 + \frac{1}{4} \delta_P^2 + \frac{1}{4} \delta_\theta^2 + \delta_k^2} \quad /29/$$

Normy określają wartość błędu od tolerancji konstrukcyjnych zwężki  $\delta_z = \pm 1\%$ . Błąd przetworników różnicy ciśnień stosowanych w kraju  $\delta_r = \pm 1\%$ .

Stąd

$$\delta_{(\Delta P)}^2 = 1^2 + 1^2 = 2$$

Błąd przetwornika ciśnienia, analogicznego do przetwornika różnicy ciśnień  $\delta_P = \pm 1\%$ . Błąd przetwornika temperatury  $\delta_\theta = \pm 0,5\%$ . Najwłaściwsze jest przyjęcie wartości błędu wnoszonego przez korektor przepływu jako  $\delta_k = \pm 1\%$ .

Podstawiając do zależności /28/ wartości błędów  $\delta_{(\Delta P)}$ ,  $\delta_P$ ,  $\delta_\theta$  oraz  $\delta_k$  otrzymamy

$$\delta_c \cong 1,45\%$$

Obliczona wielkość błędu pomiaru całego układu korekcji przepływu jest wystarczająca dla procesów technologicznych.

## 5. Korektory przepływu systemu INTELEKTRAN

### 5.1. Przeznaczenie korektora przepływu

Korektor przepływu jest przeznaczony do korekcji pomiaru przepływu od ciśnienia i temperatury. Może być przystosowany do współpracy z aparatami o standardowym sygnale prądu stałego: 0...5 mA; 0...20 mA; 4...20 mA.

### 5.2. Podstawowe parametry techniczne korektora przepływu

#### 5.2.1. Wariant I korektora typ ABQ-21A

Funkcja aparatu

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{(273 + \vartheta) K}}$$

Sygnały wejściowe

wejście  $\Delta P$  i  $P$  0...20 mA; 4...20 mA lub 0...5 mA, wejście  $\vartheta$  - 0...600°C;  
termometr oporowy Pt 100, współczynnik  $K$  regulowany 1...3.

#### 5.2.2. Wariant II korektora typ ABQ-21B

Funkcja aparatu

$$V = \sqrt{\Delta P \cdot P} \quad \text{lub} \quad V = \sqrt{\Delta P \cdot \rho}$$

Sygnały wejściowe 0...20 mA; 4...20 mA lub 0...5 mA

#### 5.2.3. Parametry dla obu wariantów

Sygnały wyjściowe 0...20 mA; 4...20 mA lub 0...5 mA; błąd podstawowy  $\pm 1\%$  w tym pełzanie zera 0,25 %; czas trwania procesu przejściowego  $T_{95} \% \leq 1$  s; napięcie zasilania  $220^{+10}_{-15} \%$ ; 50 Hz; temperatura otoczenia  $+5...+60^\circ\text{C}$ ; błędy dodatkowe: od zmiany temperatury otoczenia 0,25%/10 K; pozostałe  $\pm 0,25\%$ ; obudowa skrzynkowa.

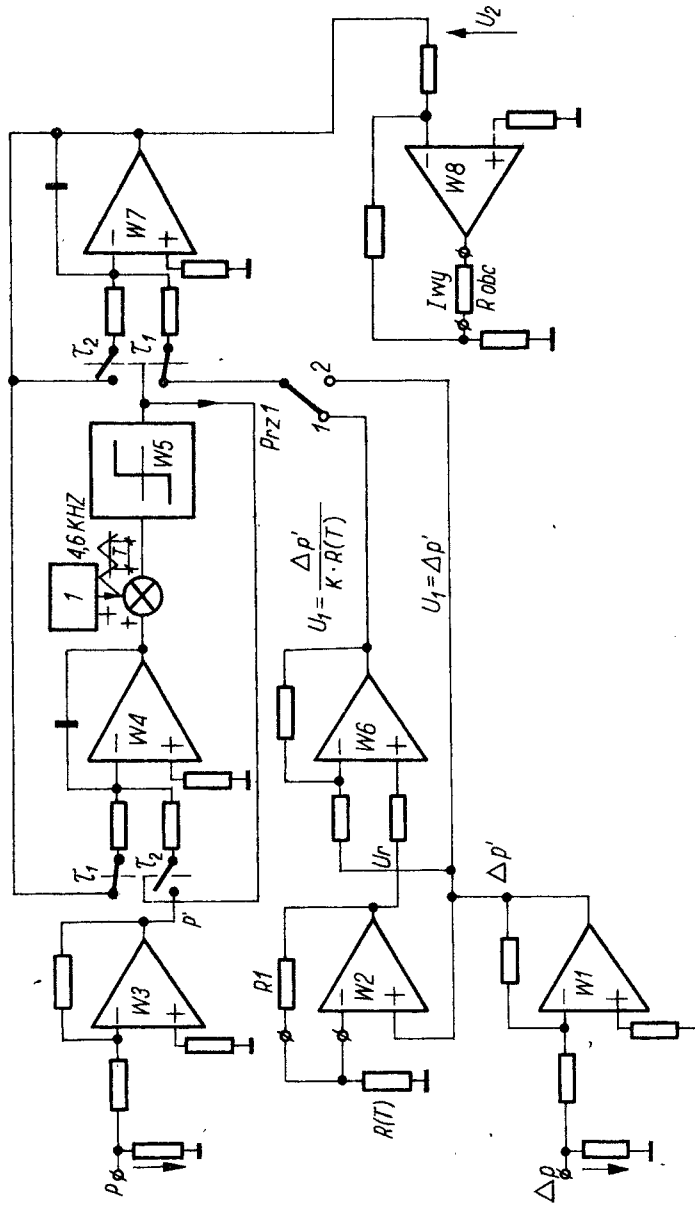
## 6. Zasada działania i opis układu elektronicznego

Korektor przepływu zrealizowano w oparciu o układ realizujący funkcję pierwiastka z iloczynu dwóch wielkości. Schemat ideowy korektora przedstawia rys.2 [8]. Układ realizujący funkcję pierwiastka z iloczynu składa się z dwóch wzmacniaczy całkujących  $W_4$ ,  $W_7$ , generatora napięcia trójkątnego 1, przerzutnika  $W_5$  oraz czterech kluczy tranzystorowych. Sygnały napięciowe  $P'$ ,  $U_2$  są z częstotliwością 4,6 kHz przyłączone do wejścia wzmacniacza  $W_4$ . Napięcie na wyjściu tego wzmacniacza będąc całką sumy napięć  $P'$ ,  $U_2$  przesuwa napięcie trójkątne na wejściu przerzutnika  $W_5$ , powodując jednocześnie zmianę wypełnienia impulsu wyjściowego. Układ ten objęty jest pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego z wyjścia przerzutnika na układ sterowania kluczy tranzystorowych. W ten sposób w stanie ustalonym przy dostatecznie dużym wzmacnieniu  $W_4$  różnica napięć węzła sumującego jest równa 0.

$$U_2 \frac{\tau_1}{T} - P' \cdot \frac{\tau_2}{T} = 0 \quad /30/$$

stąd

$$\frac{U_2}{P'} = \frac{\tau_2}{\tau_1}$$



Rys.2. Schema: funkcjonalny korektora przepływu ABQ-21

Działanie wzmacniacza  $W_7$  jest analogiczne jak wzmacniacza  $W_4$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad /31/$$

Powyższe równania dają zależność

$$U_2 = \sqrt{P \cdot U_1} \quad /32/$$

Sygnał napięciowy  $P'$  otrzymujemy na wzmacniaczu  $W_3$  z wejściowego sygnału prądowego  $P$ . Sygnał napięciowy  $U_1$  w pozycji 1 przełącznika  $Prz 1$  otrzymujemy przez zsumowanie na wzmacniaczu  $W_6$  przetworzonego na wzmacniaczu  $W_1$  sygnału prądowego  $\Delta P$  oraz sygnału napięciowego  $U_r$  ze wzmacniacza  $W_2$ .

$$U_1 = \Delta P' - U_r = \Delta P' - \Delta P' \left(1 + \frac{R_1}{R(T)}\right) = -\Delta P' \frac{R_1}{R(T)} = \frac{\Delta P}{K \cdot R(T)}$$

gdzie  $K = \frac{1}{R_1}$

Po podstawieniu do ostatniego wzoru otrzymujemy zależność

$$U_2 = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{K \cdot R(T)}} \quad /33/$$

Następnie sygnał napięciowy  $U_2$  zostaje przetworzony na wzmacniaczu 8 na prąd wyjściowy. W ten sposób opisany układ realizuje zależność

$$I_{wy} = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{K \cdot R(T)}} \quad /34/$$

W pozycji 2 przełącznika  $Prz 1$  układ także realizuje zależność /32/ z tym, że sygnał  $U_1$  jest równy  $\Delta P$ .

W ten sposób otrzymujemy

$$U_2 = \sqrt{\Delta P \cdot P} \quad /35/$$

oraz

$$I_{wy} = \sqrt{\Delta P \cdot P}$$

## 7. Przegląd zastosowań korektorów przepływu w układach pomiarowych

W poprzednich rozdziałach określono na podstawie praw przepływu, wymagane zależności matematyczne spełniane przez urządzenia służące do korekcji mierzonego przepływu przy zmianach temperatury i ciśnienia przepływającego czynnika. Podano także przykłady rozwiązania elektronicznego korektora przepływu, opracowanego w MERA-PIAP. Zastosowanie urządzenia elektronicznego powoduje konieczność stosowania współpracujących z nim elektronicznych przetworników pomiarowych. Rozpatrzmy możliwości zastosowania korektorów przepływu o różnych funkcjach matematycznych w zależności od stosowanych urządzeń współpracujących i od warunków istniejących na obiekcie.

Dla określenia natężenia przepływu lub wielkości przepływu interesuje nas pomiar trzech wielkości, a mianowicie:

- różnicy ciśnień występującej na organie spiętrzającym w przewodzie,

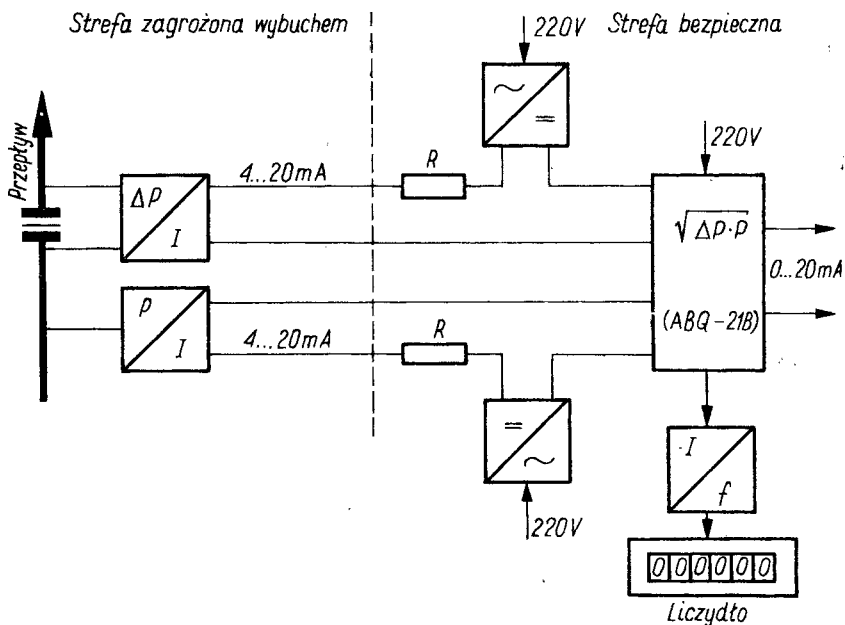
- ciśnienia absolutnego przed zwężką,
- temperatury czynnika przed zwężką.

Do pomiaru tych wielkości powszechnie stosuje się następujące urządzenia:

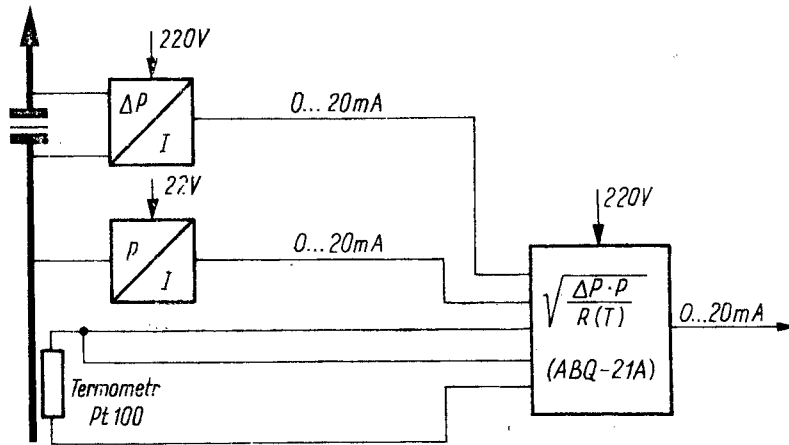
- przetwornik różnicy ciśnień na prąd o charakterystyce liniowej —  $\Delta P/I$ ,
- przetwornik różnicy ciśnień na prąd o charakterystyce pierwiastkującej —  $\sqrt{\Delta P}/I$ ,
- przetwornik ciśnienia na prąd —  $P/I$ ,
- przetwornik temperatury  $mV/I$  współpracujący z termoelementem.

Wymienione przetworniki mogą posiadać zerowe sygnały wyjściowe np. 0...20 mA z oddzielną linią zasilającą lub mogą być wykonywane jako dwuprzewodowe z niezerowym sygnałem wyjściowym np. 4...20 mA, przy czym wstępny poziom sygnału 4 mA służy jako zasilanie przetwornika. Konstrukcja tych ostatnich pozwala na doprowadzanie niewielkich mocy do przetwornika na poziomie małych napięć, co ma wyjątkowe znaczenie w przypadkach, gdy na obiektach występuje szczególne zagrożenie wybuchem, przede wszystkim w przemyśle chemicznym. Ponadto system dwuprzewodowy pozwala jednoznacznie stwierdzić przerwę w układzie pomiarowym w przypadku wystąpienia zerowego sygnału wyjściowego, co ma olbrzymie znaczenie dla kontroli procesów o wymaganej wysokiej niezawodności.

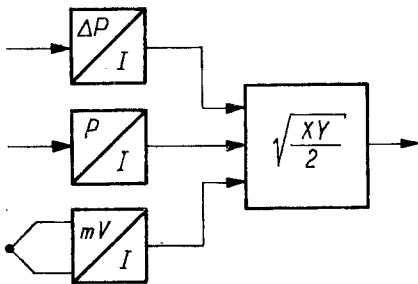
Oprócz wymienionych przetworników stosuje się powszechnie do pomiaru temperatury termometr oporowy przetwarzający zmiany temperatury na zmiany rezystancji czujnika —  $\Delta \vartheta / \Delta R$ . Sygnał wyjściowy korektora przepływu współpracującego z przetwornikami pomiarowymi odwzorowuje wielkość przepływu na jednostkę czasu tzn. natężenie przepływu. Na rys. 3, 4, 5, 6, 7 przedstawiono sposoby realizacji układów pomiarów natężenia przepływu z korekcją.



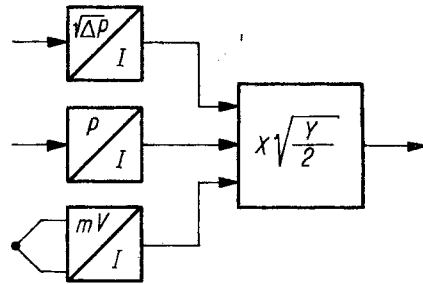
Rys. 3. Współpraca korektora przepływu z przetwornikami o niezerowym sygnale wyjściowym



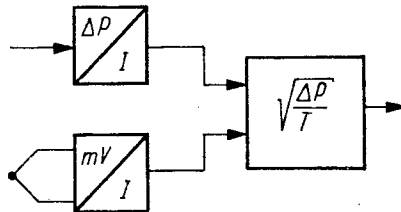
Rys.4. Zastosowanie korektora z parametrycznym wejściem od temperatury



Rys.5. Pomiar przepływu z korekcją od temperatury i ciśnienia



Rys.6. Korektor współpracujący z przetwornikiem różnicy ciśnień o charakterystyce pierwiastkującej



Rys.7. Korektor wprowadzający tylko korekcję od temperatury

W wielu przypadkach sygnał natężenia przepływu jest wykorzystywany do określania globalnego przepływu. Dla określenia wielkości globalnego przepływu należy uzyskać całkę sygnału korektora w określonym odstępie czasu.

$$W = \int_0^{t_1} Q dt \quad /36/$$

gdzie:

Q — natężenie przepływu

W — wielkość przepływu od chwili 0 do chwili  $t_1$

W tym celu stosuje się zazwyczaj przetworniki sygnału elektrycznego prądowego lub napięciowego na częstotliwość, które wraz z liczydłem elektromechanicznym jako elementem całkującym, realizują funkcję /36/ dając bezpośredni odczyt wielkości przepływu (rys.3). Rodzaj realizowanej przez korektor funkcji zależy od sposobów pomiaru parametrów  $\Delta P$ , P, T. Nie zawsze jednak jest konieczny pomiar ciśnienia i temperatury. Dość często jeden z tych parametrów jest bardzo dokładnie utrzymywany w układzie regulacji czy to ze względów technologicznych, czy też bezpieczeństwa.

## 8. Zakończenie

W artykule omówiono sposoby realizacji i zastosowania elektronicznych korektorów przepływu. Opracowane w MERA-PIAP i produkowane w Zakładzie Doświadczalnym MERA-PIAP dwa warianty korektora przepływu są wykorzystywane przez krajowy przemysł gazowniczy i znajdują się w stadium badań pod kątem zastosowania w przemyśle naftowym.

Ponieważ warianty te nie zapewniają możliwości realizacji dowolnych układów pomiarowych, należy pamiętać, że w przypadku rozwinięcia się układów pomiaru przepływu, rozszerzenie asortymentu tych urządzeń stanie się koniecznością.

## Literatura

- [1] Kuratow T.: Pomiary przepływów cieczy, par i gazów. Katowice 1967. Wyd. „ŚLĄSK”.
- [2] Bukowski J.: Mechanika płynów. Warszawa 1959. PWN.
- [3] Prospekt firmy Taylor Instrument Companies Mass Flow Computer. Jan 1969.
- [4] Fisz M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Warszawa 1967. PWN.
- [5] Katalog firmy Hartmann Braun Prozess — Regelsystem — PROTRONIC. Mai 1970.
- [6] Katalog firmy Siemens Regelsystem — TELEPERM B. Juni 1970
- [7] Korektor przepływu. Wstępne założenie techniczne. Dokumentacja nr 1004. PIAP.
- [8] Korektor przepływu ABQ-21A, ABQ-21B. Dokumentacja modelu użytkowego nr 1384. PIAP.