

**ZBIGNIEW CHANIECKI, KRZYSZTOF GRUDZIEN
ANDRZEJ ROMANOWSKI, JAKUB BETIUK
BARTOSZ MATUSIAK, DOMINIK SANKOWSKI**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

BEZINWAZYJNE MONITOROWANIE I DIAGNOZOWANIE PRZEMYSŁOWYCH PROCESÓW TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO

Recenzent: **prof. Jan Sikora**

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

Transport pneumatyczny materiałów sypkich jest często stosowany w przemyśle. Stąd istotnym zagadnieniem jest optymalizacja transportu, nie tylko gotowego produktu, ale również materiałów wewnątrz zakładu produkcyjnego. Konieczność monitorowania, diagnozowania i sterowania instalacji transportu pneumatycznego wymusza poszukiwanie coraz doskonalszych metod pomiarowych, zwłaszcza bezinwazyjnych.

W artykule przedstawiono zastosowanie elektrycznej tomografii pojemnościowej, pozwalającej określić rozkład stałej elektrycznej materiału wewnątrz badanej instalacji. Dzięki tej metodzie możliwe jest również monitorowanie, diagnozowanie oraz wypracowanie optymalnych algorytmów sterowania procesem, pozwalające zwiększyć wydajność instalacji.

1. WPROWADZENIE

Transport pneumatyczny materiałów sypkich znajduje zastosowania w wielu gałęziach przemysłu. Jego główną funkcją jest przemieszczanie materiału na znaczne odległości, między miejscami załadunku, rozładunku, zbiornikami magazynowymi, silosami czy między gniazdami produkcyjnymi. Ponadto pneumatyczne systemy stosowane są do dokładnego dozowania składników oraz ich przemieszczania w warunkach kontrolowanego i regulowanego przepływu. Ten rodzaj transportu znajduje zastosowanie przede wszystkim w przypadku przemieszczania materiałów silnie ścierających się, higroskopijnych, o podwyższonej temperaturze, pyłów o własnościach wybuchowych, czy materiałów wymagających instalacji kwasoodpornych [1, 2, 3, 4]. Konieczność bezpiecznego przemieszczania materiałów sypkich czyni ten rodzaj transportu szeroko stosowanym. Sprawdza się on także w przypadkach, gdy istotne jest zachowanie środków bezpieczeństwa związanych z ochroną środowiska.

Wymogi stawiane przed instalacjami transportu pneumatycznego wymuszają rozwój dokładniejszych metod i systemów pomiarowych. Celem ich stosowania jest poprawa wydajności przepływu materiałów sypkich oraz minimalizacja degradacji transportowanego materiału, jak również przedłużenie żywotności instalacji [4]. System pojemnościowej tomografii procesowej jest nieinwazyjnym oraz relatywnie szybkim narzędziem do obrazowania rozkładu przenikalności dielektrycznej materiału przepływającego przez czujnik pomiarowy. Rozkład ten jest proporcjonalny do koncentracji materiału [5, 6]. Już istniejące, oraz będące w fazie opracowywania algorytmy analizy danych tomograficznych, stanowią podstawę do rozwoju metod pozwalających na pełniejsze monitorowanie struktur i zjawisk fizycznych zachodzących podczas przepływu, pomiar charakterystycznych parametrów oraz identyfikację wzorca przepływu [7, 8]. Zrozumienie i ocena zjawisk zachodzących podczas przepływu, przy zastosowaniu tomografii pojemnościowej w zdecydowany sposób poprawi skuteczność kontroli procesów przemysłowych, pozwalając m.in. przewidzieć i zapobiec awarii systemu przesyłu [9, 10, 11].

Przewidywanie, krytycznych dla przebiegu procesu, zjawisk ma fundamentalne znaczenie w rozwoju strategii sterowania danym procesem przemysłowym. Przykładowo, wcześniejsze wykrycie, ryzyka blokady rurociągu pozwoli wypracować odpowiednie sterowanie w celu uniknięcia awarii, np.: regulator zmieni ciśnienie wlotowe powietrza do rurociągu oraz/lub ilości dozowanego materiału.

Zastosowanie techniki tomografii pojemnościowej oraz metod przetwarzania danych pomiarowych w systemie sterowania pozwoli przede wszystkim na:

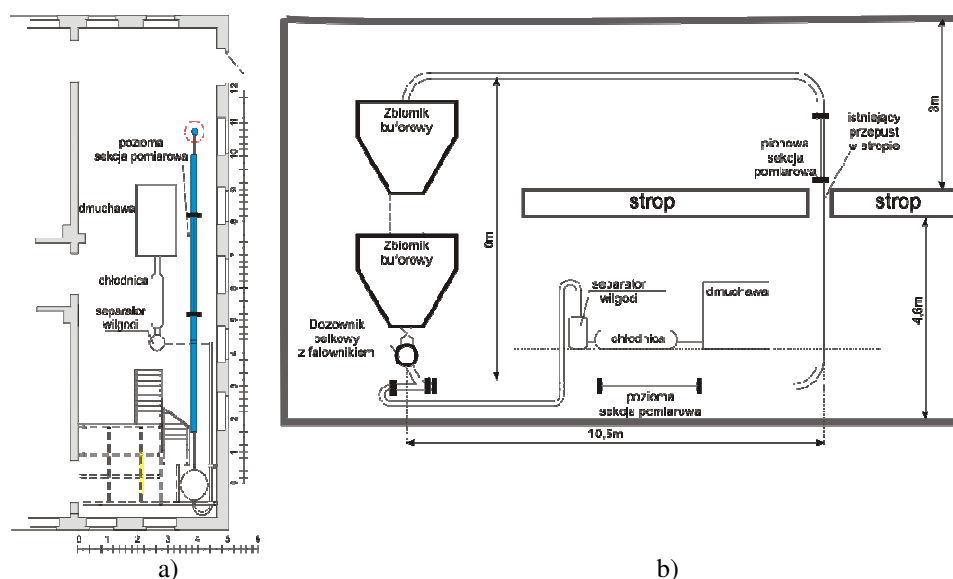
- zapobieganie awariom systemu przepływu (blokady systemu przepływu przez kumulujący się materiał w rurociągu);
- ograniczenie konsumpcji energii przez system transportu;

- zminimalizowanie degradacji materiału i rurociągu;
- utrzymanie określonego wzorca i ciągłości przepływu;
- poprawienie pomiaru prędkości przepływu i masy przepływu materiałów sypkich.

Dlatego też, opracowywane metody monitorowania, diagnozowania i sterowania procesów transportu pneumatycznego mogą znaleźć zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Ze względu na zapotrzebowanie przemysłu na tego typu rozwiązania w Katedrze Informatyki Stosowanej w Laboratorium Tomografii Procesowej im. Tomasza Dyakowskiego, zbudowano instalację badawczą transportu pneumatycznego, przedstawioną na rysunku 1. Warunki pracy instalacji, jej gabaryty i moc są porównywalne z tymi stosowanymi w warunkach przemysłowych.



Rys. 1. Rysunek poglądowy instalacji badawczej transportu pneumatycznego
a) rzut z góry, b) przekrój

Parametry w/w instalacji są następujące:

- | | |
|--|----------------------------|
| • materiał transportowany | granulat plastikowy |
| • wydajność | 0,5 – 1,0 t/h |
| • ciężar nasypowy materiału transportowanego | 1,0 – 1,2 t/m ³ |
| • granulacja | 1 – 3 mm |

- zużycie powietrza ok. 400 m³/h
- ciśnienie powietrza transportującego max. 100 kPa.

Instalacja transportu pneumatycznego zbudowana jest z następujących elementów:

1. Dmuchała w obudowie dźwiękochłonnej typ ZL 700A
 - wydajność $V = 403 \text{ m}^3/\text{h}$
 - ciśnienie powietrza (nadciśnienie) $\Delta p = 100 \text{ kPa}$
 - temperatura powietrza wylotowego ok. 120°C
 - poziom ciśnienia akustycznego ok. 72 dB.
2. Chłodnica powietrza typ WRN022
 - wydajność $V = 403 \text{ m}^3/\text{h}$
 - ciśnienie powietrza (nadciśnienie) 100 kPa
 - temperatura powietrza na wlocie 130°C
 - temperatura powietrza na wylocie ok. 36°C.
3. Separator wilgoci typ SFH030N.
4. Dozownik celkowy z eżektorem.
5. Rurociąg transportowy **DN 65** – długość ok. 26mb (20 mb w poziomie + 6 mb w pionie) – stal nierdzewna.
6. Zbiorniki buforowe o objętości $V=0,3 \text{ m}^3$ każdy.
7. Dwie sekcje pomiarowe z sensorami tomograficznymi.

Proces transportu pneumatycznego w omawianej instalacji można opisać następująco:

- materiał – granulata plastikowy (tworzywo sztuczne, np. poliamid) zasypywany jest do dolnego zbiornika buforowego (nad dozownikiem celkowym),
- podajnik celkowy, za pośrednictwem eżektora dozuję materiał do rurociągu transportowego,
- dmuchała (źródło medium transportowanego – powietrza), tłoczy powietrze, które transportuje pneumatycznie materiał rurociągiem DN 65 do górnego zbiornika buforowego umieszczonego na wadze,
- materiał z górnego zbiornika jest opróżniany grawitacyjnie z powrotem do zbiornika nad dozownikiem celkowym lub do innego układu odbiorczego (np. silos),

- powietrze wyphywające ze zbiornika buforowego jest odpylane za pomocą filtra workowego.

Z procesowego punktu widzenia istotne są dwie wielkości: masowe natężenie przepływu fazy stałej i fazy gazowej [12].

Masowe natężenie przepływu fazy stałej wyznaczane jest w oparciu o pomiar masy granulatu zasypywanego do górnego zbiornika w określonym czasie.

Masowe natężenie przepływu powietrza wyznaczane jest w oparciu o pomiar ciśnienia dynamicznego przepływającego powietrza w rurze dolotowej o średnicy wewnętrznej 76 mm.

Tabela 1. Mierzone parametry technologiczne

Nazwa obwodu	Wielkość mierzona	Zakres	Dokładność bezwzględna
DPI 1	Ciśnienie dynamiczne powietrza transportującego	0 ÷ 600 Pa	±5 Pa
DPI 2	Ciśnienie statyczne powietrza transportującego	0 ÷ 1,6 bar	±0,02 bar
TI 3	Temperatura powietrza wyphywającego z dmuchawy	0 ÷ +150 °C	±1 °C
TI 4	Temperatura powietrza transportującego	0 ÷ +150 °C	±1 °C
MI 5	Masa materiału transportowanego (granulatu) w górnym zbiorniku magazynowym	0 ÷ 300 kg	±0,1 kg
FIC 6	Prędkość obrotowa dozownika celkowego (częstotliwość prądu zasilającego)	0 ÷ 100 Hz	±1 Hz
FIC 7	Prędkość obrotowa dmuchawy powietrza (częstotliwość prądu zasilającego)	0 ÷ 50 Hz	±0,1 Hz

3. WYZNACZANIE PARAMETRÓW PRZEPLYWU

Do wyznaczania parametrów przepływu w instalacji transportu pneumatycznego materiałów sypkich, zastosowano dwupłaszczyznowy system elektrycznej tomografii pojemnościowej (ang. Electrical Capacitance Tomography – ECT). Umożliwia on monitorowanie procesów prowadzonych w przekrojach przezroczystych oraz uzyskanie ilościowej jak i jakościowej informacji z miejsc niedostępnych, dla dotychczas stosowanych w tym zakresie technik optycznych. Np. analiza obrazów z kamery CCD ogranicza się jedynie do warstw zewnętrznych procesu. Wybór techniki ECT wynika również z faktu,

że badane materiały mają odpowiednie, dla tej metody, właściwości dielektryczne [5, 13-15].

Zastosowanie ECT pozwala wyznaczyć parametry przepływu materiałów sypkich, tj. koncentrację i prędkość strumienia przepływu. Znajomość ich rozkładu, zarówno w czasie jak i przestrzeni, pozwala na kontrolę i monitorowanie przepływu. Koncentracja może zostać określona jako stosunek objętości materiału do mieszaniny gaz/ciało stałe:

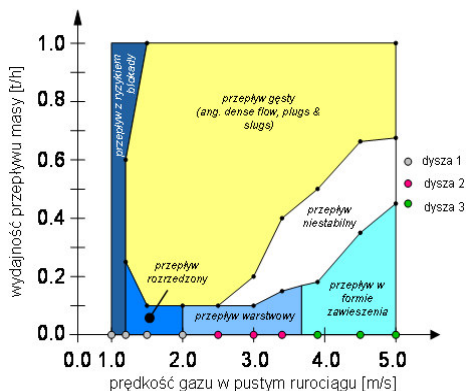
$$k = \frac{V_{\text{granulat}}}{V_{\text{mieszanina}}} \quad (1.1)$$

Poziom koncentracji materiału waha się w przedziale [0, 1]. Gęstość materiału jest określona zależnością (1.2)

$$\rho = (1 - k)\rho_g \quad (1.2)$$

Gdzie ρ_g jest rzeczywistą (fizyczną) wartością gęstości granulatu. Natomiast prędkość fazy jest to średnia prędkość wszystkich cząstek granulatu w kierunku, zazwyczaj, równoległym do ścian rurociągu.

W zależności od potrzeb, średnice rurociągów wahają się od kilkudziesięciu do kilkuset mm, zaś ilość transportowanego materiału od kilku kg/h do setek t/h, przy długościach rurociągu rzędu kilku do kilkuset metrów. Prędkość powietrza dobierana jest w zależności od własności materiału i zazwyczaj nie przekracza 30m/s. Zależności między gęstością cząstek granulatu, a prędkością gazu pozwalają wyróżnić kilka wzorców przepływu masy (Rys. 2).



Rys. 2. Wzorce przepływu w sekcji poziomej transportu pneumatycznego, przy określonej prędkości gazu i wydajności przepływu masy

W przypadku przepływu pneumatycznego wyróżniamy przepływy: gęsty (ang.: dense flow – falowy, korkowy), zawieszony (ang. suspended flow), rozcieńczony (ang. dilute flow), niestabilny (ang. unstable), warstwowy (ang.

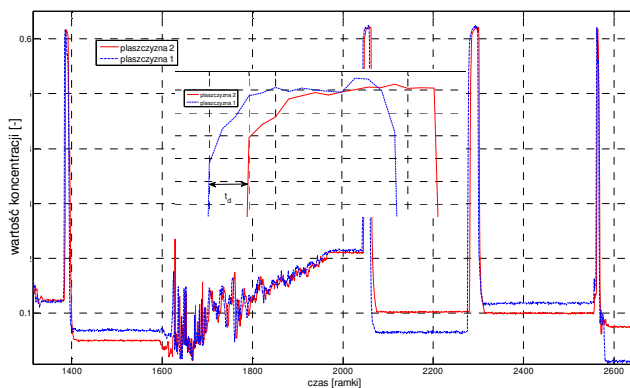
stratified flow). Optymalnym, pod względem wydajności transportu i znikomej degradacji materiału jest transport w postaci korków (ang. plugs), tzn. obszarów o zwiększonej koncentracji materiału [6, 16].

4. ANALIZA WYNIKÓW POMIAROWYCH

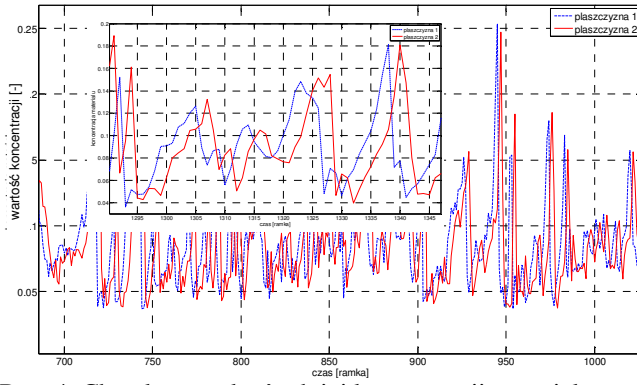
Zastosowanie metod analizy opartych na danych pomiarowych i zrekonstruowanych pozwala uzyskiwać zbliżone wyniki identyfikacji parametrów procesu. Wyniki uzyskane z zastosowaniem opracowanych przez autorów algorytmów analizy danych pomiarowych wskazują, że możliwa jest rezygnacja z często zbędnego w procesie przemysłowym etapu rekonstrukcji obrazów, który zwiększa liczbę wykonywanych operacji, wydłużając (czasem wielokrotnie) proces analizy on-line, tym samym spowalniając proces diagnostyczny i zmniejszając dokładność wyniku [7, 8]. Przeprowadzono szereg pomiarów różnych reżimów przepływu materiału (Tabela 2), w celu wyodrębnienia charakterystycznych zjawisk występujących podczas przepływu materiału. W ten sposób wyznaczono szereg charakterystyk wynikowych (rysunki 3 – 7). Więcej informacji można znaleźć w [17].

Tabela 2. Nastawy falowników sterujących dmuchawą i rotorem podajnika celkowego w eksperymentach przedstawionych na rysunkach 3-7

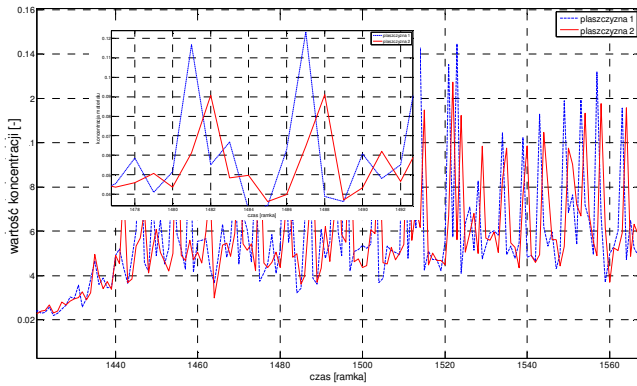
Numer rysunku	Częstotliwość pracy [Hz]	
	dmuchawa	podajnik celkowy
3	17,0	100
4	19,5	100
5	22,0	100
6	19,5	80
7	17,0	60



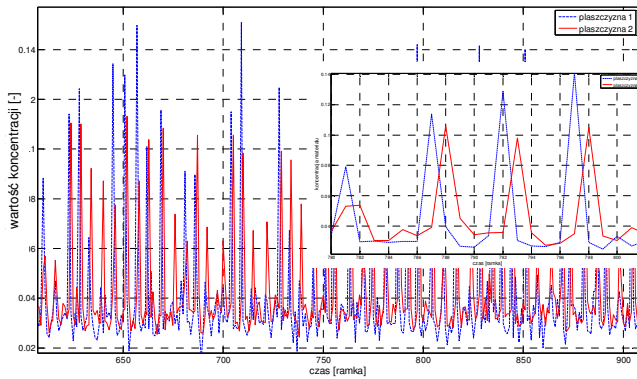
Rys. 3. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczynach przekroju (opis w tabeli 2)



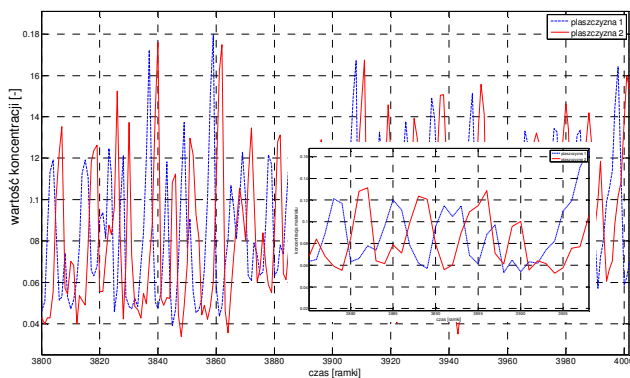
Rys. 4. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczynach przekroju (opis w tabeli 2)



Rys. 5. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczynach przekroju (opis w tabeli 2)



Rys. 6. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczynach przekroju (opis w tabeli 2)



Rys. 7. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczyznach przekroju (opis w tabeli 2)

Na rysunku 3 oznaczono przesunięcie t_d wykresów, wynikające z odległości między płaszczyznami pomiarowymi. Kolejne wykresy pozwalają zauważyć, że rejestrowane zmiany koncentracji wykazują powtarzalność, która może być wykorzystana podczas kolejnego etapu przetwarzania danych, tzn. określenia parametrów procesu, z użyciem technik korelacyjnych.

Na rysunkach 3, 4 i 5 można zaobserwować, że wzrost częstotliwości falownika sterującego dmuchawą (wzrost prędkości powietrza), przy stałej prędkości podawania materiału skutkuje przejściem metody transportu od korkowego do rozrzedzonego. Z rysunku 7 można wnioskować o równomiernym transporcie niewielkich porcji materiału. Dalsze zmniejszanie nastaw falowników skutkuje zwiększeniem nierównomierności przepływu, zaś obniżanie wartości częstotliwości - zablokowaniem materiału w rurociągu.

5. WNIOSKI

Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do określenia charakterystyki przepływu instalacji transportu pneumatycznego, z wysoką, dla warunków przemysłowych dokładnością, na poziomie 5%. Na podstawie pomiarów przepływu dla różnych nastaw falowników sterujących dmuchawą powietrza i rotora podajnika celkowego materiału, buduje się charakterystykę stanów pracy instalacji transportu pneumatycznego przy określonej prędkości gazu i wydajności przepływu masy.

Przeprowadzone badania dla większej liczby nastaw są zbierane w bazie wiedzy, która służy do sterowania instalacją transportu pneumatycznego. Wypracowanie odpowiedniego sterowania ma szczególne znaczenie nie tylko dla zapobiegania blokowania instalacji, co zawsze związane jest z przestojem linii

produkcyjnej, kosztami związanymi z usunięciem zatoru, ale także wzrostem zużycia energii podczas nieprawidłowej pracy instalacji. Uzyskanie optymalnego sposobu transportu materiału, charakterystycznego dla danego materiału jest konieczne dla zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu czy też uniknięcia degradacji materiału.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy dziękują za wsparcie badań poprzez projekt naukowo - badawczy pt. „Uzyskanie doskonałości w badaniach naukowych i przemysłowych zastosowaniach bezinwazyjnych systemów diagnostycznych” nr 167/6, PR UE/2007/7. Projekt finansowany jest przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP i wspomaga realizację projektu DENIDIA.

Autorzy artykułu Zbigniew Chaniecki, Krzysztof Grudzień, Jakub Betiuk i Bartosz Matusiak są stypendystami projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń - zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej - zarządzanie uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

LITERATURA

- [1] **Bridle I., Woodhead S.R.:** Particle degradation in pneumatic conveyors: use of data from a pilot-sized test facility to predict degradation in an industrial conveyor. *Proceedings of the I MECH E Part E Journal of Process Mechanical Engineering*, 216, 2, 2002, pp. 65-71.
- [2] **Colijn H.:** Bulk powder conveying Part 1., wersja elektroniczna utworzona w 1999 dostępna: http://www.powderandbulk.com/pb_services/ask_joe_archive/bulk_powder_conveying_part_1.htm, pobrano: 2005.12.04, obecnie dostępna (2010.09.15).
- [3] **Colijn H.:** Bulk powder conveying Part 2. wersja elektroniczna utworzona w 1999 dostępna: http://www.powderandbulk.com/pb_services/ask_joe_archive/bulk_powder_conveying_part_2.htm, pobrano: 2005.12.04, obecnie dostępna (2010.09.15).
- [4] **Dhodapkar S., Jacob K.:** Smart ways to troubleshoot pneumatic conveyors. *Chemical Engineering*, 109, 3, 2002, pp. 95-98.
- [5] **Pląskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T.:** *Imaging Industrial flows, applications of electrical process Tomography.* Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995, 214 pp.
- [6] **Jaworski A.J., Dyakowski T.:** Investigations of flow in-stabilities within the dense pneumatic conveying system. *Powder Technology*, Vol. 125, 2002, pp. 279- 291.

- [7] **Chaniecki Z.:** Algorytmy przetwarzania i analizy danych pomiarowych elektrycznej tomografii pojemnościowej w diagnostyce wybranych procesów przemysłowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2006, 210 pp.
- [8] **Grudzień K.:** Algorytmy segmentacji dla potrzeb wizualizacji parametrów diagnostycznych przepływów wielofazowych w wybranych systemach przemysłowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2007, 198 pp.
- [9] **Arko A, Waterfall R. C, Beck M. S.:** Development of electrical capacitance tomography for solids mass flow measurement and control of pneumatic conveying systems. Proceedings of 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, England, 1999, pp. 140-146.
- [10] **Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.):** Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. WNT, 2002, 828 pp.
- [11] **Chaniecki Z., Sankowski D.,:** Monitorowanie i diagnozowanie stanów dynamicznych z użyciem tomografii procesowej. Diagnostyka Procesów i Systemów, DPS 2007, materiały konferencyjne Słubice, 10-12 września 2007, ISBN 978-83-60434-31-4, pp. 387-394, 2007, 456pp.
- [12] **Chaniecki Z., Dyakowski T., Niedostatkiwicz M., Sankowski D.:** Application of Electrical Capacitance Tomography for Bulk Solids Flow Analysis in Silos. Particle & Particle Systems Characterization, vol. 23, 3-4, 2006, pp. 306-312.
- [13] **Williams R.A., Beck M.S. (red.):** Process Tomography: Principles, Techniques and Applications. Butterworth-Heinemann, Oxford UK, 1995, 581 pp.
- [14] **Scott D.M., McCann H.:** Process Tomography, edit by Scott & McCann, Process Imaging for automatic control. Taylor and Francis Group, 2005, pp.85-126.
- [15] **York T.:** Status of electrical tomography in industrial applications. Journal of Electronic Imaging, 10, 3, 2001, pp. 608-619.
- [16] **Solt P.:** What is dense phase conveying. wersja elektroniczna utworzona w 1999 dostępna: http://www.powderandbulk.com/pb_services/ask_joe_archive/what_is_dense_phase_conveying.htm, pobrano: 2005.12.03, obecnie dostępna (2010.09.15).
- [17] **Chaniecki Z., Grudzień K., Romanowski A., Sankowski D.:** Wyznaczanie charakterystyki instalacji transportu pneumatycznego materiałów sypkich przy zastosowaniu dwupłaszczyznowego systemu tomografii pojemnościowej. Zeszyty Naukowe AGH, Półrocznik Automatyka, Kraków, 13 (3), 2009, pp. 1257-1268.

NONINVASIVE MONITORING AND DIAGNOSIS OF PNEUMATIC TRANSPORT INDUSTRIAL PROCESSES

Summary

Pneumatic transport of friable materials is common in industry, therefore its parameters optimization – not only as final products, but also as materials inside a production line - is a significant issue. The need for monitoring, diagnosis and control of pneumatic conveying installations compel research for novel, accurate measurement methods, especially such of a noninvasive nature. This paper shows the application of Electrical Capacitance Tomography (ECT allows to reconstruct the distribution of the electrical permittivity inside a measurement sensor space) in order to obtain the parametric description of material flowing inside the investigated pipeline. Thanks to utilization of this method, monitoring, diagnosis and development of optimal control algorithms for increase of installation effectiveness, is feasible.

Politechnika Łódzka
Katedra Informatyki Stosowanej