

JANUSZ PIOTROWSKI
Katedra Miernictwa Przemysłowego

TERMOANEMOMETRYCZNY RÓŻNICZKUJĄCY ANALIZATOR GAZU

Streszczenie. Przedstawiono nowy sposób pomiaru polegający na zastosowaniu dwóch detektorów czułych na wielkość mierzoną połączonych różnicowo przy czym jeden z detektorów działa z opóźnieniem Δt . Wskutek tego sygnał wyjściowy analizatora jest proporcjonalny do zmiany stężenia gazu w czasie Δt . Omówiono 3 możliwości zastosowania analizatora: do pomiaru nagłych zmian stężenia, jako człon różniczkujący lub jako analizator o przyspieszonym działaniu. Podano zasadę działania oraz własności dynamiczne proponowanych zastosowań analizatora.

1. Wstęp

Zagadnienie szybkiego pomiaru stężenia gazów nie przestaje być aktualne. Znane konstrukcje analizatorów nie zaspakajają wszystkich potrzeb. Opóźnienia pomiarowe analizatorów działających na zasadach fizykalnych mają charakter: a) czasu martwego powstającego wskutek transportu gazu od miejsca pomiaru do analizatora, b) bezwładności wskutek wymiany masy w detektorze i bezwładności samego organu pomiarowego. Przez racjonalne skonstruowanie urządzeń do poboru próbki gazu [1] można uzyskać znaczne zmniejszenie czasu martwego. Bardziej radykalne zmniejszenie czasu martwego można uzyskać przez wbudowanie analizatora lub jego organu pomiarowego do przestrzeni pomiarowej^{x)}. Możliwości takie mogą powstać wskutek postępu w technologii i rozwoju nowych metod pomiarowych.

^{x)} Np. pomiar wykorzystujący zmianę prędkości rozchodzenia się fal akustycznych przy zmianie składu gazu lub pomiar na zasadzie absorpcji promieniowania elektromagnetycznego w zakresie podczerwieni.

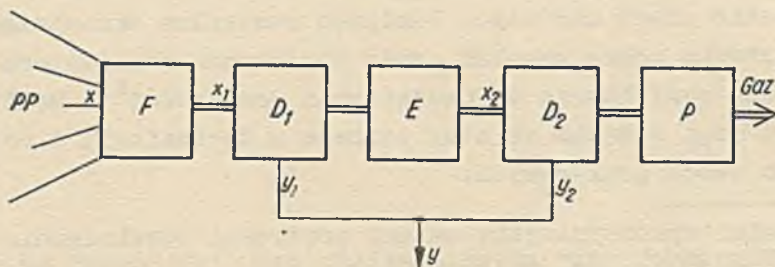
Opóźnienie pomiarowe wynikające z bezwładności organu pomiarowego zależy od zasady działania analizatora i jego konstrukcji. Szybkość działania analizatorów na zasadzie adsorpcji w podczerwieni oraz niektórych analizatorów termicznych w szczególności termooanemometrycznych jest na ogół wystarczająca. Jednak analizatory te wymagają starannego oczyszczania gazu, przez co zmniejsza się ich szybkość działania.

Poniżej przedstawiono nowy sposób pomiaru znaną metodą fizykalną zapewniający minimalne opóźnienie pomiarowe, jakie można uzyskać stosując określoną metodę fizykalną. Sposób ten można zastosować w każdym analizatorze działającym na zasadach fizykalnych. Ze względu na prostotę konstrukcji i dobrą odporność na ciężkie warunki pracy do realizacji wybrano termooanemometryczną metodę pomiaru [2] odpowiednio zmodyfikowaną.

2. Zasada działania analizatora

Analizatorem różniczkującym nazwano analizator składający się z dwóch jednakowych detektorów połączonych różnicowo, w którym jeden z detektorów działa z pewnym ściśle określonym opóźnieniem. W ten sposób sygnał wyjściowy analizatora jest różnicą wielkości mierzonej jaka nastąpiła w czasie Δt , czyli jest proporcjonalny do różniczki z wielkości mierzonej.

Zasadę działania analizatora różniczkującego objaśnia schemat blokowy przedstawiony na rys. 1. Drogę gazu oznaczono pod-



Rys. 1. Schemat blokowy analizatora różniczkującego

wóją linią. Gaz z przestrzeni pomiarowej PP zasysany jest pompką P poprzez filtr F, detektor termoanemometryczny D_1 , element opóźniający E i detektor D_2 . Wielkością mierzona jest stężenie jednego ze składników gazu znajdującego się w przestrzeni pomiarowej oznaczone symbolem x . Sygnałem wyjściowym detektora jest wielkość y . Detektory D_1, D_2 są identyczne, a statyczna charakterystyka przetwarzania ma postać:

$$y_{1,2} = kx_{1,2} \quad (1)$$

Wielkość mierzona x w przestrzeni pomiarowej jest zmienna w czasie tzn.

$$x = x(t) \quad (2)$$

W określonej chwili t w poszczególnych punktach drogi stężenie gazu wynosi:

$$\begin{aligned} &\text{w przestrzeni pomiarowej ... } x(t), \\ &\text{w detektorze } D_1 \text{ ... } x_1(t) = x(t - T_m), \\ &\text{w detektorze } D_2 \text{ ... } x_2(t) = x(t - T_m - \Delta t), \end{aligned}$$

przy założeniu, że wzdłuż swojej drogi gaz przepływa bez zmiany stężenia.

T_m oraz Δt są odcinkami czasu oznaczonymi na rys. 2. T_m jest spowodowane przepływem gazu z punktu PP do detektora D_1 . Gdy pojemność tego odcinka drogi gazu wynosi P , a objętościowe natężenie przepływu gazu jest równe \dot{V} , to

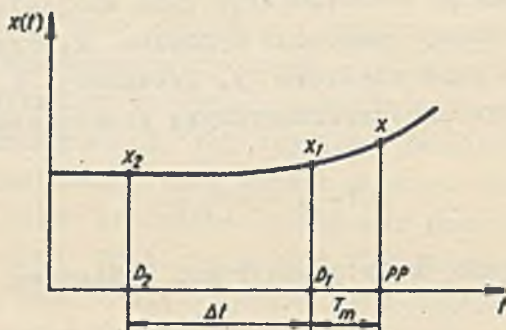
$$T_m = \frac{P}{\dot{V}} \quad (3)$$

Analogicznie

$$\Delta t = \frac{P_E}{\dot{V}} \quad (4)$$

przy czym P_E jest pojemnością drogi gazu od detektora D_1 do detektora D_2 . Opóźnienie Δt jest niezbędne do działania

analizatora różniczkującego i uzyskuje się je przez zastosowanie elementu opóźniającego E.



Rys. 2. Rozkład wielkości mierzonej wzdłuż drogi gazu

Detektory analizatora połączone są różnicowo, więc

$$y = y_1 - y_2. \quad (5)$$

Zgodnie z założeniami (1), (2a), (2b) sygnał wyjściowy analizatora jest równy

$$y = k [x(t - T_m) - x(t - T_m - \Delta t)]. \quad (6)$$

Równanie (6) podaje zasadę działania analizatora różniczkującego. Sygnał wyjściowy analizatora jest proporcjonalny do różnicy wielkości mierzonej w chwili $t - T_m$ oraz w chwili $t - T_m - \Delta t$. Analizator wskazuje zmianę stężenia w czasie, a nie stężenie w danej chwili. Równanie (6) można napisać w postaci:

$$y = m x'(t - T_m), \quad (7)$$

gdzie:

$m = k \Delta t$ może być stałą przyrządu, zgodnie z równaniami (4) oraz (1). Wskazanie analizatora jest wprost proporcjonalne do pochodnej wielkości mierzonej.

3. Własności dynamiczne analizatora

Każdy element analizatora różniczkującego powoduje opóźnienia pomiarowe. W równaniach (2a), (2b) uwzględniono jedynie czas martwy wskutek transportu gazu w przestrzeni pomiarowej, do detektorów. Transport gazu powoduje także zmniejszanie się gradientu stężenia gazu, jaki występuje na początku tej drogi. Przyczyną tego jest dyfuzja oraz niejednakowa prędkość gazu w całym przekroju przewodu gazowego. Skok jednostkowy stężenia gazu wywołany w przestrzeni pomiarowej stopniowo, wzdłuż drogi gazu zmienia się w funkcję rosnącą, ale o coraz mniejszym gradientie.

Właściwość tę charakteryzuje transmitancja drogi gazu, zależna od gazu, przekroju drogi i prędkości przepływu gazu. Drogę gazu można potraktować jako element inercyjny I rzędu, a wówczas transmitancja drogi od przestrzeni pomiarowej do detektora D_1 ma postać

$$K_1(p) = \frac{x_1(p)}{x(p)} = \frac{1}{1 + pT_1} e^{-p T_{m1}} \quad (8)$$

Odcinek drogi od detektora D_1 do detektora D_2 analogicznie charakteryzuje transmitancja

$$K_{12}(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} = \frac{1}{1 + pT_{12}} e^{-p T_{m12}} \quad (9)$$

lub

$$K_2(p) = \frac{x_2(p)}{x(p)} = \frac{1}{1 + pT_2} e^{-p T_{m2}} \quad (10)$$

Detektory analizatora posiadają jednakową bezwładność określoną transmitancją

$$K(p) = \frac{y_{1,2}(p)}{x_{1,2}(p)} = \frac{k}{1 + pT} \quad (11)$$

Równania (8), (9), (10) są przybliżone. Transmitancje te mają charakter transmitancji linii długiej, lecz dla dokonania oceny własności dynamicznych analizatora wprowadzone przybliżenie jest dopuszczalne.

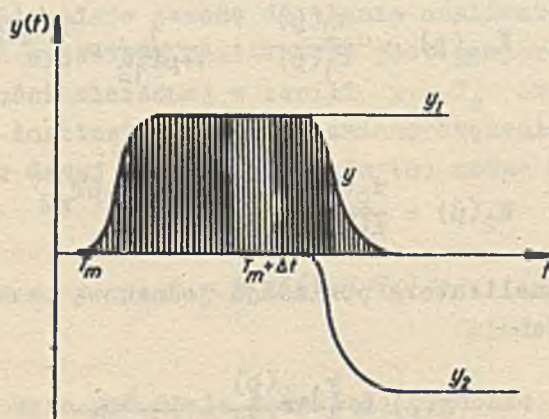
Zgodnie z równaniem (5) oraz związkami (8)...(10) sygnał wyjściowy analizatora ma postać:

$$y(p) = y_1(p) - y_2(p) = [K(p) K_1(p) - K(p) K_2(p)] x(p) \quad (12)$$

lub

$$y(p) = \left[\frac{k}{1 + pT} \frac{e^{-pT_{m1}}}{1 + pT_1} - \frac{k}{1 + pT} \frac{e^{-pT_{m2}}}{1 + pT_2} \right] x(p) \quad (13)$$

Czasowy przebieg odpowiedzi analizatora na skok jednostkowy przedstawiono na rys. 3. Jeżeli skok jednostkowy nastąpił w chwili $t = 0$, to do chwili $t = T_{m1}$ wskazanie analizatora nie ulega zmianie, po czym sygnał narasta wg krzywej odpowiadającej transmitancji $[K(p) \cdot K_1(p)]$. Ustalona wartość sygnału trwa do chwili T_{m2} , po czym wg krzywej odpowiadającej transmitancji



Rys. 3. Odpowiedź analizatora na skok jednostkowy wielkości mierzonej

$[K(p) \cdot K_2(p)]$ spada do zera. Szybkość działania analizatora różniczkującego charakteryzuje transmitancja $[K(p) \cdot K_1(p)]$, a więc elementy i parametry układu od przestrzeni pomiarowej do detektora D_1 włącznie. W przybliżeniu można przyjąć, że transmitancja analizatora ma postać

$$K_0(p) \cong \frac{k}{1 + pT} \frac{e^{-pT_{m1}}}{1 + pT_1} \quad (14)$$

Czas martwy T_{m1} jest wynikiem transportu gazu z przestrzeni pomiarowej do detektora D_1 . Przez umieszczenie analizatora w przestrzeni pomiarowej pojemność tej części drogi może wynosić łącznie z filtrem ok. 10 ml. Gdy natężenie przepływu gazu wynosi np. 30 l/h, to zgodnie z równaniem (3) czas martwy T_{m1} wynosi 1,2 sek. Stała czasowa T_1 dla w/w warunków może być rzędu $0,1 T_{m1}$; tzn. $T_1 \approx 0,1$ sek. Natomiast stała czasowa detektora zależy od jego konstrukcji. Dla grzejnika o średnicy ok. 0,2 mm stała czasowa wynosi ok. $T \approx 0,5$ sek. W przybliżeniu można się spodziewać, że 90% wartości ustalonej skoku jednostkowego analizator wskaże po czasie ok. 2,5 sek. Założone warunki są orientacyjne; możliwa jest ich zmiana w obu kierunkach.

Powrotny przebieg sygnału wyjściowego do zera następuje wolniej wobec członu inercyjnego transmitancji $K_{12}(p)$.

4. Zastosowanie analizatora różniczkującego

Równania (6) oraz (7) wskazują dwie różne możliwości zastosowania analizatora: pierwsza - do pomiaru nagłych zmian wielkości mierzonej, druga - jako członu różniczkujący przyspieszający działania innych analizatorów. Trzecia możliwość zastosowania polega na niespełnianiu równania (1) - przez co uzyskuje się kilkukrotne zwiększenie szybkości działania analizatora kosztem mniejszej czułości.

Do pomiaru nagłych zmian wielkości mierzonej należy zastosować dwa analizatory: analizator dokładny i analizator różniczkujący działający na zasadzie termoanemometrycznej [2]. Pierwszy z nich służy do pomiaru dokładnego, ale działa ze

znacznym opóźnieniem np. 1-2 minut, które jest za duże by spełnić wymagania. Wskutek opóźnienia można stwierdzić, że analizator dokładny wskazuje stężenie gazu w chwili t_1 . Analizator różniczkujący wskazuje różnicę stężenia jaka nastąpiła od chwili t_1 do chwili obecnej tzn. t_2 zgodnie z równaniem (6). Różnicę czasu $\Delta t = t_2 - t_1$ można dobrać pojemnością elementu opóźniającego odpowiednio do własności dynamicznych analizatora dokładnego. Wobec powolnych zmian wielkości mierzonej w czasie t_1 oraz powolnego reagowania analizatora dokładnego dobór opóźnienia Δt może być mało precyzyjny przez co nie powstają trudności w realizowaniu współdziałania obu analizatorów.

Proponowany sposób pomiaru dwoma analizatorami w szczególności nadaje się do pomiaru i sygnalizacji nagłego zwiększenia się stężenia niebezpiecznego dla otoczenia składnika gazu np. metanu w powietrzu kopalnianym, gdy stan taki powstaje niezbyt często. Gdy granica stężenia niebezpiecznego wynosi $x = a$, analizator dokładny wskazuje wartość $x = b$, to wskazania analizatora różniczkującego wartości $x = a - b$ oznacza osiągnięcie granicy stężenia niebezpiecznego. Sposób podania wyników obu analizatorów jest dowolny: mogą być wskazania oddzielne lub suma obu wskazań. Wskazania oddzielne zawierają więcej informacji, gdyż analizator różniczkujący wskazuje tendencję tzn. zwiększenie lub zmniejszenie się wielkości mierzonej, co ułatwia wykrycie stanu zagrożenia. Szybkość pomiaru określana jest własnościami dynamicznymi analizatora różniczkującego.

Zastosowanie analizatora różniczkującego jako członu różniczkującego wynika z równania (7), gdyż sygnał wyjściowy jest wprost proporcjonalny do pochodnej stężenia x gazu. Sygnał ten można dodawać do wskazań innego analizatora, a przez odpowiedni dobór opóźnienia Δt spowodować kompensację bezwładności działania dowolnego analizatora. Kompensacja nie zmniejsza czasu martwego, a ponadto czasy martwe obu analizatorów muszą być jednokowe.

Ze względu na łatwiejsze różniczkowanie w układach elektrycznych stosowanie analizatora różniczkującego do tego celu wydaje się być nieuzasadnione.

Najciekawsza możliwość wykorzystania analizatora różniczkującego to zwiększenie szybkości działania analizatorów działających na dowolnych zasadach fizykalnych^{x)} przez odpowiedni dobór własności dynamicznych obu detektorów. Detektor D_1 winien mieć możliwie najlepsze własności dynamiczne i możliwie dużą czułość wynoszącą k_1 . Detektor D_2 ma czułość mniejszą

$$k_2 < k_1. \quad (15)$$

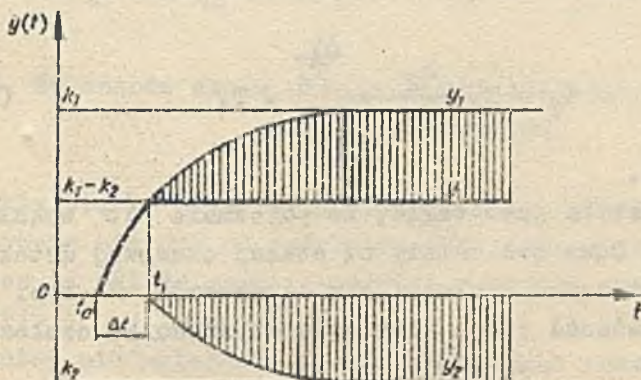
W stanie ustalonym sygnał wyjściowy wynosi

$$y = y_1 - y_2 = (k_1 - k_2)x. \quad (16)$$

Własności dynamiczne wynikają z równania (13)

$$y(p) = \left[\frac{k_1}{1 + pT_1} - \frac{k_2 e^{-p\Delta t}}{1 + pT_2} \right] e^{-pT_{m1}} x(p), \quad (17)$$

w którym T_1, T_2 oznaczają stałe czasowe detektora D_1 oraz D_2 , $\Delta t = T_{m2} - T_{m1}$ różnica czasów martwych obu detektorów, licząc czas od przestrzeni pomiarowej, T_{m1} - czas martwy detektora D_1 . Ze względu na małe opóźnienie Δt zmianę stężenia gazu wzdłuż drogi pominięto.



Rys. 4. Dobór czasu opóźnienia detektora D_2 dla uzyskania maksymalnej szybkości działania analizatora

^{x)} Nie nadają się do tego celu analizatory termomagnetyczne tlenku, jeżeli gaz jest mieszaniną wieloskładnikową [3].

Odpowiednio należy dobrać Δt oraz T_2 . Sposób doboru ilustruje rys. 4. Wskutek skokowej zmiany wielkości mierzonej sygnał detektora D_1 narasta, a w chwili t_1 osiąga wartość ustaloną sygnału wyjściowego analizatora, co wyraża równanie

$$y_1 = k_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1 - t_0}{T_1}} \right) = k_1 - k_2. \quad (18)$$

W chwili t_1 winien zadziałać detektor D_2 , więc

$$\Delta t = t_1 - t_0, \quad (19)$$

przy czym wartość tę można obliczyć z równania (18):

$$\Delta t = T_1 \ln \frac{k_1}{k_2}. \quad (20)$$

W chwili t_1 oraz dla $t > t_1$ szybkość narastania sygnałów obu detektorów winny być jednakowe tzn.

$$\left(\frac{dy_1}{dt} \right)_{t_1} = \left(\frac{dy_2}{dt} \right)_{t_1} \quad (21)$$

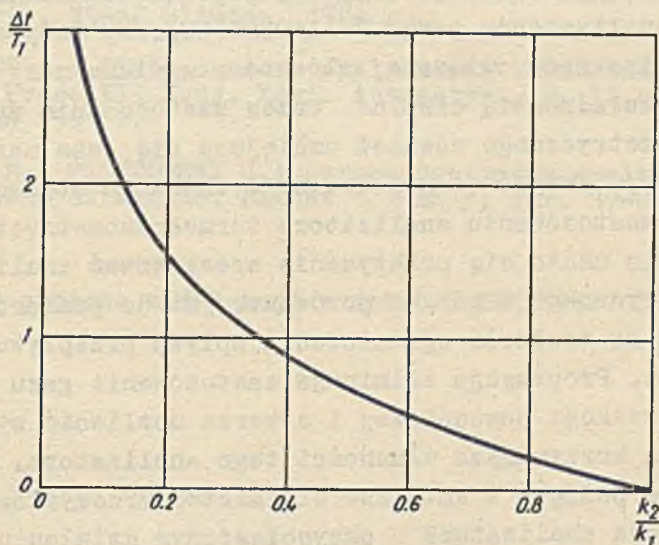
skąd wynika

$$T_2 = T_1 \frac{k_2}{k_1} e^{\frac{\Delta t}{T_1}} = T_1 \quad (22)$$

wobec doboru (20).

Działanie analizatora jest takie, że po czasie Δt wskazuje wartość ustaloną. Czas ten zależy od stałej czasowej detektora D_1 oraz od stosunku czułości obu detektorów. Na rys. 5 przedstawiono zależność czasu ustalania od stosunku czułości $\frac{k_1}{k_2}$.

Bez działania różniczkującego ustalanie się wskazań następuje wg krzywej wykładniczej ze stałą czasową T_1 , co oznacza, że 90% wartości ustalonej sygnał wyjściowy osiąga po czasie $t_{90} = 2,2 T_1$. Zwiększenie szybkości działania analizatora jest widoczne. Przez stratę czułości 20% ($k_1 - k_2 = 0,8 k_1$), szybkość działania analizatora wzrasta około 1,4-krotnie (porównanie Δt z czasem t_{90}). Praktyczna realizacja analizatora nie spełni dokładnie obliczonych warunków.



Rys. 5. Zależność czasu ustalania się analizatora od stosunku czułości detektorów

Zwykle będzie $T_2 > T_1$, a opóźnienia Δt oraz T_1 nie są stałe, gdyż zależą one od natężenia przepływu gazu przez analizator oraz od składu gazu i innych parametrów analizatora [3], [4], [5].

Wskutek niedokładnego doboru założonych parametrów przebieg ustalania się wskazań będzie inny jak przedstawiono na rys. 6. Działanie przyspieszające ustalanie się wskazań analizatora wg proponowanego rozwiązania jest jednak bezsporne.

Analizator taki zrealizowano, a wyniki badań są w opracowaniu. Jest to analizator termochemiczny KS-3 z posobnym przepływem gazu przez obie komory analizatora: pomiarową i porównawczą. Omawiany sposób można zrealizować na analizatorach termokonduktometrycznych, termoanemometrycznych, w pewnych przypadkach termomagnetycznych, a także na innych przyrządach pomiarowych do pomiaru innych wielkości fizykalnych.

5. Wnioski

W opracowaniu przedstawiono sposób poprawienia własności dynamicznych analizatorów gazu. Możliwość poprawy dotyczy bezwładności analizatorów związanej głównie z wymianą masy w detektorze lub bezwładnością cieplną. Przez zastosowanie analizatora termoanemometrycznego również zmniejsza się czas martwy.

Propozycje dotyczące pomiaru nagłych zmian stężenia opierają się na zastosowaniu analizatora termoanemometrycznego. Dotychczas nie udało się praktycznie zrealizować analizatora termoanemometrycznego z gazami porównawczymi do pomiarów ciągłych, ze względu na trudność ograniczenia wpływu przepływu do wymaganych granic. Propozycja eliminuje zastosowanie gazu porównawczego lub reakcji pomocniczej i stwarza możliwość wykorzystania szeregu korzystnych własności tego analizatora. Badania szczegółowe podjęto w Katedrze Miernictwa Przemysłowego.

Propozycja analizatora o przyspieszonym działaniu wynika częściowo z wcześniejszych opracowań [3]. Wykorzystanie jej polega na odpowiednim doborze parametrów detektorów. Niewielkim nakładem środków można uzyskać znaczne efekty, szczególnie tam, gdzie dysponuje się zapasem czułości. Przeprowadzone badania potwierdzają propozycję, lecz nie wyczerpują zagadnienia, gdyż każda konstrukcja analizatora i warunki zastosowania muszą być szczegółowo przeanalizowane; można bowiem uzyskać efekty niepożądane.

LITERATURA

- [1] ROMER E.: Zagadnienia opóźnień pomiarowych przy pobieraniu próbki gazu do analizy ciągłej. PAK, Nr 5/1965, str. 200-204.
- [2] ROMER E.: Anemometrische Gasanalysatoren. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Elektrotechnik. Ilmenau 8/1962 Nr 5 str. 435-439 lub Analizator termoanemometryczny. PAK 8/1962 Nr 8 str. 355-358.
- [3] PIOTROWSKI J.: Własności dynamiczne termomagnetycznego analizatora tlenu typu KTM, Prace III Kraj. Konf. Automatyki T.II str. 39-42 Gliwice, 1964 r.
- [4] FRĄCZEK J.: Stała czasowa analizatora termokonduktometrycznego, Prace III Kraj. Konf. Automatyki, T. II str. 9-12, Gliwice 1964 r.
- [5] ROMER E.; PIOTROWSKI J.: Termomagnetyczny analizator tlenu o szybkim działaniu, PAK Nr 1/1962 r. str. 17-20.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 15.XII.1966 r.

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР

Р е з ю м е

Предложено новый способ измерения основанный на использовании двух детекторов чувствительных на измеряемую величину, включенных дифференциально. Один из детекторов действует с запаздыванием Δt . Вследствие этого выходный сигнал газоанализатора пропорциональный концентрации газа в течение времени Δt . Описано 3 возможности использования газоанализатора: для измерения неожиданных измерении концентрации, в качестве дифференцирующего звена других газоанализаторов, или как газоанализатор ускоренного действия. Указано принцип действия и динамические свойства предложенных газоанализаторов.

THERMOANEMOMETRIC DIFFERENTIAL GAS ANALYSER

S u m m a r y

A new method of the measuring is presented. The principle of the measurement is based on the two differential connected detectors, but one detector is operating with the delay time Δt . As the result the output signal of the analyser is proportional to the gas concentration changes with the delay time Δt .

The three possibilities of the analyser application are discussed: 1^o for the measuring of the sudden change of the gas concentration, 2^o as a differential element and 3^o as a analyser with speed up operation. The principle of the operation and the dynamic properties are given.

