ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978
Seria: MECHANIKA z. 66 Nr kol. 570

Mieczysław LECH
Politechnika Wrocławska
Instytut Techniki Cieplnej
i Mechaniki Płynów

UKŁADY AUTOMATYCZNEJ REGULACJI TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO

Streszczenie. W instalacjach, w których materiał technologiczny w formie pyłu dostarczany jest pneumatycznie do procesu, istnieje konieczność prowadzenia transportu pneumatycznego lub danego procesu technologicznego przy optymalnym lub zadanym stosunku transportowanej masy pyłu do masy transportującego gazu. Wszelkie odchylenia od tego stosunku prowadzą do zakłóceń i nieekonomicznej pracy instalacji lub procesu technologicznego. Stosunek transportowanej masy pyłu do masy transportującego gazu, zwany koncentracją pyłu, musi być zatem mierzony i automatycznie regulowany. Niejednokrotnie zachodzi potrzeba równoczesnego pomiaru masy transportowanego pyłu. Podano i opisano schematy blokowe układów pomiarowo-regulacyjnych w odniesieniu do wymienionych wielkości. Na przykładzie procesu technologicznego wypału klinkieru w przemyśle cementowym podano efekty wdrożenia automatycznej stabilizacji koncentracji pyłu węglowego.

W wielu procesach przemysłowych materiał w formie pyłu podawany jest do urządzeń technologicznych. Najczęściej czynnikiem transportującym jest powietrze. Ze względu na wymogi technologiczne i konieczność utrzymywania stabilności procesu oraz ze względu na zapewnienie ekonomiczności i bezawaryjności transportu pożądane jest utrzymywanie stałego zadanego stosunku masy transportowanego pyłu m_s do masy transportującego gazu m_g, zwanego dalej koncentracją pyłu Y

$$Y = \frac{m_s}{m_g}. \qquad /1/$$

Wszelkie odchylenia od zadanej wartości koncentracji prowadzą do zaburzeń stabilności procesu technologicznego i zmniejszenia efektywności produkcji. Często po-

żądana jest również dla celów rozliczeniowych jak i automatycznego sterowania znajomość strumienia masy pyłu transportowanego pneumatycznie. Strumień masy pyłu może być obliczony z równania:

$$\dot{M}_s = Y_\tau \cdot \dot{M}_g = Y_L \cdot \frac{w_s}{w_g} \cdot \dot{M}_g , \qquad /2/$$

gdzie:

$\dot{M}_s$ i $\dot{M}_g$ - strumień masy pyłu i gazu,
Y_τ - koncentracja czasowa,
Y_L - koncentracja lokalna pyłu,
w_s/w_g - stosunek prędkości cząstek pyłu do prędkości gazu.

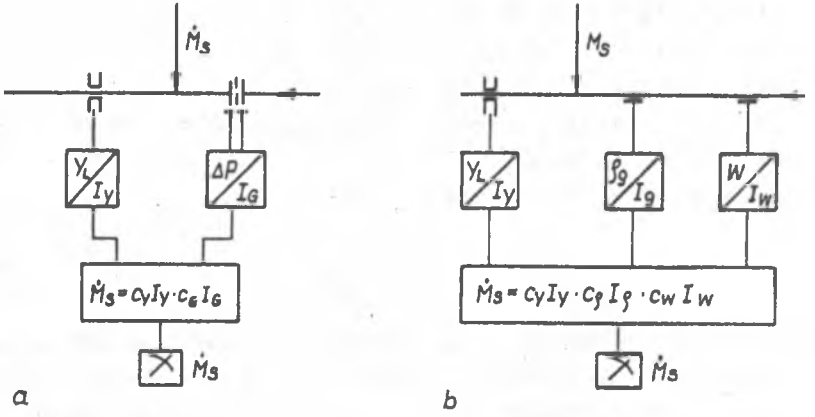
Wartość $\dot{M}_g$ można uzyskać drogą bezpośredniego pomiaru za pomocą np. metody zwężkowej lub też wyznaczyć ją na podstawie równania:

$$\dot{M}_g = W \cdot \rho_g \cdot A , \qquad /3/$$

gdzie:

W - prędkość średnia gazu w rurociągu,
ρ_g - gęstość przepływającego gazu w rurociągu,
A - przekrój, w którym dokonywany jest pomiar prędkości przepływu W.

Proste układy realizacji pomiaru $\dot{M}_s$ w oparciu o równanie /2/ oraz /3/ przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1a i b.



Rys.1. Schematy mierników strumienia masy pyłu

Pomiar strumienia masy lub prędkości przepływu gazu nie przedstawia trudności, gdyż znane są obecnie metody i aparatura służące do tego celu. Zatem pomiar koncentracji pyłu w przekroju pomiarowym warunkuje realizację pomiaru strumienia masy pyłu $\dot{M}_s$ i wymaga osobnego omówienia.

Spośród wielu obecnie znanych metod służących do pomiaru koncentracji pyłu jedynie metoda radioizotopowa doczekała się szerszego rozwoju i obecnie stosowana jest w ciągłych pomiarach przemysłowych. Zasada pomiaru polega na wykorzystaniu osłabienia promieniowania jonizującego przez pył zawarty w przenikanym płynie. Osłabienie promieniowania zależne jest od masy ośrodka przypadającej na jednostkę powierzchni przenikanej przez promieniowanie, czyli od masy powierzchniowej przenikanego ośrodka [1] :

$$J/J_o = e^{-\mu d_s} = e^{-\mu D \rho_g Y_L}, \qquad /4/$$

gdzie:

- J i J_o - liczba zarejestrowanych cząstek jonizujących odpowiednio podczas obecności i nieobecności pyłu w przenikalnym ośrodku,
- μ - masowy współczynnik osłabienia promieniowania,
- d_s - masa powierzchniowa pyłu zawartego w przenikalnym ośrodku,
- D - średnica przewodu, którym przepływa mieszanina pyłowo-powietrzna.

Równanie /4/ jest słuszne dla koncentracji $Y_L < 10 \frac{\text{kg pyłu}}{\text{kg gazu transp.}}$, dla których objętość pyłu V_s, zawarta w mieszaninie, jest pomijalnie mała w porównaniu z objętością gazu, $V_s \ll V_g$.

Przekształcając zależność /4/ dochodzimy do równania:

$$Y_L = \frac{\ln J_o/J}{\mu D \rho_g} \qquad /5/$$

Biorąc pod uwagę równanie /2/ i /5/ należy rozważyć trzy elementy pomiaru strumienia masy $\dot{M}_s$, a mianowicie w_s/w_g, μ, ρ_g, które tu z konieczności zostaną jedynie zasygnalizowane.

Osłabienie promieniowania jonizującego zależne jest od stosunku masy pyłu do masy gazu w jednostkowej objętości mieszaniny pyłowo-powietrznej, to jest od koncentracji lokalnej pyłu Y_L. Lokalizacja przekroju do pomiaru koncentracji powinna być tak wybrana, aby stosunek w_s/w_g był równy ok. 1.0.

Ze względu na istniejące oddziaływanie cząstek pyłu ze ściankami rurociągu oraz znaczną gęstość pyłu w porównaniu z gęstością gazu w prostym odcinku rurociągu poziomego stosunek $w_s/w_g \ll 1.0$ i wzrasta wraz z oddalaniem przekroju pomiarowego od miejsca wprowadzenia pyłu do rurociągu.

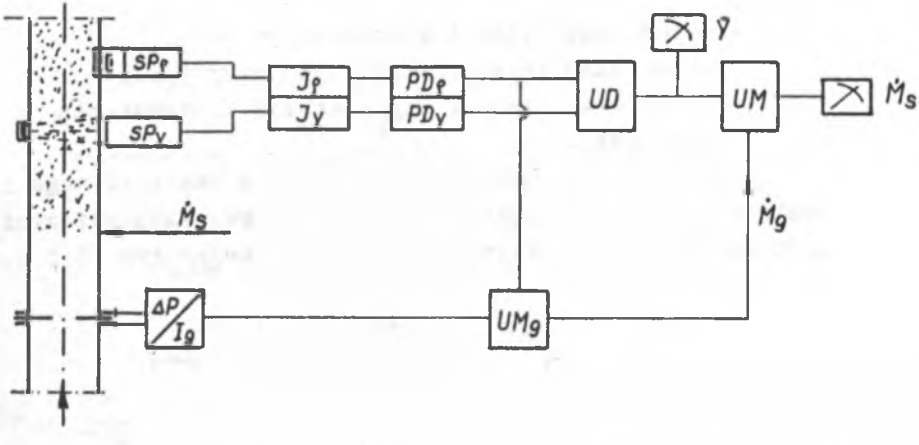
Badania wykonane przez [2] dowodzą, że dla pyłu węgla kamiennego, dla odległości 5,0 m od zsypu pyłu do rurociągu poziomego, stosunek w_s/w_g, dla ziarn o wymiarze 50 μm, wynosi 0,99, zaś dla ziarn o wymiarze 80 μm w_s/w_g = 0,98. Należy zwrócić uwagę na fakt, że stosunek w_s/w_g dla danego położenia przekroju pomiarowego i stałych własności fizycznych pyłu, stałej prędkości przepływu gazu i średnicy rurociągu jest wielkością stałą i może być uwzględniony przy wzorcowaniu aparatury pomiarowej.

Współczynnik osłabienia promieniowania μ zależny jest od energii maksymalnej cząstek beta E_{max}, wzajemnych stosunków geometrycznych radioizotopowego układu pomiarowego, od którego zależy również zmienność μ wraz ze zmianą masy powierzchniowej przenikanego ośrodka.

Szerokie badania tego zagadnienia przeprowadził [1] i podał wytyczne wyboru radioizotopowego układu pomiarowego, dla zapewnienia możliwie małych błędów pomiarowych. Przy stałym składzie chemicznym pyłu oraz stałych własnościach fizycznych przy przepływie charakteryzującym się stałością profilu rozkładu koncentracji można przyjąć μ za wielkość stałą.

Na podstawie równania /5/ można stwierdzić, że gęstość gazu transportującego ma duży wpływ na wartość mierzonej koncentracji. Dlatego w układach technologicznych o zmiennej gęstości gazu ρ_g należy stosować układy pomiarowe z kompensacją tej wielkości, zwłaszcza dla małych wartości mierzonej koncentracji. Ponieważ wartość strumienia masy gazu $\dot{M}_g$, mierzona za pomocą metody zwężkowej również zależy od ρ_g, ogólny wpływ zmiany ρ_g będzie mniejszy na mierzoną wartość strumienia masy pyłu $\dot{M}_s$ niż koncentracji Y_L.

Prace badawcze podjęte przez [1] były podstawą opracowania radioizotopowego miernika koncentracji i strumienia masy pyłu, którego konstrukcja zawiera wiele oryginalnych rozwiązań [3,4,5,6] . Schemat blokowy miernika przedstawiono na rys.2, gdzie podano uzupełnienie układu w przypadku stosowania kompensacji od zmian gęstości gazu transportującego, przy zastosowaniu pierwotnego przetwornika wg rozwiązania opracowanego w [7] .



Rys.2. Schemat blokowy miernika koncentracji i strumienia masy pyłu

Sygnały z pierwotnych przetworników koncentracji SP_y oraz gęstości SP_ρ podawane są na odpowiednie układy integratorów J_Y i J_ρ a następnie na układy dopasowujące UD_y i UD_ρ, z których trafiają na układ dzielący UD, na

wyjściu którego pojawia się sygnał proporcjonalny do wartości koncentracji Y. Sygnał ten podawany jest na układ mnożący UM_1 na który podany jest również sygnał z przetwornika różnicy ciśnień Δ_p na zwężce pomiarowej po pomnożeniu go w układzie mnożącym UM_ϱ przez sygnał proporcjonalny do gęstości gazu transportującego.

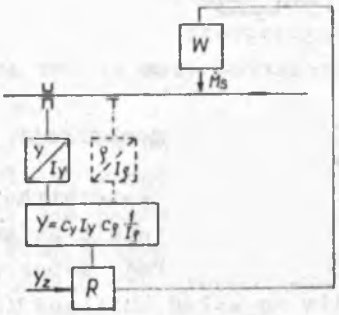
W układzie mnożącym UM realizowane jest równanie /2/ na wyjściu którego otrzymujemy sygnał proporcjonalny do strumienia masy pyłu $\dot{M}_s$. Pierwotny przetwornik gęstości gazu SP_ϱ usytuowano w pobliżu przekroju pomiarowego koncentracji pyłu, gdyż wpływ zmienności ϱ_g na wartość mierzoną jest znacznie większy dla pomiaru koncentracji zwłaszcza jej małych wartości, niż dla pomiaru strumienia masy gazu.

Opracowany miernik dzięki znormalizowanym sygnałom wyjściowym może współpracować z układami automatycznej regulacji.

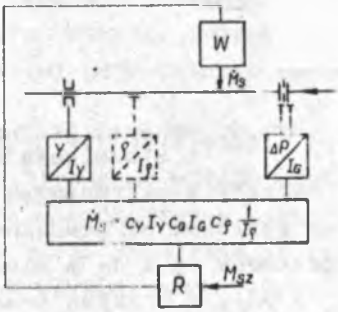
Można wyróżnić trzy zasadnicze schematy układów automatycznej regulacji instalacji transportu pneumatycznego:

- układ stabilizacji koncentracji pyłu,
- układ stabilizacji strumienia masy pyłu,
- układ stabilizacji koncentracji i strumienia masy pyłu.

Wybór układu zależy od procesu technologicznego i nadrzędnej roli sterowanego parametru. Najprostszymi układami są dwa pierwsze przedstawione na rys. 3 i 4.



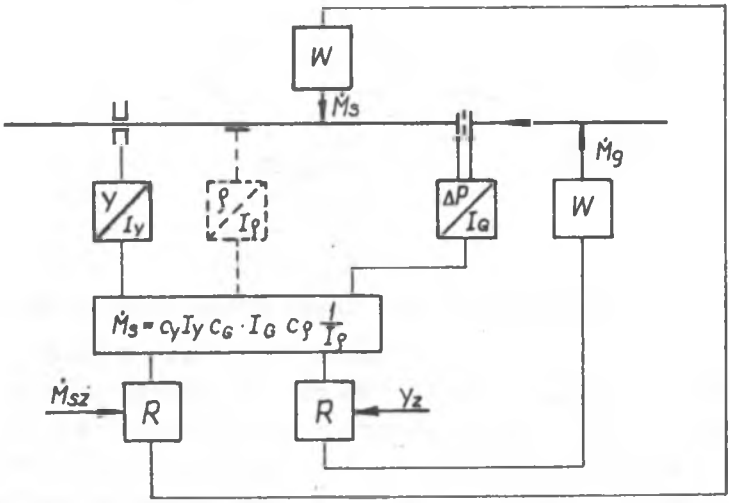
Rys. 3. Układ stabilizacji koncentracji pyłu



Rys. 4. Układ stabilizacji strumienia masy pyłu

Wartość mierzona porównywana jest w regulatorze z wartością zadaną. Sygnał wyjściowy z regulatora R, proporcjonalny do różnicy wartości zadanej i mierzonej, wysterowuje układ wykonawczy W, który zmienia ilość podawanego do instalacji pyłu $\dot{M}_s$. W przypadku stabilizacji koncentracji alternatywnie można przewidzieć sterowanie ilości powietrza transportującego $\dot{M}_g$ zamiast $\dot{M}_s$. Regulacja następuje do momentu wyrównania wielkości zadanej i mierzonej.

Układ do równoczesnej stabilizacji koncentracji i strumienia masy pyłu składa się niejako z tych dwóch układów i przedstawiony jest na rys.5. Miernik M_s spełnia funkcję zgodnie z równaniem /2/ , jednakże posiada on niezależne wyjścia sygnałów znormalizowanych proporcjonalnych do aktualnie mierzonej koncentracji Y lub strumienia masy pyłu $\dot{M}_s$. Obydwa sygnały podawane są na niezależne regulatory, na które wprowadzane są wartości zadane Y_z i $\dot{M}_{sz}$.

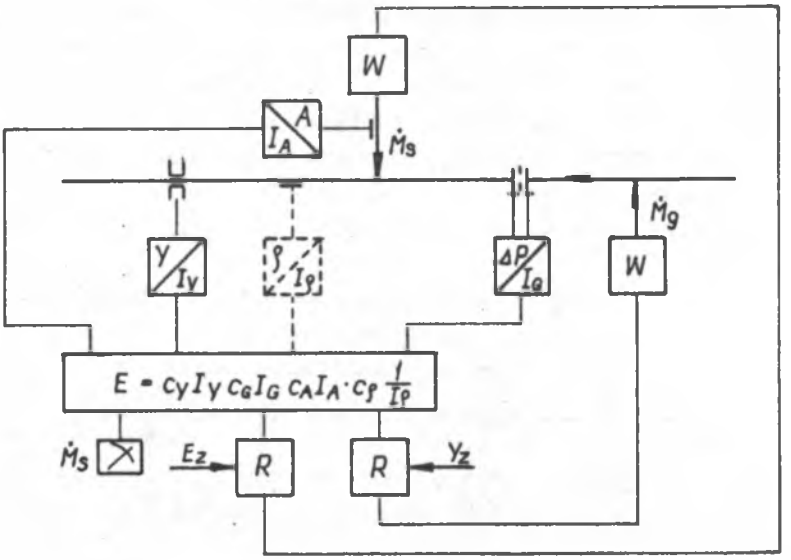


Rys.5. Układ stabilizacji koncentracji i strumienia masy pyłu

Różnice między wartościami zadanymi a mierzonymi wytwarzają sygnały wyjściowe z regulatorów, które urucha-

miają odpowiednie elementy wykonawcze.W. Przy dodatniej różnicy pomiędzy wartością zadaną a mierzoną regulator strumienia masy poprzez element wykonawczy zwiększa ilość podawanego pyłu $\dot{M}_s$, zaś regulator koncentracji poprzez element wykonawczy zmniejsza strumień masy powietrza transportującego $\dot{M}_g$.

Kreskowanymi liniami na rys. 4,5 i 6 podano uzupełnienie układów pomiarowo-regulacyjnych w przypadku kompensacji zmian gęstości gazu transportującego. W wielu procesach węgiel w postaci pyłu podawany jest pneumatycznie do palników palenisk technologicznych lub kotłów parowych.



Rys.6. Układ stabilizacji strumienia energii

Ważnym parametrem prowadzenia procesu jest nie ilość pyłu węglowego wdmuchiwanego do komory paleniskowej lecz energia z nim doprowadzona. Strumień energii doprowadzonej z paliwem oblicza się wg znanego iloczynu strumienia masy paliwa $\dot{M}_s$ i jego wartości opałowej w stanie roboczym Q_w^r

$$E = \dot{M}_s \cdot Q_w^r. \qquad /6/$$

W literaturze [8] zwrócono uwagę na istnienie liniowej zależności pomiędzy wartością opałową węgla a za-

wartością w nim popiołu A. Zależność ta z pewnością jest bardziej dokładna, gdy skład chemiczny węgla jest stały lub zmienia się w małych granicach. Większość zakładów przemysłowych zaopatrywana jest w węgiel z jednej lub dwóch kopalń, a zatem skład chemiczny węgla nie zmienia się w szerokich granicach i strumień energii można obliczyć z zależności:

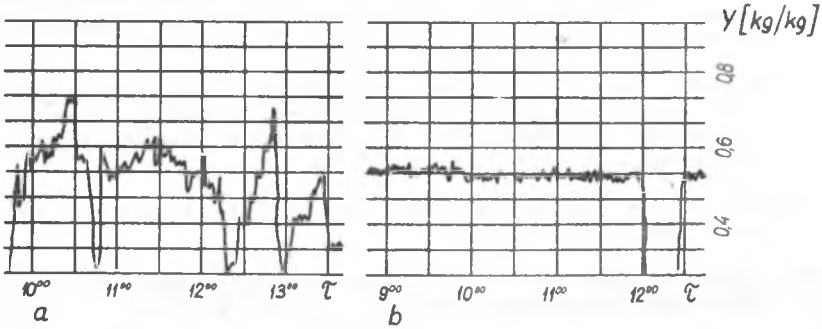
$$E = \dot{M}_s \cdot C_A \cdot A, \qquad /7/$$

gdzie C_A jest stałą proporcjonalności.

Wykorzystując znane radioizotopowe urządzenia do ciągłego pomiaru zawartości popiołu w węglu, opisane w [8,9,10] , można zaproponować układ pomiarowo-regulacyjny przedstawiony na rys.6.

Układ ten służy do stabilizacji strumienia energii wprowadzonej do paleniska przy równoczesnej stabilizacji koncentracji pyłu węglowego. Koncentracja jest parametrem szczególnie ważnym dla efektywności procesu spalania i powinna być utrzymywana na żądanym optymalnym poziomie. Niezależnie od stabilizacji tych dwóch ważnych parametrów dla procesu, dzięki niezależnym wyjściom urządzenia pomiarowego można dokonywać stałych odczytów i rejestracji strumienia masy pyłu węglowego podawanego do procesu technologicznego.

Przykładem praktycznego zastosowania może być układ stabilizacji koncentracji pyłu węglowego w mieszaninie pyłowo-powietrznej zasilającej palnik obrotowego pieca cementowniczego, pokazany na rys. 4. Uzyskaną stabilizację koncentracji pyłu obrazuje rys. 7, gdzie przedstawiono obraz zmian koncentracji Y w czasie τ, przed wprowadzeniem stabilizacji /rys.7a/ i po jej wprowadzeniu /rys.7b/. W efekcie wprowadzenia stabilizacji koncentracji pyłu węglowego uzyskano:



Rys.7. Zapis koncentracji w czasie:
a/ sterowanie ręczne,
b/ sterowanie automatyczne

- zmniejszenie ilości przenoszonego niespalonego pyłu węglowego do zimnego końca pieca, a przez to zmniejszenie występującego bardzo często w przemyśle cementowym zagrożenia wybuchowego w odpylaczach elektrostatycznych, zmniejszenie emisji pyłu do atmosfery,

- poprawę stabilności procesu, co wpłynęło na zwiększenie wydajności i efektywności produkcji, polepszenie produktu finalnego, przedłużenie okresów międzyremontowych, poprawę ochrony środowiska.

Oblicza się, że stosowanie przykładowego układu regulacji w oparciu o radioizotopowy układ pomiarowy da oszczędność kilku milionów złotych w skali rocznej w odniesieniu tylko do jednej jednostki produkcyjnej. Zamówienia przemysłu cementowego na realizację wymienionych zkładów pomiarowych są wymownym odzwierciedleniem potrzeb i konieczności ich stosowania.

LITERATURA

[1] M.Lech: Radioizotopowy pomiar koncentracji pyłu w mieszaninie pyłowo-powietrznej przepływającej rurociągiem zamkniętym. Praca doktorska. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1973.

[2] M.J.Parkinson, F.J.Hiorns: Mass Flowmeter for Gasborne Powders. Instrument Practice, March 1968.

[3] M.Lech: Radioizotopowe urządzenie do ciągłego pomiaru koncentracji fazy stałej w gazozolu. Patent PRL Nr 69694.

[4] M.Lech: Króciec do pomiaru osłabienia promieniowania świetlnego lub jonizującego. Patent PRL Nr 85723.

[5] M.Sąsiadek, M.Lech, J.Mojer, M.Teisseyre: Radioizotopowe urządzenie do pomiaru gęstości i masowego natężenia przepływu. Patent PRL Nr 91038.

[6] M.Lech: Radioizotopowe urządzenie z ciągłym sygnałem kompensacyjnym do dokładnego ciągłego pomiaru wielkości absorpcji lub rozproszenie promieniowania jądrowego. Patent PRL Nr 73516.

[7] M.Lech: Sonda gęstościomierza radioizotopowego. Patent PRL Nr P-193473.

[8] Technika jądrowa w przemyśle energetycznym, II Konferencja Naukowo-Techniczna, Boszkowo 1969.

[9] Cz.Mirkowski i inni: Kontrola jakości węgla kamiennego za pomocą popiołomierza radioizotopowego o działaniu ciągłym. Gospodarka Paliwami i Energią 8-9, Warszawa 1976.

[10] Automatyczna kontrola zawartości popiołu w węglu przy użyciu promieniowania. Gospodarka Paliwami i Energią Nr 1, 1975.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Р е з ю м е

Основным элементов в системе автоматической регулировки является радиоизотопный измеритель концентрации пыли. В работе описано конструкцию измерителя, а также подано эффекття внедрения автоматической стабилизации концентрации пыли в цементной промышленности.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR PNEUMATIC TRANSPORT

S u m m a r y

The basic component in the automatic control system is the radio-isotopic meter of the dust concentration.

The paper describes the meter construction, as well as the officiency resulting from the application of automatic stabilization of dust concentration in the cement plants.